Smaragd-GSH Kft.
Vízgazdálkodás és Környezetvédelem
www.smaragd.hu

SMARAGD GSH

A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010

FEHÉRVÁRCSURGÓ LOKÁLIS MODELL

e.com CERT
ISO 9001 & 14001
QEM HU 3 34 299 11
www.ecomcert.org

TERVLAP

Projekt megnevezése:	A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010
Részfeladat megnevezése	Lokális modell elkészítése – Fehérvárcsurgó lokális modell
Megrendelő	Országos Vízügyi Főigazgatóság 1012 Budapest, Márvány utca 1/D.
Vállalkozó	Smaragd GSH Kft. 1114 Budapest Villányi út 9.
Végrehajtás ideje	2019.01.11.-2021.06.30.

Projekt és szakmai vezető, a jelentést készítette	Gondárné Sőregi Katalin okl. geológus Mérnöki kamarai nyilvántartási szám: 13-8286 VZ-T, SZKV-1.1., SZKV-1.3., SZVV-3.1. SZVV-3.9. SZVV-3.10.	Gondár Sőrj Katalin ……
Hidrodinamikai modellezést és a jelentést készítette	Molnár Mária okl. hidrogeológus mérnök Modrovits Kamilla okl. geológus	
Karsztvíztárolók modellezése szakértő	Viszkok János Dr. es Sci. okl. geológus Mérnöki kamarai nyilvántartási szám: 01-11214 VZ-TEL, VZ-TER, SZVV-3.9., SZÉM3, VZ-VKG	
Regionális vízadók nem permanens modellezése szakértő	Kovács Balázs PhD okl. bányamérnök-hidrogeológus mérnök Mérnöki kamarai nyilvántartási szám: 05-0405 VZ-TEL, VZ-VKG, SZÉM-3, SZÉS8, GT, SZÉM-8	
Térinformatika, digitális térképek szerkesztése	Könczöl Nándorné térinformatikus mérnök	

Adatfeldolgozásban, értékelésben, a jelentés összeállításában részt vettek: Balogh Viktor (okl. geológus), Gondár Károly (okl. geológus, környezetvédelmi szakmérnök), Kun Szabolcs (okl. építőmérnök), Vatai József (okl. geológus), Weiser László (okl. geológus)

Jóváhagyta:

Gondár Károly

……..
Gondár Károly Ügyvezető

TARTALOMJEGYZÉK

1. Feladat meghatározás 7
2. A lokális modellterület bemutatása 10
2.1 Elhelyezkedés 10
2.2 Hidrogeológiai viszonyok 12
2.2.1 Földtani felépítés 12
2.2.2 A kőzetek vízföldtani tulajdonságai 16
2.2.3 Természetes és mesterséges megcsapolódások 19
3. A lokális numerikus modellezés bemutatása 24
3.1 A numerikus modell geometriai felépítése, numerikus rétegek 24
3.2 A numerikus modell rácshálójának kialakítása 32
3.3 A numerikus modell hidraulikai paraméterezése 35
3.3.1 Szivárgási tényező értékek a numerikus modellben 35
3.3.2 Fajlagos tározás értékek a numerikus modellben 48
3.3.3 Beszivárgás a numerikus modell felszínén 53
3.3.4 A diszkrét elemek a numerikus modellben 55
3.4 Peremfeltételek a numerikus modellben 57
3.4.1 1. típusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel 57
3.4.2 3. típusú (Transfer)-Cauchy peremfeltétel 58
3.4.3 4. típusú (Well)-Kút peremfeltétel 59
3.5 A tranziens modellezés 61
3.5.1 A tranziens modellezés kezdeti feltételei 61
3.5.2 A tranziens modell időléptéke 62
3.5.3 A numerikus modell kalibrálása 62
3.5.3.1 A karsztvízszint kalibrálása a 2019 állapotra 62
3.5.3.2 A forráshozamok kalibrálása a 2019 állapotra 65
3.5.3.3 Az üzemi vízszintek kalibrálása a 2019 állapotra 68
4. A lokális modellezés eredményei 69
4.1 A 2019-es állapot 69
4.2 Prognózis 2030-ra 77
5. Veszélyeztetettség 83
5.1. A karsztvíztároló fedőjének földtani értékelése a veszélyeztetett területeken 84
5.2 A modellezett veszélyeztetett területek összevetése az állapotértékelés során tapasztaltakkal 85
5.3 Javaslatok 87
6. Felhasznált irodalom 88

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A lokális modellek területei a regionális modellen belül 8
2. ábra: A lokális modell területe topográfiai térképen 11
3. ábra: Fedett földtani térkép a lokális modell területén (Magyarország fedett földtani térképe 1:100 000 Magyar Állami Földtani Intézet 2005 [11]) 15
4. ábra: Fehérvárcsurgó lokális modellterület domborzatának 3D ábrája 18
5. ábra: Fehérvárcsurgó lokális modellterület szerkesztett prealbai felszínének 3D ábrája 18
6. ábra: A bodajki Tó-forrás és Nádastavi-forráscsoport hozam idősora (1950-2019) 19
7. ábra: A karsztvíz visszatöltődésének folyamata a kincsesbányai depresszió területén az észlelőkutakban mért vízszintek alapján (Adatforrás: DRV Zrt.) 22
1. ábra: Iszkaszentgyörgy-Kincsesbánya bányászati vízkivételi adatai MBFSZ adatok alapján 23
7. ábra: A fehérvárcsurgói numerikus modellterület É-D-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás) [mBf] 27
8. ábra: A fehérvárcsurgói numerikus modellterület Ny-K-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás) . 27
9. ábra: Példa a főkarszt kibúvás geometriai leképezésére egy numerikus modellben (5x túlmagasítás) (forrás: *Smaragd GSH 2020 [3]*) 28
10. ábra: Az 1. numerikus modellfelszín [mBf] 28
11. ábra: Az 1. numerikus modellréteg vastagsága 29
12. ábra: A 2. numerikus modellfelszín [mBf] 29
13. ábra: A 2. numerikus modellréteg vastagsága 30
14. ábra: A 3. numerikusmodellfelszín [mBf] 30
15. ábra: A 3. numerikus modellréteg vastagsága 31
16. ábra: Az 5. numerikus modellfelszín [mBf] 31
17. ábra: A FEFLOW szoftverben alkalmazható elemek 32
18. ábra: Pont elemek 33
19. ábra: Egyszerűsített folyóhálózat 33
20. ábra: Egyszerűsített vetőhálózat 34
21. ábra: A numerikus modell rácshálójának Fehérvárcsurgó lokális modellterületre eső részlete .. 35
22. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 38
23. ábra: A 2. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 39
24. ábra: A 3. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 40
25. ábra: A 4. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 41
26. ábra: Az 5. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 42
27. ábra: A 6. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 43
28. ábra: A 7. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 44
29. ábra: A 8. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 45
30. ábra: A szivárgási tényező eloszlás É-D-i irányú szelvényen (2,5x túlmagasítás) 47
31. ábra: A szivárgási tényező eloszlás Ny-K-i irányú szelvényen (2,5x túlmagasítás) 47
32. ábra: K-tényező változása azonos rétegekben, É-D-i irányú szelvényen kinagyítva (2,5x túlmagasítás) 48
33. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 50
34. ábra: A 2. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 50
35. ábra: A 3. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 51
36. ábra: A 4. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 51
37. ábra: Az 5. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 52
38. ábra: A 6. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 52
39. ábra: A 2018-as év végére számolt beszivárgás a numerikus modellben 54
40. ábra: A különböző évekre számított beszivárgás értékek kapcsolása a tranziens modellben 55

41. ábra: A numerikus modellbe beépített vetők szivárgási tényező értékei az 5. rétegben 56
42. ábra: A numerikus modellben a források összekötése az 5. rétegig 1D elemmel Sötét szürkével az 5. réteg látható 57
43. ábra: A numerikus modellben szereplő 1.tipusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel 58
44. ábra: A numerikus modellben szereplő 3. típusú (Transfer)-Cauchy peremfeltétel 59
45. ábra: A főkarsztot (5. réteg) megcsapoló termelőkutak a numerikus modellben 60
46. ábra: A főkarsztot (6. réteg) megcsapoló termelőkutak a numerikus modellben 60
47. ábra: A vízkivételek modellbeli leképezése a rákhegyi vízakna példáján 61
48. ábra: A tranziens modell kezdeti (2000.01.01) vízszinteloszlása az 5. rétegben 62
49. ábra: A lokális modellterületen található monitoring kutak elhelyezkedése és a modellezett-mért vízszintek eltérése 2019. január 1-i állapotra 63
50. ábra: A numerikus modell számított vízszinteloszlása 2019. január 01-i állapotra (mBf) 64
51. ábra: A bodajki Tó-forrás mért és számított hozamadatai 66
52. ábra: A Nádastavi-forráscsoport mért és számított hozamadatai 67
53. ábra: A Bodajk HgI-43 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió) 70
54. ábra: A Magyaralmás HgI-45 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió) 71
55. ábra: A Iszkaszentgyörgy Kp-248 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió) 72
56. ábra: Az Iszkaszentgyörgy HgI-37 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió) 73
57. ábra: Az Iszkaszentgyörgy HgI-38 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió) 74
58. ábra: A Bakonykúti HgI-41 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió) 75
59. ábra: Az Isztimér-3 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió) 76
60. ábra: A bakonynánai meteorológiai állomás adatai alapján, HELP szoftverrel számított 10 éves átlagos beszivárgás mennyiségek (mm/év) 78
61. ábra: Mért és kétféle modellszcenárióval (pesszimista 1/2.) modellezett karsztvízszintek Bakonykúti HgI-41 kút példáján 79
62. ábra: A pesszimista szcenárió esetén figyelembe vett éves csapadékmennyiség és a beszivárgásmennyisége a bakonynánai meteorológiai állomáson mért adatok alapján 80
63. ábra: A pesszimista 2. szcenárió esetén figyelembe vett éves csapadék mennyiség és a beszivárgás mennyisége a bakonynánai meteorológiai állomáson mért adatok alapján 80
64. ábra: A lokális modellben a pesszimista 1. szcenárió alapján 2030-ra prognosztizált karsztvízszintek (5. réteg) [mBf] 81
65. ábra: A lokális modellben a pesszimista 2. szcenárió alapján 2030-ra prognosztizált karsztvízszintek (5. réteg) [mBf] 81

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat: A Fehérvárcsurgó lokális modell sarokpontjainak koordinátái 10
2. táblázat: A fehérvárcsurgói modellterület fontosabb karsztforrásainak kiindulási, mért minimum és jelenlegi hozamadatai 20
29. táblázat: Az iszkaszentgyörgyi vízkivétel hatására elapadt források 21
3. táblázat: A numerikus modellfelszínek szerkesztéséhez felhasznált elvi rétegbeosztás a feldolgozott fúrások alapján a különböző földtani helyzetek esetén 26
4. táblázat: Az egyes képződmények K-tényező értéke a numerikus modellben 46
5. táblázat: Az egyes képződmények vertikális elterjedése a numerikus modellben 48
6. táblázat: A szerkezeti elemek hidraulikai paraméterei 56
7. táblázat: A mért és modellezett vízszintek a megfigyelőkutakban a kalibráció időpontjában 64
8. táblázat: A regionális modellezés során használt szcenáriók 78
9. táblázat: A bodajki Tó-forrás és Nádastavi-forráscsoport 2019/2020-ban mért és 2030-ra prognosztizált forráshozam értékei 82

TÉRKÉPMELLÉKLETEK

1. térképmelléklet: Modellezett karsztvízszint – 2019. január 1. állapot
2. térképmelléklet: Modellezett karsztvízszint – 2030-ra prognosztizált legmagasabb karsztvízszint (pesszimista_2 szcenárió)
3. térképmelléklet: A karsztvízszint változása 2019 és 2030 között
4. térképmelléklet: Veszélyeztetett területek meghatározása a modellezett, 2030-ra prognosztizált legmagasabb karsztvízszint alapján

DIGITÁLIS FÜGGELÉK

1:10 000-es topográfiai térképek a veszélyeztetett területek feltüntetésével

1. FELADAT MEGHATÁROZÁS

A Dunántúli-középhegységi főkarsztvíztároló a bányászati célú karsztvízszint süllyesztés időszaka után (1960-1989) az 1990-es évek eleje óta regenerálódott, a karsztvízszint és a forráshozamok folyamatosan emelkedtek. A 2. Vízgyűjtő-gazdálkodási terv elkészítése során, a Dunántúli-középhegység állapot értékelése megállapította, hogy a visszatöltődés 2015 végére már közel 90%-ban lezajlott, a forráshozamokban azonban még emelkedés várható (*Hydrosys Kft.-Smaragd-GSH Kft. 2015*)[9].

A főkarsztvíztároló regenerációja a túlzott kitermelés időszaka után önmagában tekintve kívánatos jelenség, ugyanakkor az emelkedési folyamat problémákat is okozott. A karsztvízszint emelkedésével a rétegvizek és talajvizek felé vízátadás történik, így nemcsak a főkarsztvíztároló területén, hanem a szomszédos területeken is jelentkezik a feltöltődés hatása, amely főképpen települési környezetben károkat is okozott.

A negatív folyamatok vizsgálatára és előrejelzésére az Országos Vízügyi Főigazgatóság (Továbbiakban: OVF) 2017-ben projektet indított (KEHOP-1.1.0-15-2017-00010). A projekt célkitűzéseit a Kvassay Jenő Terv (Nemzeti Vízstratégia) külön is nevesíti.

A projekt célja a karsztvízszint emelkedése miatt jelentkező problémák ismeretében, a Dunántúli-középhegység karsztvíz-készletgazdálkodási állapotértékelésén, annak modellezésén keresztül az emelkedő karsztvízszint okozta jelenségek felmérése, környezetvédelmi, természetvédelmi, földtani értékelő feladatok ellátása, vízkészlet-gazdálkodási célkitűzések és feladatok megfogalmazása.

A regionális modell területe a teljes Dunántúli-középhegységi karsztvíztároló, annak fedett és fedetlen részei, a hideg és termál karsztvíztestek egyaránt. A regionális modell területe összesen ~16 555 km^2. A tranziens modellezés célja, hogy szimulálja az 1951-től 2019-ig tartó időszakot és a lehetőségekhez mérten megfelelő mértékben visszaadja a bányászati vízkivételek által okozott vízszintcsökkenés és a visszatöltődés folyamatát. Ennek szimulálására szükséges a vizsgált időszakra a változó paraméterek beépítése a modellbe, úgymint a termelések, a monitoring kutakban mért vízszintek, és a beszivárgás. A munkafolyamathoz hozzátartozott az előző paraméterekhez tartozó adatbázisok létrehozása. A kalibrált tranziens modellből készült a 2030-ig meghosszabbított időintervallumú tranziens modell, melynek célja a karsztvízszint és forráshozam változások előrejelzése volt.

A projektben eddig 4 részfeladat készült el, a következő zárójelentésekkel:

[1] Smaragd-GSH Kft. 2019: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. *Források felmérése, forráskataszter készítése záródokumentáció*. Jelentés.

[2] Smaragd-GSH Kft. 2020: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése. KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Vízháztartási modellezés és állapotértékelés – I. kötet. *A vízháztartási modell alapjául szolgáló földtani modell és a vízmérleg elemeinek bemutatása, valamint a karsztvízszint hosszú távú alakulása*. Jelentés.

[3] Smaragd-GSH Kft. 2020: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Vízháztartási modellezés és állapotértékelés – II. kötet. *A regionális numerikus hidrodinamikai modellezés menetének és eredményeinek bemutatása*. Jelentés.

[4] Smaragd-GSH Kft. 2020: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-

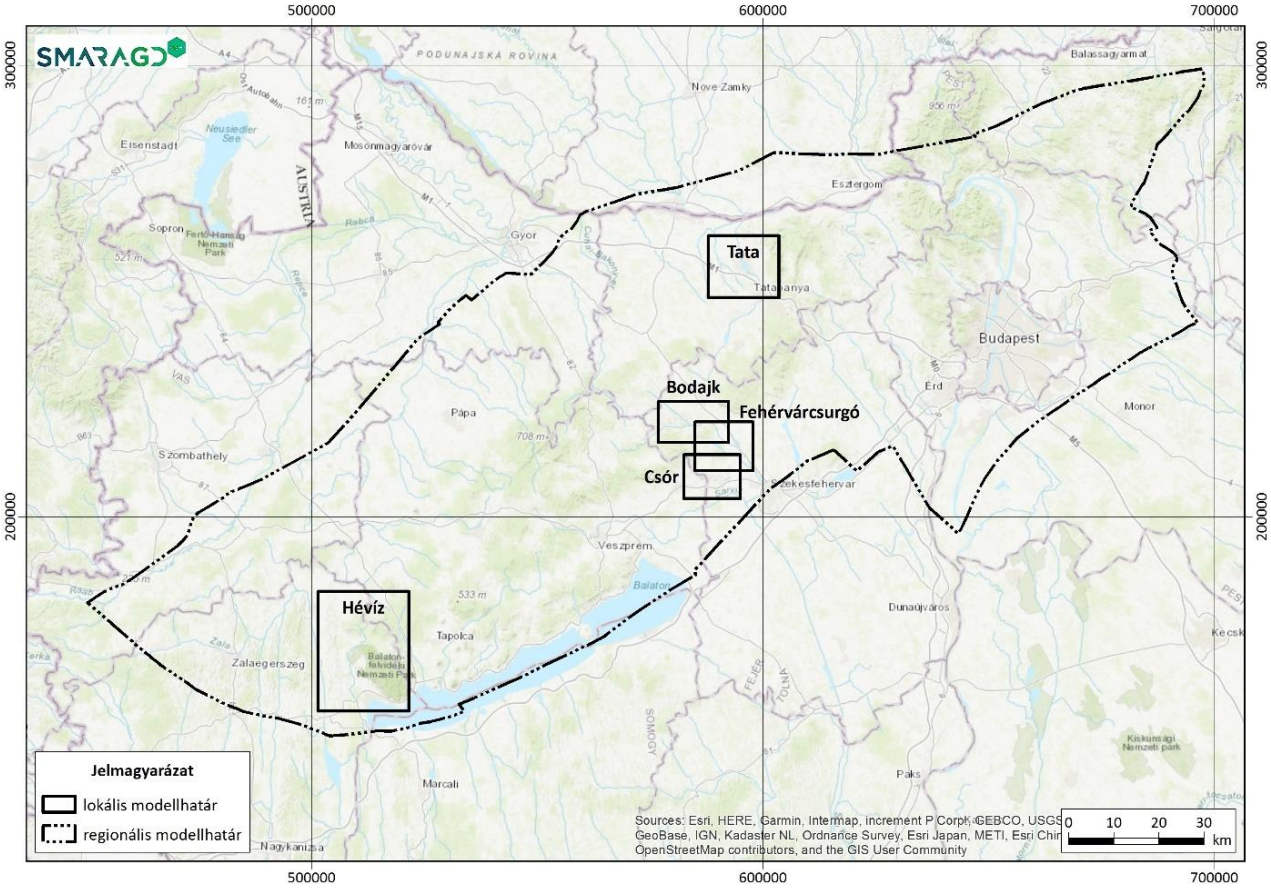
00010. Vízháztartási modellezés és állapotértékelés – III. kötet. *A karsztvíztároló állapotának összefoglaló értékelése*. Jelentés.

[5] Smaragd-GSH Kft. 2020: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése. KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Vízháztartási modellezés és állapotértékelés – *1. mintaterület kialakítása*. Jelentés.

[6] Smaragd-GSH Kft. 2020: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. *Veszélyeztetett területek lehatárolása*. Jelentés.

A regionális léptékű modellen túl szükség volt a kritikus helyeken – ahol a legnagyobb vízkárok jelentkeznek – lokális modellek kialakítására, amik segítik a döntéshozatalt és előrejelzést. A lokális modellek elkészítése a projekt 6. részfeladata.

Az 5 db lokális modell az alábbi területekre készült el: Bodajk, Tata, Csór, Fehérvárcsurgó és a Hévízi-tó – Keszthelyi hegység területe. A regionális vízháztartási modellterületen belül a lokális modellek területeit az ***1. ábra*** mutatja be.



1. ábra: A lokális modellek területei a regionális modellen belül

A Vízügyi Igazgatóságok és az OVF-fel történő konzultáció alapján a lokális modellezés 2003-2030 időszakra készült.

Bodajk, Fehérvárcsurgó, Csór, és Tata területeken elsősorban a veszélyeztetettség pontosítása volt a cél, így a modellek futtatása a pesszimista verzió szerint történt. A Hévíz-Keszthelyi-hegység lokális modell esetében, mind a három (pesszimista, optimista, átlagos) változatot is elkészítettük annak

érdekében, hogy a lokális modell vízkészlet-vízgazdálkodási kérdések megválaszolására is alkalmas legyen.

A lokális területek numerikus modellezéséhez a regionális modellhez hasonlóan a FEFLOW 7.2 verzióját választottuk, mivel a 3D-s mátrix elemek közé beépíthető 1D-s és 2D-s diszkrét elemek jobban tudják reprezentálni a Dunántúli-középhegység karsztrendszerét, továbbá az időbeli folyamatok (beszivárgás, víztermelések, stb.) tetszőleges felbontású szimulációját teszi lehetővé.

Jelen dokumentáció a Fehérvárcsurgó lokális modellezés eredményeit foglalja össze. A jelentés szervesen épül az előzőekben felsorolt, már eddig elkészült jelentésekre.

2. A LOKÁLIS MODELLTERÜLET BEMUTATÁSA

2.1 Elhelyezkedés

A Bodajk, Fehérvárcsurgó és Csór lokális modellterületek egymással viszonylag nagy térrészen átfedésben vannak. A különböző modellek bár különböző vízgazdálkodási és vízvédelmi célterületekre vonatkoznak, hidrogeológiai értelemben mégis összefüggőnek tekinthetők. Annak érdekében, hogy a modellezés eredménye e három területen minél inkább tükrözze a valós hidrogeológiai helyzetet és az eredmények koherensek legyenek, célszerűnek láttuk a három területre egy – mindhárom térrészt lefedő – modellt felépíteni és futtatni. A lokális modellek és eredményeik bemutatása azonban külön-külön, lokális területenként történik meg.[1]

A Fehérvárcsurgó lokális modellterület határát, a regionális modell alapján, a rákhegyi akna - mint jelentős vízkivételi központ - utánpótlási területe alapján lett lehatárolva. A lokális modell a k.1.1 Veszprém-Várpalota, Vértes D-i források vízgyűjtője karsztvíztesten helyezkedik el.

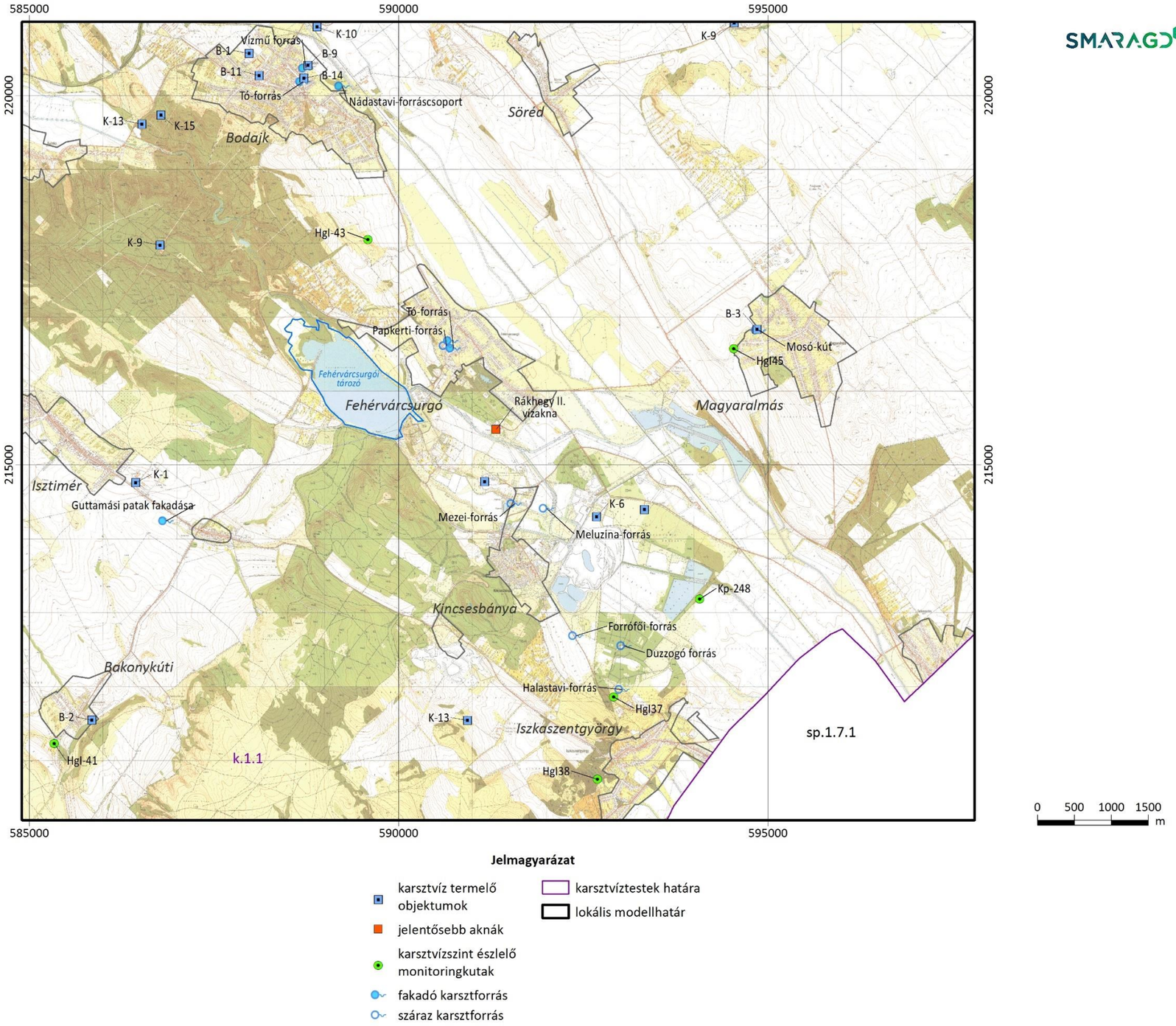
Földrajzilag a lokális modell a Keleti-Bakony peremi részét és a Móri-árok középső területeit foglalja magába (***2. ábra***).

Határoló koordinátát az ***1. táblázat*** mutatja, területe 139,32 km^2.

1. táblázat: A Fehérvárcsurgó lokális modell sarokpontjainak koordinátái

EOV X_{min}	210200
EOV X_{max}	221000
EOV Y_{min}	584900
EOV Y_{max}	597800

[1] A jelentésben bemutatott modellábrák színkulcsa az összevont modellterület (Bodajk-Fehérvárcsurgó-Csór) egészére vonatkozik, nem kizárólag Fehérvárcsurgó lokális modellterületre.



Jelmagyarázat

- karsztvíz termelő objektumok
- jelentősebb aknák
- karsztvízszint észlelő monitoringkutak
- fakadó karsztforrás
- száraz karsztforrás
- karsztvíztestek határa
- lokális modellhatár

2. ábra: A lokális modell területe topográfiai térképen

2.2 Hidrogeológiai viszonyok

2.2.1 Földtani felépítés

A karsztvíztárolót zömében triász korú mészkő képződmények építik fel, ugyanakkor a numerikus modellezés számára ismerni kell a karsztvíztároló vízrekesztő vagy rossz vízvezető képességű fekü és fedő képződményeinek is az elterjedését, amelyek jelentős mértékben, regionálisan is meghatározzák az áramlási tér geometriáját, valamint jelentősen befolyásolják az áramlási irányokat és a beszivárgás mennyiségét.

Az egyes képződmények felszíni elterjedését a Magyar Állami Földtani Intézet által szerkesztett 1:100 000-es méretarányú fedett földtani térkép kivágatán mutatjuk be (***3. ábra***). Az egyes képződmények elterjedését az alábbiakban ismertetjük.

A Fehérvárcsurgó modellterületen a prealbai aljzatot alkotó képződmények közül a legidősebb képződmények a variszkuszi orogén ciklus idején képződött kovapala és homokkő betelepüléseket tartalmazó alacsony fokú metamorfózison átesett aleuritos agyagpala (Lovasi Agyagpala), amelyet a modellterület DK-i részén találjuk meg Mohától DK-re.

A paleozoikum végén a perm időszak közepén megindult süllyedést és lepusztulást jelzi a jelentős vastagságban lerakódott szárazföldi törmelékes vörös homokkő (Balatonfelvidéki Homokkő), amely a Moha-Sárkeresztes vonalban alkotja a prealbai képződmények felszínét. A perm időszak végén a térség tenger alá került, aminek eredményeként területünkön evaporitos sorozat képződött (Tabajdi Anhidrit), amely a modellterületen csak Moha-Sárkeresztes környékén található meg.

A permi vörös homokkőre már kora-triász karbonátos üledéksor települ eróziós diszkordanciával. A kora-triász képződmények a modellterület DK-i részén Iszkaszentgyörgy és Sárkeresztes térségében megjelennek ugyan, de elkülönítésük nehézkes. (A modellterülettől D-re a kora-triászt az Arácsi Márga, a Hidegkúti dolomit és a Csopaki Márga képviseli).

A középső-triász elején a klíma szárazabbá vált, az árapályövi-síkság területein ekkor keletkezett az eléggé egyveretű „sejtes dolomit” (Aszófői Dolomit) a kora-triász képződmények fedőjében. Az Aszófői Dolomit felett lagúna fáciesű, evaporitos sok szerves anyagot tartalmazó (bitumenes) Iszkahegyi Mészkő települt. A középső-triász anizuszi korszakának közepén az üledékképződési környezet változásának eredményeként vastagpados kifejlődésű karbonát platform képződmény a Megyehegyi Dolomit települt az Iszkahegyi Mészkő felett. Az ekkor meginduló tektonikus hatások eredményeként az addig egységesnek mondható üledékképződési körülmények megváltoztak. A vetők mentén kisebb részmedencék jöttek létre, amelyeket sekélytengeri platformok választottak el. A tektonikai mozgások intenzívvé válását vulkáni működés kísérte. Ekkor rakódtak le a Buchensteini Formációcsoport kovás, tűzköves, tufabetelepüléses rétegei. A tengerek mélyülése a ladini korszakban érte el csúcsát, de a hosszasan kiemelt helyzetű sekélytengeri platformokon a ladinitől kezdődően a karni korszak közepéig jelentős vastagságban képződött a jól rétegzett ún. diplopórás dolomit (Budaörsi Dolomit). Ezek a középső-triász képződmények a modellterületen csak Iszkaszentgyörgy térségében különíthetők el.

A karni korszak közepétől a mélyebb medencék irányába jelentősen megnőtt a törmelékszállítás, de a platform helyzetű területeken tovább folytatódott a karbonátos üledékképződés. A modellterületen ilyen platformkarbonát a Sédvölgyi Dolomit.

Az üledékbehordás eredményeként a karni korszak végére jórészt feltöltődtek a mélyebb medencék és az így kialakult sekélytengeri platformon kezdődött meg a nagy vastagságú Fődolomit képződése. A Fődolomit fölött a klíma csapadékossá válásával a Dachsteini mészkő képződött.

Ez a DNy-ÉK-i irányú több kb. 12 km széles triász üledéksorozat jelenik meg, mint prealbai felszín a modellterület jelentős részén. A kora-triásztól a késő-triászig tartó üledéksorozat azonban csak Iszkaszentgyörgy-Kincsesbánya-Balinka vonalában követhető. A modellterület jelentős részén már a kora-triász képződmények is csak nehezen különíthetők el, a középső-triász és a késő-triász eleji karbonátos képződmények pedig szinte egyáltalán nem. Ezeket a nehezen elkülöníthető középső-, késő-triász karbonátos képződményeket a Vértesi Formációcsoportba szokás sorolni. Ilyen képződményeket találunk Iszkaszentgyörgy-Kincsesbánya vonaltól ÉK-re Magyaralmás térségében, valamint egy kb. 2,5 km széles DNy-ÉK-i sávban a modellterület DNy-i sarkától Bodajk-Fehérvárcsurgó vonalig.

A Dunántúli-középhegységi egység területén az ausztriai tektonikai fázis hatására ÉK-DNy irányú tengelyű szinklináris szerkezet alakult ki. A korábbi nagy kiterjedésű triász platformok feltöredeztek, egymáshoz képest eltérő szintekbe kerültek. A triász képződmények fölött a jura időszak elején még sekélytengeri képződmények, de később inkább pelágikus jellegű üledékek képződtek az alsó-jura során. A prealbai aljzat legfiatalabb képződményeit jura karbonátok alkotják a Dachsteini Mészkőre települve, de csak egy nagyon kis területen jelennek meg a modellterület ÉNy-i sarkánál Balinkától É-ra.

A krétában lezajló kompressziós tektonikai hatások eredményeként a terület sokáig szárazulattá vált.

A prealbai képződmények a modellterület jelentős részén a felszínen is (vagy csak nagyon vékony kvarter fedő alatt) megtalálhatók (Isztimér-Bodajk között, Iszkaszentgyörgy és Kincsesbánya térségében, illetve tőlük Ny-ra, valamint Magyaralmásnál. A Rákhegyi vízakna térségében a triász Fődolomit helyenként 200 m-nél is nagyobb felszín alatti mélységben található. Az aknától ÉK felé haladva a Fődolomit felszíne gyorsan mélyül (2 km-en belül több mint 300 m-t). Itt van a prealbai felszín a legmélyebben (-300 mBf szint alatt).

Legmélyebben (-600 m mélységben) a Móri-árok területén Mórtól D-re van a prealbai felszín, de DNy-felé a vetők mentén rövid távon belül a felszín közelébe emelkedik. A Móri-árok mellett leginkább a kréta képződményekkel fedett területek vannak mélyebben (-300 m körüli mélységben).

A kréta utáni szerkezeti mozgások eredményeként szárazulattá vált a Dunántúli-középhegységi egység, egészen a kora-eocénig. Ebben az időben rakódott le a triász törésekkel szabdalt karsztos térszínére a Gánti Bauxit. A kora-eocén végén meginduló újabb mozgások során megindult DNy felől a transzgresszió. A vetőkkel szabdalt, töredezett térszín tagoltsága miatt a középső-eocén során még ezen a viszonylag kis modellterületen is nagyon eltérő üledékképződési körülmények alakulhattak ki. A medencék területén a jelentős terrigén törmeléket tartalmazó Csernyei Formáció márgás, biogén törmelékes rétegei rakódtak le. A tenger további mélyülését jelzik a foraminiferás márgák (Padragi Márga). Velük egyidőben a partokhoz közeli sekély tengerekben rakódott le a biogén Szőci Mészkő, amely a modellterület jelentős részén (Isztimér, Kincsesbánya, Magyaralmás térségében) a felszínen is megtalálható. A harmadik eocén transzgresszió a priabonai korszakban indult meg. A sekélytengeri karbonátos rámpákon ekkor keletkeztek a jelentős biogén anyagot (kagylók sünök, foraminiferák, bryozoák) tartalmazó Szépvölgyi Mészkő rétegei, melyeket Balinka környékéről ismerünk fúrásokban.

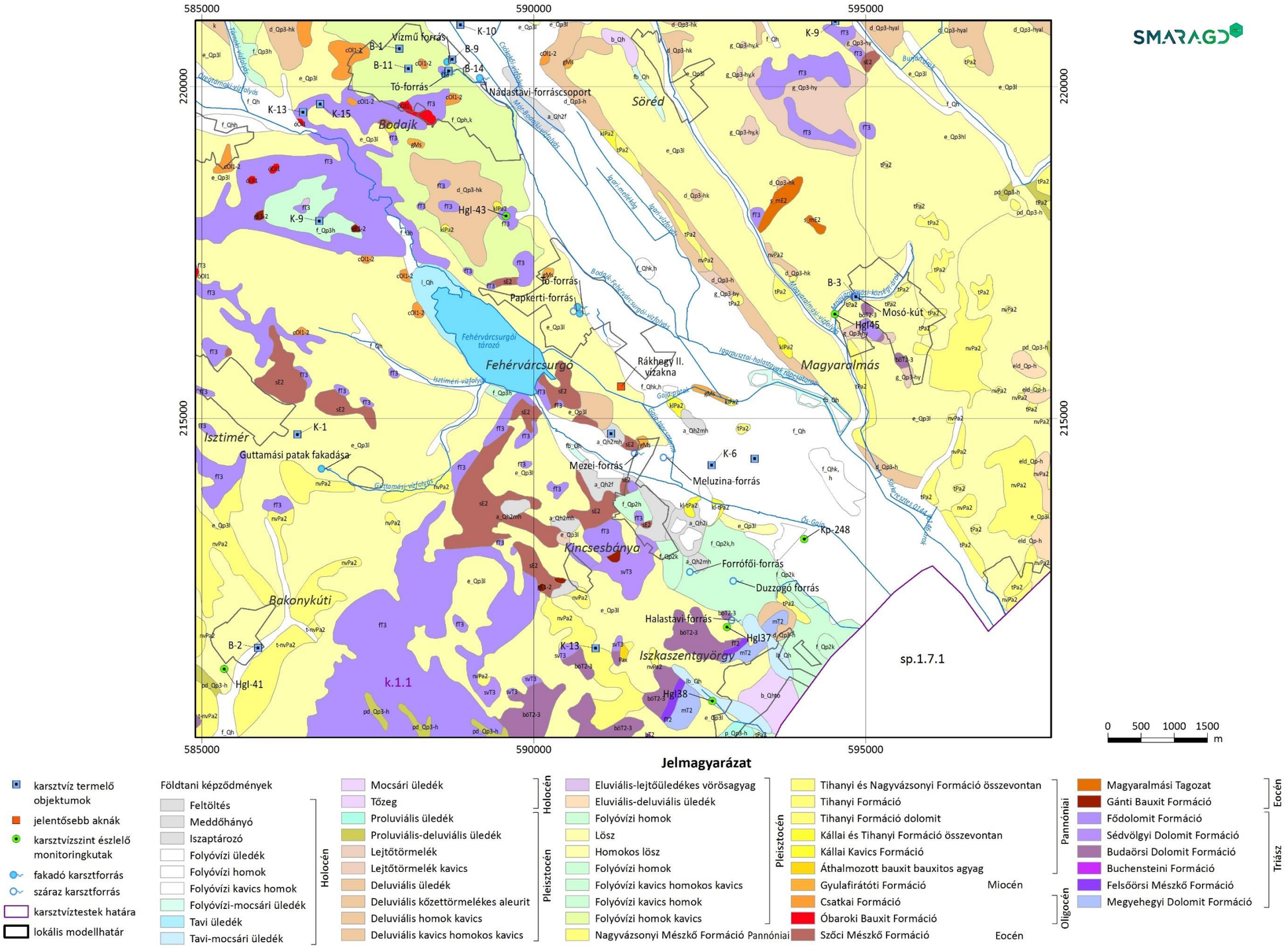
Az eocént követő infraoligocén denudáció eredményeként az eocén képződmények a teljes Dunántúli-középhegységi egység területén nagymértékben lepusztultak. Ekkor jött létre a nagy vastagságú folyóvízi törmelékes üledékösszlet (Csatkai Formáció), amely a modellterület nagy részén előfordul (Bodajk, Balinka térségében, Isztimértől ÉK-re, Fehérvárcsurgótól ÉK-re). Balinka térségében a Csernyei Formációra, a Padragi Márgára, sőt a Szépvölgyi Mészkőre is települve. Fehérvárcsurgótól ÉK-re közvetlenül a triász Fődolomit fedőjéből ismerjük.

Az oligocénben megkezdődött szárazföldi üledékképződés még a miocén elején is zajlott. A kárpáti korszakban a tengerszint emelkedésének eredményeként finomabb szemű törmelékes üledékképződés zajlott (Perbáli Formáció Fehérvárcsurgótól K-re). A kora-miocén közepén nagy területeken rakódott le a jelentős vastagságban a Gyulakeszi Riolittufa, amely Fehérvárcsurgó térségében nagy területeken fordul elő.

A bádeni korszak közepén tengeröblökben kialakult parti mocsarakban jött létre a Hidasi Kőszén, amelyet Fehérvárcsurgó környékén megtalálunk a Perbáli Formáció fedőjében, de a Padragi Márgára települve is. A késő-miocén elején jött létre a Kárpátokkal körbevett Pannon-tó. A késő-miocén során a Pannon-tó fokozatosan feltöltődött, kiédesedett. A késő-miocén elején lassan kiszáradó lagúnákban keletkezett az aleuritos, huminites Ősi Tarkaagyag, sekélytengeri környezetben a Csákvári Agyagmárga és a Csóri Aleurit (Fehérvárcsurgótól ÉK-re mindhárom megtalálható). A középhegység jelentős része továbbra is szárazulat volt, így a szárazulat partvonala mentén változatos üledékképződési környezetek alakultak ki. Így jött létre az elzárt lagúnákban a Nagyvázsonyi Mészkő (Bakonykúti-Gúttamási környékén nagy területeken), a hullámveréses parti zónában az abráziós kavics (Diási Kavics), és a partszegélyi homok (Kállai Kavics). Ezt a homokot bányásszák Fehérvárcsurgó, Kincsesbánya térségében. A késő-miocén során a folyók deltafrontján a homokos kifejlődésű Somlói Tagozat, a partmenti lagúnákban pedig az aleuritos Tihanyi Tagozat képződményei rakódtak le nagy területeken (a modellterület DK-i részén Csór-Moha-Sárkeresztes-Magyaralmás vonalban és attól DK-re).

A felszínt nagy területen borítják kvarter képződmények. Közülük a lösz, a kiemelt helyzetű területek peremeit szegélyezve különféle áthalmozott üledékek, valamint a Móri-árok vonalában a folyóvízi üledékek a legfontosabbak.

Fehérvárcsurgó szűkebb környezetében a triász Fődolomit felett a mélyedésekbe a Gánti Bauxit rakódott le. Felettük többnyire a középső-eocén Szőci Mészkő illetve annak Kincsesi Tagozata (pirites márga, mészmárga) következik, fedőjében a Padragi Márgával. A Szőci Mészkő Formáció a területen igen változatos kifejlődésű. Alsó részén pirites márgából áll, feljebb homokkő betelepüléseket tartalmaz (korábbi Magyaralmási Tagozat). Ahol a Fődolomit kiemeltebb helyzetben van, ott gyakran csak a Szőci Mészkő található a Fődolomit és/vagy a Gánti Bauxit fölött. Ilyen kiemelt helyzetű terület a Fehérvárcsurgótól DNy-ra húzódó vetőzóna, amelynek Ny-i oldalán a Szőci Mészkő és a Fődolomit is a felszínen van. Ugyanakkor a vető K-i oldalán a triász fedőjében megjelenik a szenes agyagos középső-eocén Dorogi Formáció is a Kincsesi Tagozat alatt. Az eocén képződmények vastagsága Rákhegy térségében eléri a 200 m-t. Az eocén rétegek K-ÉK felé, a Móri árok irányában, egyre mélyebbre zökkenve fokozatosan kivékonyodnak. A Padragi Márga ill. a Kincsesi Tagozat fölött jellemzően a Gyulafirátóti Riolittufa települt, de helyenként közbeékelődik a szenes, aleuritos Hidasi Barnakőszén Formáció. A Gyulafirátóti Riolittufa fölött kvarter képződményeket (lösz, folyóvízi üledék) találunk. A Rákhegytől K-re, a fedőösszletben a miocén rétegek válnak uralkodóvá. A késő-miocén (pannóniai) képződmények megtalálhatók a kiemelt helyzetben levő idősebb képződmények kibúvási területének peremén, valamint a medence területeken, negyedkori rétegekkel fedetten.



3. ábra: Fedett földtani térkép a lokális modell területén
(Magyarország fedett földtani térképe 1:100 000 Magyar Állami Földtani Intézet 2005 [14])

2.2.2 A kőzetek vízföldtani tulajdonságai

A numerikus modellezés során a különböző vízföldtani tulajdonságú képződmények leképezése/csoportosítása hidrosztratigráfiai egységeken keresztül történik. Erre azért van szükség, mert a rétegtani besorolás túl részletes a modellezés számára, valamint nem vízföldtani (litológiai/kronosztratigráfiai) szempontú osztályozást jelent. Míg a rétegtani besorolás a képződmény kora és kőzetanyaga szerint történik, addig a hidrosztratigráfiai beosztás az egyes földtani képződmények fizikai tulajdonsága (vízvezető képesség, porozitás és tározási potenciál) alapján történik.

A karsztos kőzetek vízvezető képességét részben a képződés kori sajátosságaik – tömör vagy üregekkel tagolt voltuk – részben a leülepedésük óta eltelt idő alatti, eredeti jellegeiket módosító, megerősítő vagy gyengítő geológiai történések határozzák meg. A karbonátos kőzetek esetében elsősorban a karsztosodási lehetőségek és a földtörténet folyamán végbement tektonikai események (pl. termál források oldó hatásai és kiválásai) lehetnek meghatározó jelentőségűek.

Az egykori képződési környezetnek megfelelően az elsősorban jellegzetesen tisztán karbonátos kőzetek között változó mennyiségű finomtörmelékes alkotórészt tartalmazó képződmény is található. Általános tapasztalat az, hogy minél nagyobb egy karbonátos formáció agyag és márga tartalma, annál rosszabb vízvezető tulajdonságú. Vízgazdálkodási szempontból a nem karbonátos képződmények nem fontosak, mégis foglalkozni kell velük, mert az áramlási irányokat és sebességet jelentősen befolyásolják.

A képződmények hidrosztratigráfiai besorolását a regionális modellezés során végeztük el, ebben változás nem történt (*Smaragd GSH 2020*) [2]. A lokális modellterületen azonban a porózus fedőképződmények részletesebb bontásra kerültek. A regionális modellterületen az átlagos szivárgási tényezővel jellemzett porózus pannon összletet a lokális numerikus modellben tovább bontottuk az agyag és homok tartalom alapján.

Alapvetően azonban továbbra is 4 fő képződménycsoportot különböztetünk meg a fehérvárcsurgói lokális modellezési területen.

Prealbai képződmények (főkarsztvíztároló):

A triász és jura, valamint alsó-kréta korú karbonátos kőzetek (mészkő és dolomit) alkotják a főkarsztvíztároló nagyvastagságú (100-3000 méter) összletét. Rossz vízvezető márgás képződmények is találhatók benne, de ezek lokális elterjedésűek.

Függőkarsztos rétegek hidrosztratigráfiai egység:

A kréta, illetve eocén korú mészkövek, ha közvetlenül települnek, a triász korú karbonátokra szintén a főkarsztot alkotják, ha a triász karbonátoktól márga és agyag rétegek különítik el, akkor a főkarszttól független, függőkarszt alakul ki. Regionális elterjedésűek. A Fehérvárcsurgó lokális modell területén Fehérvárcsurgó településtől délre, Kincsesbánya környékén találhatunk nagyobb kiterjedésben, jó vízvezető képességű eocén mészköveket (Szőci Mészkő), valamint rossz vízvezető agyagos-márgás képződményeket (Dorogi Formáció).

Alsó-pannon – Miocén – Oligocén porózus képződmények hidrosztratigráfiai egysége:

A főkarsztvíztároló fedőjének nagyvastagságú és elterjedésű képződményei tartoznak ebbe a csoportba. A modellterületen ezek különböző hidraulikai tulajdonságú formációkként jelennek meg. A jellemzően finomszemcsés Gyulafirátóti Formáció, Fehérvárcsurgó település környezetében található meg nagyobb elterjedésben. Vízadó képességét tekintve rossz

vízvezetőnek tekinthető. Ettől a területtől keletre – ugyan valamivel kisebb elterjedésben – már a durvább szemcsés homokos-kavicsos Csatkai Formáció jelenik meg, amelynek vízadó képessége jóval nagyobb.

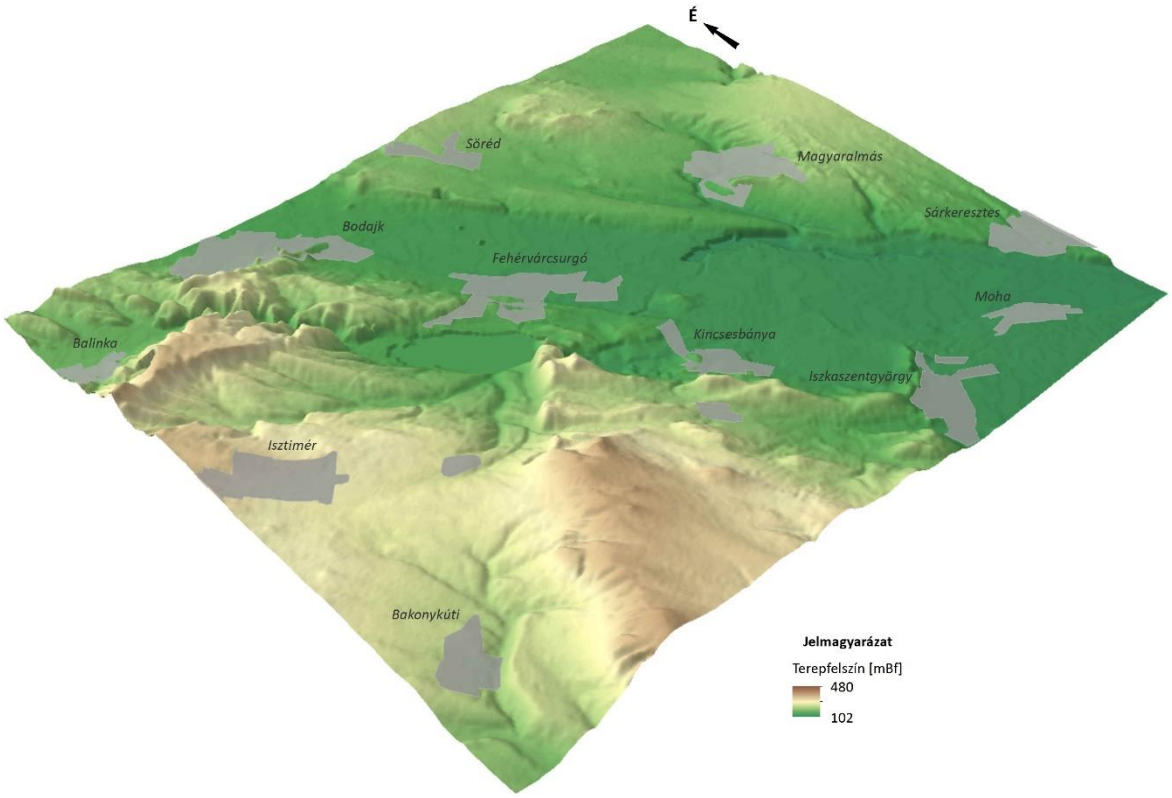
Kvarter – Felső-pannon porózus képződmények hidrosztratigráfiai egysége:

A főkarsztvíztároló fedőjének képződményei tartoznak ide. A fehérvárcsurgói modellterületen a fiatalabb üledékek rendkívül változatos formában jelennek meg akár egymástól kis távolságban. Közülük jó vízadónak tekinthető a Kállai Kavics és a Somlói Formáció, míg a vízrekesztő képződményeket elsősorban a Tihanyi Formáció képviseli. Megjelenik továbbá a területen az édesívízi kifejlődésű, jó vízadó tulajdonságokkal bíró Nagyvázsonyi Mészkő.

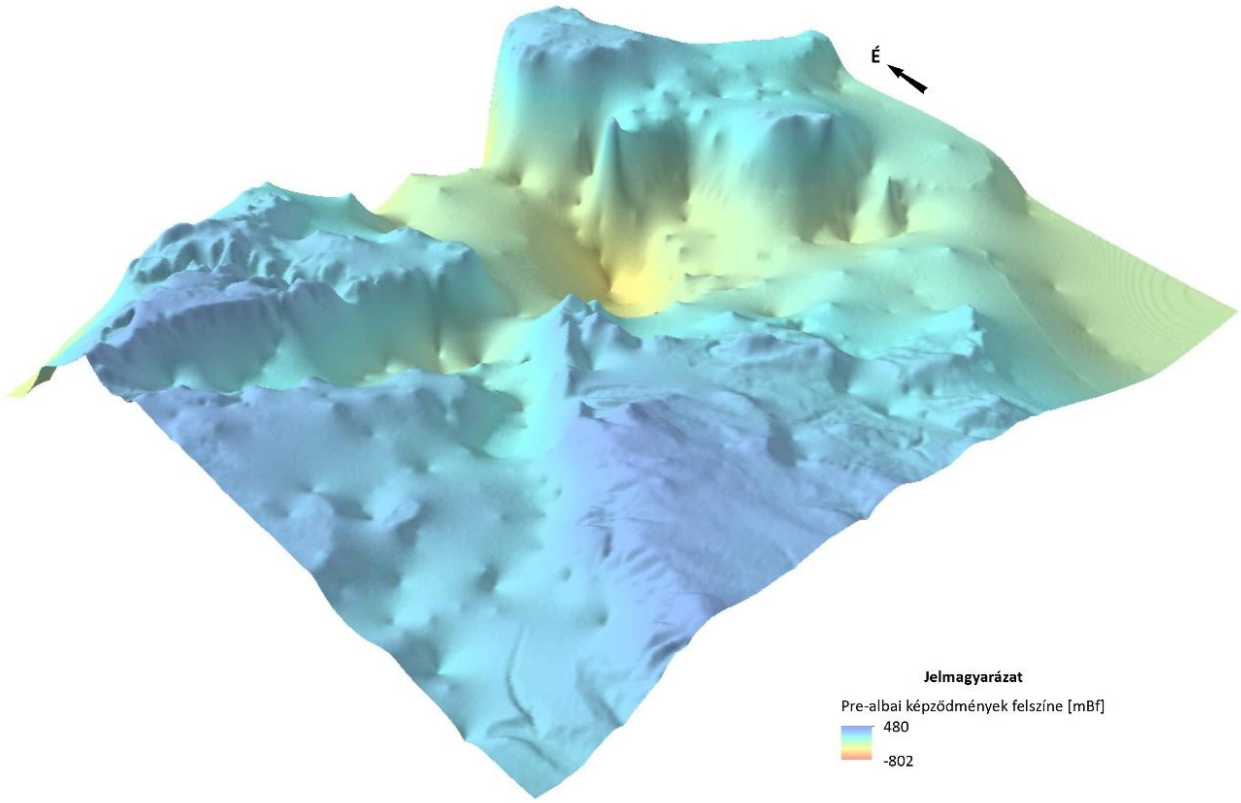
A lokális modellterületeken szükségessé vált ezen hidrosztratigráfiai egységek elterjedésének és vastagsági viszonyainak pontosítása, valamint a porózus fedőképződmények elterjedésének és kőzetminőségének sokkal részletesebb kidolgozása is. Ez a munkafolyamat a lokális modellterületeken található összes olyan, az MBFSz adatbázisában megtalálható fúrás figyelembevételével történt, amelynek a felszíntől a prealbai szintjéig a teljes rétegsora ismert volt.

A hidrosztratigráfiai rétegek alapján készültek a modellrétegek, amelyeket részletesen ***3.1. fejezetben*** mutatunk be.

A lokális modellterület felszínének domborzatát és a prealbai képződmények szerkesztett felszínét a ***4***. ábra-***5. ábraák*** mutatják be.



4. ábra: Fehérvárcsurgó lokális modellterület domborzatának 3D ábrája



5. ábra: Fehérvárcsurgó lokális modellterület szerkesztett prealbai felszínének 3D ábrája

2.2.3 Természetes és mesterséges megcsapolódások

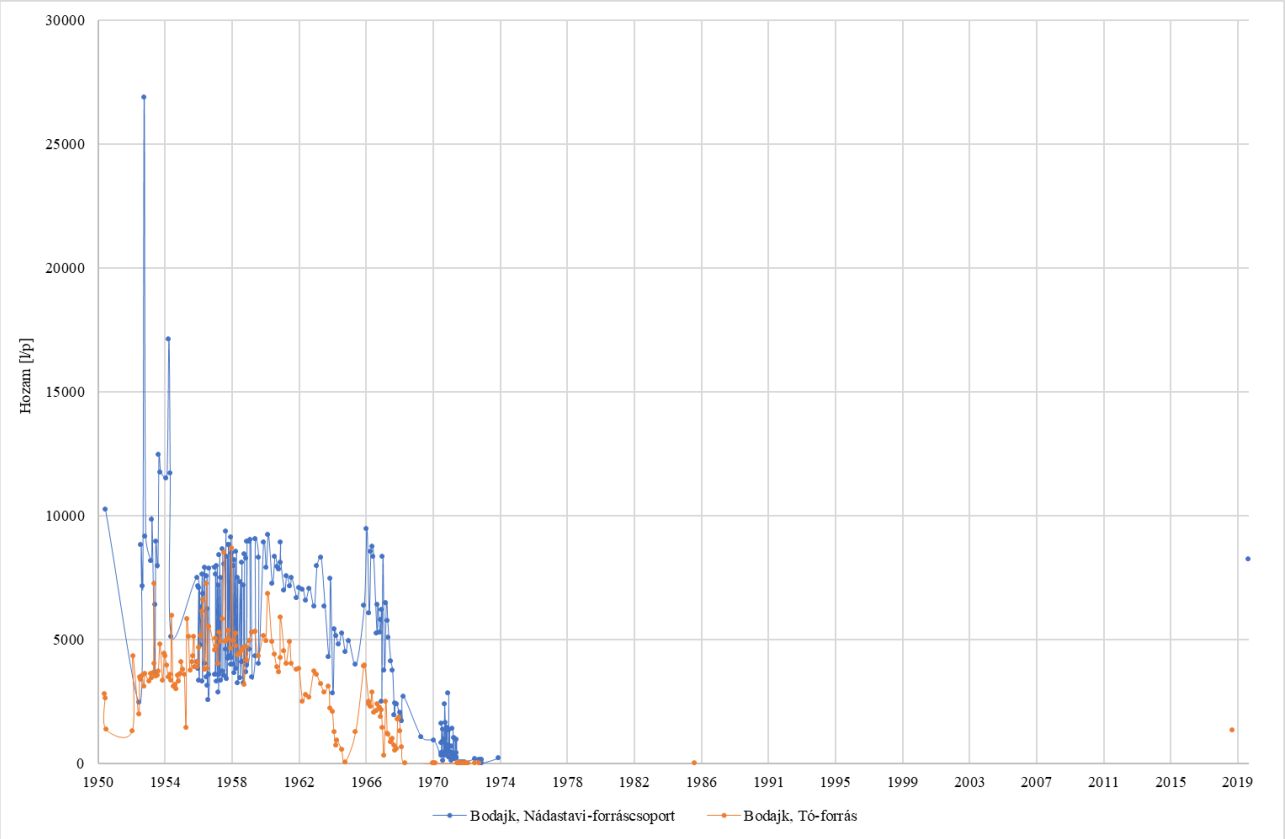
Fehérvárcsurgó lokális modell területileg a bodajki és csóri modellek között, azokkal viszonylag nagy átfedésben helyezkedik el. Ennek köszönhetően több olyan forrás is található a modellterületen, amely a másik két modellterülethez is tartozik. Ilyenek például az Iszkaszentgyörgy és Kincsesbánya között található források (pl.: Duzzogó-forrás), vagy a Bodajk lokális modellterület központi részén fakadó Tó-forrás és Nádastavi-forráscsoport.

A Tó-forrás a Bodajki-tavat táplálja. A forrás több ponton fakad, még a tóból a vizet elvezető patak partján is jelennek meg források. Az adatok szerint 1968-ban apadt el, korábban hozama 1000-9000 l/p között változott, a legnagyobb értékeket 1958-ban mérték (***6. ábra***). A forrás 2019-ben mért hozama 1333 l/p volt.

A Nádastavi-forráscsoport Bodajkon a Széchenyi István utcában a Móri víz és a Fehérvárcsurgói vízfolyás által határolt területen helyezkedik el. 10-15 éve még száraz terület volt, 2-3 éve több helyen jelentek meg források. Nádas, bozótos terület. A forráscsoportról vízhozam adat 1950-től 1974-ig van, 1950-ben még több, mint 10 000 l/p hozammal rendelkezett, 1975-ben elapadt (***6. ábra***). Jelenlegi hozama 8260 l/p.

Iszkaszentgyörgy jelentős forrása volt a *Duzzogó-forrás*, mely 1957-ben elapadt. A forrásra aknakút épült, vízszintje jelenleg több, mint 8 méterrel a terepszint alatt van.

Fehérvárcsurgó térségében is találhatók források. Fehérvárcsurgó egy ilyen jelentős fakadása a *Tó-forrás*, hozama 2019-ben 285 l/p volt, mindössze egyetlen archív hozamadattal rendelkezünk, amit 1950-ben mértek, akkor a hozam 600 l/p volt, 1957-ben elapadt.



6. ábra: A bodajki Tó-forrás és Nádastavi-forráscsoport hozam idősora (1950-2019)

Az alábbi táblázatban (***2. táblázat***) összefoglalóan feltüntettük a karsztforrások kiindulási, mért legkisebb (általában elapadás), illetve utoljára mért hozamadatait. A táblázatban azok a források is szerepelnek, melyekről hosszútávú idősorral nem rendelkezünk, de elapadásukról van információnk.

2. táblázat: A fehérvárcsurgói modellterület fontosabb karsztforrásainak kiindulási, mért minimum és jelenlegi hozamadatai

Település	Forrás	VITUKI forráskataszter szerinti vízhozam		Legkisebb hozam		2019 kataszterezés során mért hozam	
		Év	Hozam (l/p)	Év	Hozam (l/p)	Év	Hozam (l/p)
Bodajk	Nádastavi-forráscsoport	1950	10250	1975	0	2020	8260
	Tó-forrás	1950	2790	1968	0	2019	1333
Fehérvárcsurgó	Tó-forrás	1950	600	1957	0	2019	285
	Haja-kút	1946	144	1957		2019	1.22
	Papkerti-forrás	1953	41	1957		2019	0
Iszkaszentgyörgy	Duzzogó-forrás	1950	1400	1957	0	2019	0
	Forrófői-forrás	1950	600	1957	0	2019	0
	Halastavi-forrás	1953	50	1957	0	2019	0
Kincsesbánya	Meluzina forrás	1953	107	1957	0	2019	száraz
	Mezei-forrás	1953	200	1957	0	2019	száraz

A területen található nagyobb állóvíz a Fehérvárcsurgói-víztározó, amely a Gaja-patak vizét duzzasztja fel, és nincs felszín alóli utánpótlása. Karsztvíz utánpótlású viszont a kincsesbányai homokbánya területén kialakult mesterséges tó. Itt a karsztvíz a homokbánya működése során, a fedő kőzet eltávolítása miatt került a felszínre.

A lokális modellterületen a karsztvízszinteket és az áramlási viszonyokat legnagyobb mértékben a kincsesbányai Rákhegy II. karsztaknából kivett vízmennyiség alakította és alakítja a közeljövőben is.

Az iszkaszentgyörgyi (Kincses, József, Rákhegy, Bitó bauxittelepek) bauxitbányászat vízmentesítéséhez a középhegység legmélyebb depresszióját hozták létre az itt kialakított -130 mBf szintű csapoló-vágattal.

A területen a bauxit bányászat miatti passzív víztelenítés már 1948-ban elindult, a preventív víztelenítés 1959-ben indult a dolomitban kihajtott csapoló vágatokon keresztül. Az 1960-as évek végétől már az ivóvíz ellátási igényeket is figyelembe vevő karsztvízszint csökkentés és vízemelés folyt az akkor megépült Rákhegy II. vízaknán és vízcsapoló vágatain keresztül. Ez a víztelenítő rendszer az üzemelő bányatérségtől függetlenül épült ki, a fejtésekkel, főfeltáró bányatérségekkel nem volt összeköttetésben (*Erdős 2000*) [7][7].

Az 1980-as évek közepén az akkor megnyitott Bitó II. bánya víztelenítésére a Rákhegy II vízaknai rendszeren keresztül került sor. Ezért a korábban a bányatérségektől függetlenül kialakított Rákhegy II. vízaknai létesítményekre a bauxitbánya rályukasztott, megteremtve ezzel a bitói bányavizek Rákhegy II. aknai létesítményekbe juttatásának felszín alatti útját. Ez az átalakítás a későbbi vízfelengedés során megjelenő kedvezőtlen vízminőség változások egyik fő oka lett.

A vízkivételek hatására számos forrás hozama csökkent és több forrás elapadt.

3. táblázat: Az iszkaszentgyörgyi vízkivétel hatására elapadt források

Település	Forrás megnevezése	Elapadás éve
Bodajk	Nádastavi-források	1975
	Tó-forrás	1968
Fehérvárcsurgó	Haja-kút	1957
	Papkerti-forrás	1957
	Tó-forrás (Fürdő-forrás)	1957
Kincsesbánya	Meluzina-fürdő-forrás	1957
	Mezei (Kerektó)-forrás	1957
Iszkaszentgyörgy	Duzzogó-forrás	1957
	Forrófői-forrás	1957
	Halastavi-forrás	1957
	Homokbányai-forrás	1957

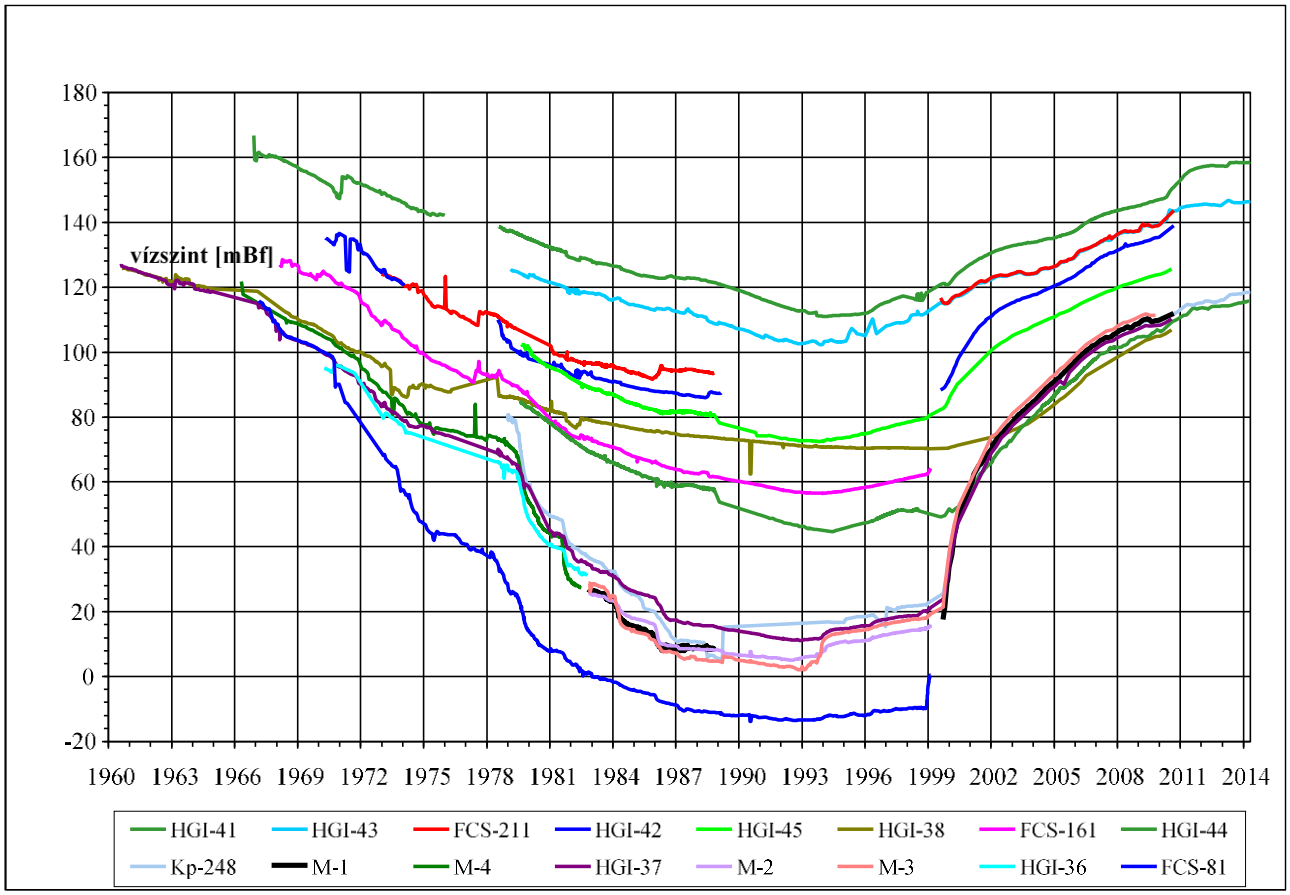
Az 1980-as évekre megnövekedett vízigények miatt szükségessé vált a szintén Kincsesbánya térségi bauxitbányászat miatt kitermelt szennyezett bányavíz hasznosítása is ipari vízellátási célból, melynek kiváltására a sorozatos vízminőségi problémák következtében a fehérvárcsurgói víztározóra telepített felszíni vízkivételi és víztisztítómű épült. Így sikerült a Rákhegy II vízaknán kitermelt jó minőségű karsztvízzel takarékoskodni, ivóvíz ellátási célra használni.

Az 1990-es évek elejére az ipari termelés visszaesése, megszűnése és a lakossági fogyasztás nagymértékű csökkenése miatt jelentős mennyiségű szabad vízkészlete maradt a Rákhegy II vízaknai vízbázisnak. Ez a kényszerűen kiemelt, igényeken felüli vízmennyiség hasznosítatlanul elfolyt a felszíni befogadó Gaja-patakba. A Velencei-tó egyszeri vízpótlását (1993-1995) szintén a Rákhegyi Regionális Vízmű végezte.

Ez a kedvezőtlen vízgazdálkodási helyzet és a pazarló üzemmód eredményezte, hogy 1993-ban eldöntötték a Rákhegy II. vízakna felengedését a korábban évtizedekig szabályozott, -130 mBf szintről. Az engedély szerint az akkor még működő Bitó II. bánya vízvédelme érdekében a -40 mBf szintet egészen 1998. december végéig tartotta a DRV Rt.

1998-ban a korábban évtizedekig szabályozott, -130 mBf szinten tartott karsztvízszintet elengedték, csak az ivóvíz ellátási igényeknek megfelelő mennyiségű, lényegesen kevesebb vizet emeltek ki. Az 1998.12.02.-án végrehajtott rákhegyi vízfelengedés által okozott vízszintemelkedés szinte pillanatszerű volt: 3-4 hét leforgása alatt a kezdeti -130 mBf szintről -40 – -42 m-re emelkedett a vízszint (*Erdős 2000*) [7].

Az engedély szerint az akkor még működő Bitó II. bánya vízvédelme érdekében -40 mBf szinten 1998. december végén a DRV Rt.-nek meg kellett állítania a felengedést. 1999. október 1.-ig a bauxitbányászat érdekében ezt a szintet tartották, majd a bitói vízfelengedés elindításával ismét emelkedni kezdett a vízszint. A karsztvízszint a 33 mBf szintet 2000. március végén érte el. A későbbiekben további felengedés történt. A ***7. ábra*** a kincsesbányai depresszió feltöltődését mutatja be a DRV Zrt. és a vízügyi igazgatóságok törzshálózati monitoring kútjaiban mért adatok alapján.

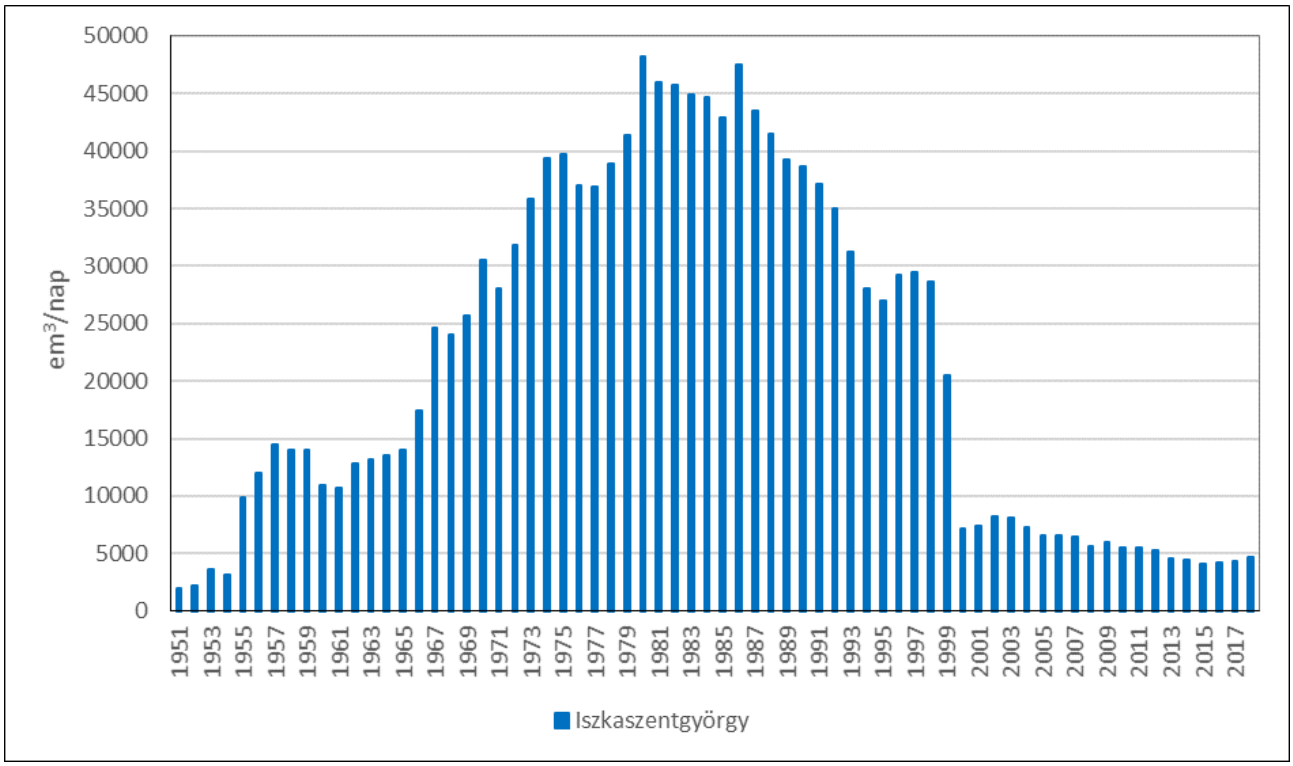


7. ábra: A karsztvíz visszatöltődésének folyamata a kincsesbányai depresszió területén az észlelőkutakban mért vízszintek alapján (Adatforrás: DRV Zrt.)

Kincsesbányán, a bitói bánya felhagyásával 1999-ben fejeződött be a bányászati célból történő vízkivétel. Ettől kezdve a vízkivétel kizárólag az ivóvízellátás célját szolgálja.

Az Iszkaszentgyörgyön kiemelt összes karsztvíz mennyiségét a ***8. ábra*** mutatja be.

Meg kell említeni, hogy a jelenlegi termelés által létrehozott depresszió következtében a Kincsesbányához közeli források (Meluzina-fürdő-forrás, Mezei (Kerektó)-forrás, Duzzogó-forrás, Forrófői-forrás, Halastavi-forrás, Homokbányai-forrás) a projekt során 2019-ben elvégzett forráskataszterezés szerint továbbra sem működnek.



8. ábra: Iszkaszentgyörgy-Kincsesbánya bányászati vízkivételi adatai MBFSZ adatok alapján

Az áramlási irányok, utánpótlási területek szempontjából érdemes megemlíteni, hogy a Rákhegy II aknából ivóvízminőségű, 13,5 ºC-os, a Bitó II. terület vágataiból 30 ºC hőmérsékletű vizet termeltek.

A depressziós tölcsér alakjának meghatározásában lényeges szerepe volt a Litéri-vonalra merőleges tektonikai vonalaknak is, elsősorban a Móri-árok déli részét határoló töréseknek. A tektonikai árok délnyugati határát képező ÉNy-DK-i vető különösen jelentős, hiszen ez választja el a hideg vizes rákhegyi területet a bitói előfordulástól, ahol a telepek felső és középső részén 26-30 ºC-os, alsó részén 32-38 ºC vizet nyertek. Az elapadt Duzzogó-forrás vize is meleg volt, vizét fürdőként használták. A depresszió keleti határát a Móri-árok ÉK-i része határozta meg (*Jocháné E. et al 1995*) [8]. A kincsesbányai depresszió nem kapcsolódott össze a tatabányaival.

A Sárrét és Székesfehérvár felé kivastagodó felső-pannon összlet a térségben közvetlen a karszttal érintkezik, így a vízátadás közvetlen. A karsztvízszint emelkedésével a fedő víztartó képződmények felé (rétegkarszt, rétegvizek, talajvíz) a karszt felől egyre növekvő volumenű vízátadás következett be, így ezek nyomásszintjei is emelkedtek. Amikor a kincsesbányai aknában a karsztvízszint 80 mBf szint fölé emelkedett, a leürült felső-pannon víztartó homokrétegekbe megkezdődött a vízáramlás a karsztvíztároló felől. A térségben 2008-ban erre a vízkészletre már eredménnyel lehetett ivóvíz kutat tervezni (*Nád B. 2012*) [10][10].

3. A LOKÁLIS NUMERIKUS MODELLEZÉS BEMUTATÁSA

3.1 A numerikus modell geometriai felépítése, numerikus rétegek

A vízadó rétegek geometriájának meghatározása, vagyis az egyes képződmények horizontális és vertikális elterjedésének minél pontosabb lehatárolása a numerikus modell számára elsődleges fontosságú feladat. A numerikus modellezés során a különböző vízföldtani tulajdonságú képződmények leképezése/csoportosítása hidrosztratigráfiai egységeken keresztül történik. A Fehérvárcsurgó lokális modellben, az adott területre jellemző képződményeket vettük alapul. A numerikus modell vezérszintjeit alkotó hidrosztratigráfiai egységek – a regionális modellhez hasonlóan - a következők:

- Főkarszt (prealbai képződmények)
- Függőkarsztos rétegcsoport –vízrekesztő képződmények
- Függőkarsztos rétegcsoport – mészkő
- Alsó-pannon – miocén – oligocén képződmények
- Kvarter és felső-pannon képződmények

A lokális modellterületeken szükségessé vált ezen hidrosztratigráfiai egységek elterjedésének és vastagsági viszonyainak pontosítása, valamint a porózus fedőképződmények (alsó- és felső-pannon) elterjedésének és kőzetminőségének sokkal részletesebb kidolgozása is. Ez a munkafolyamat a lokális modellterületeken található összes olyan fúrás (253 db) figyelembevételével történt, amelyből a teljes rétegsor rendelkezésünkre állt, azaz elérte a prealbai képződményeket. Ez alapján el tudtuk különíteni a jobb és rosszabb vízvezető fedőképződménnyel fedett területeket. A függőkarsztos rétegcsoporton belül pontosabban le tudtuk határolni azokat a területeket, ahol az eocén/kréta márgák fordulnak elő, illetve azokat a területeket, ahol eocén/kréta karbonátos képződmények találhatóak. A fúrások alapján az egyes képződménycsoportok megjelenési mélységét is pontosítani tudtuk, mely alapján az azokat elválasztó vezérszintek (felszínek) is korrigálásra kerültek a regionális modellhez képest.

A fentiekben bemutatott öt hidrosztratigráfiai egység a valóságban sem horizontálisan, sem vertikálisan nem található meg mindenhol a modellezési területen. A földtani, szerkezeti felépítésből adódóan a kép nagyon változatos. Az 1-4 rétegek a kvarter és a prealbai szint közötti képződményeket foglalják magukba. Mivel a numerikus modellben réteget kiékelni nem lehet, ezért azokban a fúrásokban, ahol egy (vagy több) hidrosztratigráfiai egység hiányzik, a rétegvastagságot 1 méternek vettük, a felszíneket ez alapján szerkesztettük. Azokon a területeken, ahol például a főkarsztot, oligocén Csatkai Formáció fedi (azaz üledékhiányos a rétegsor, mert nem találhatóak meg az oligocénnál idősebb, de prealbainál fiatalabb képződmények), az 1-4. rétegeket 1 m-es vastagsággal és a Csatkai Formációra jellemző hidraulikus tulajdonsággal láttuk el. A numerikus modellben a különböző földtani sajátosságok figyelembevételét és a felszínek/rétegek kialakítását ***3. táblázat*** foglalja össze.

A hidrosztratigráfiai egységek felszínéből szerkesztett numerikus rétegeken kívül, a főkarsztot még további három rétegre (5-8. rétegek) osztottuk, amelyet a főkarszt horizontálisan különböző, mélység felé csökkenő vízvezetőképessége, illetve a túl vastag modell elemek elkerülése indokolt. A modell mélysége alapján a prealbai felszín és a -1500 mBf közötti térrészt kellett háromfelé osztani. A főkarszt felső tíz métertől pár száz méterig terjedő övezetében szabad felszínű karsztvízszint alakul ki, melynek vízszintjét a meteorológiai és a hidrológiai tényezők befolyásolják, ennek reprezentálására az 5. réteget 100 m-es vastagsággal vettük figyelembe. A 6. réteg 250 m vastag. A 7-8. rétegek vastagságát úgy határoztuk meg, hogy a 7. felszín (6. réteg talpa) és a -1500 mBf modelltalp felülete között fennmaradó vastagságot osztottuk ketté, melyek így területenként eltérő vastagságúak a prealbai szint mélységének függvényében.

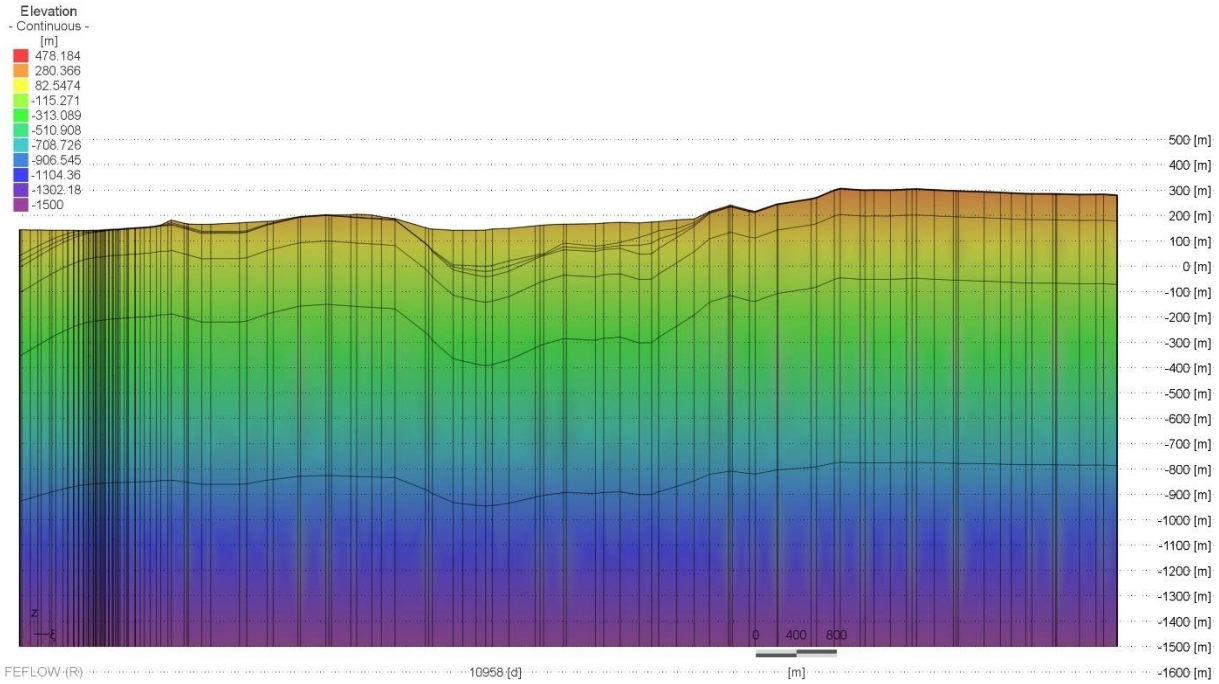
A fúrásokból kinyert információ alapján az egyes rétegek felszínét az ArcGIS Desktop 10.5.1 térinformatikai szoftvercsaládd szerkesztettük. A numerikus modellben a terepszint képezi a felső felületet. A modellben felszíni domborzat az OVF 10 méteres digitális domborzat modellje alapján készült. A szerkesztett felületek reguláris grid állományát (10x10 m) a FEFLOW numerikus modellbe bemenő adatként importáltuk, majd az Inverse Distance interpolációs módszerrel rendeltük a rácsháló csomópontjaihoz.

A kialakított lokális modellben tehát összesen 8 réteget és ebből következően 9 felszínt határoztunk meg. A rétegek vastagságát a modellterületen húzott É-D-i (***9. ábra***) és Ny-K-i szelvényen (***10. ábra***) mutatjuk be. A 8 réteg felülről lefelé a következő:

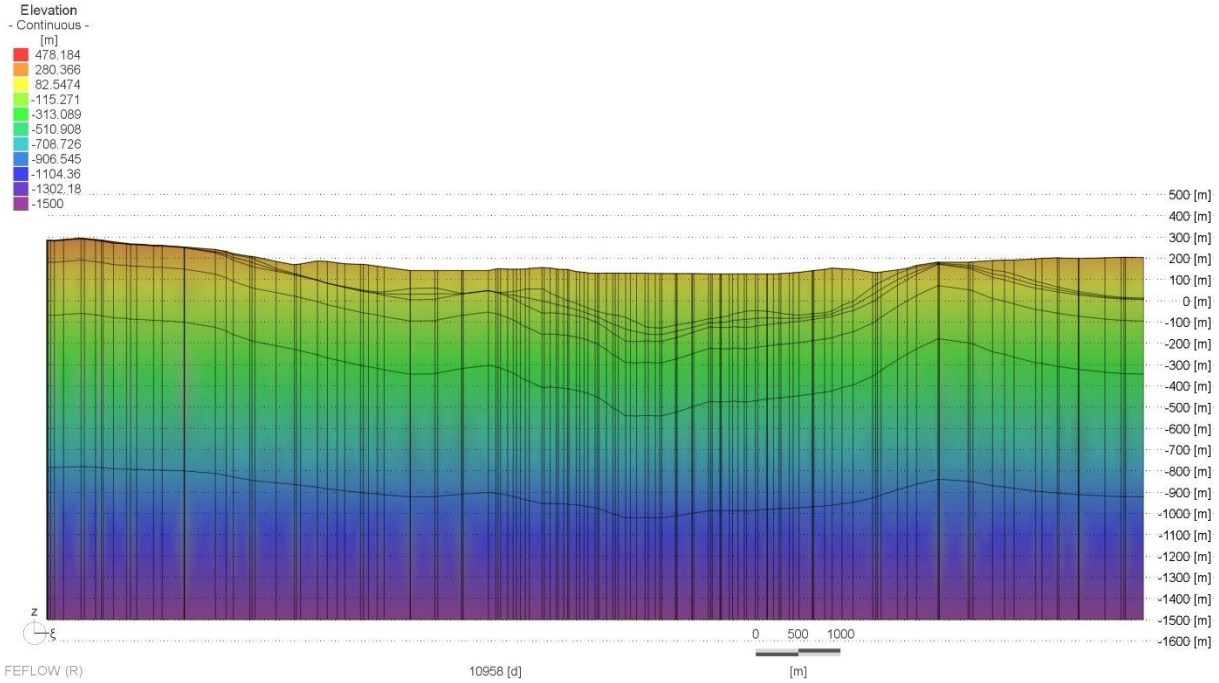
- 1. réteg: Kvarter és felső-pannon képződmények
- 2. réteg: Alsó-pannon – miocén – oligocén képződmények
- 3. réteg: Függőkarsztos rétegcsoport – mészkő
- 4. réteg: Függőkarsztos rétegcsoport – vízrekesztő képződmények
- 5. réteg: Főkarszt felső 100 m-es vastagságú része
- 6. réteg: Főkarszt 250 m vastagságú része
- 7. réteg: Főkarszt változó vastagságú része
- 8. réteg: Főkarszt változó vastagságú része

4. táblázat: A numerikus modellfelszínek szerkesztéséhez felhasznált elvi rétegbeosztás a feldolgozott fúrások alapján a különböző földtani helyzetek esetén

Felszín	**Prealbai a felszínen**	**Függőkarszt a felszínen**	**Alsó-pannon – miocén – oligocén a felszínen**		**Kvarter – felső-pannon a felszínen**			
1. felszín	domborzat							
1. réteg	prealbai	függőkarsztos képződmények	alsó-pannon – miocén – oligocén képződmények		kvarter és felső-pannon képződmények			
2. felszín	domborzat - 1m	domborzat - 1m	domborzat - 1m	domborzat - 1m	alsó-pannon teteje	alsó-pannon teteje	domborzat - 1m	prealbai felszín + 3m
2. réteg	prealbai	függőkarsztos képződmények	alsó-pannon – miocén – oligocén képződmények	alsó-pannon – miocén – oligocén képződmények	alsó-pannon – miocén – oligocén képződmények		kvarter és felső-pannon képződmények	
3. felszín	domborzat - 2m	domborzat - 2m	függőkarszt tető	prealbai felszín + 2m	függőkarszt tető	prealbai felszín + 2m	függőkarszt tető	prealbai felszín + 2m
3. réteg	prealbai	függőkarsztos képződmények	függőkarsztos képződmények	alsó-pannon – miocén – oligocén képződmények	függőkarsztos képződmények	alsó-pannon – miocén – oligocén képződmények	függőkarsztos képződmények	kvarter és felső-pannon képződmények
4. felszín	domborzat - 3m	függőkarszt segédréteg	függőkarszt segédréteg	prealbai felszín + 1m	függőkarszt segédréteg	prealbai felszín + 1m	függőkarszt segédréteg	prealbai felszín + 1m
4. réteg	prealbai	függőkarsztos képződmények	függőkarsztos képződmények	alsó-pannon – miocén – oligocén képződmények	függőkarsztos képződmények	alsó-pannon – miocén – oligocén képződmények	függőkarsztos képződmények	kvarter és felső-pannon képződmények
5. felszín	domborzat - 4m	prealbai felszín						
5. réteg	prealbai							
6. felszín	prealbai felszín - 100m							
6. réteg	prealbai							
7. felszín	prealbai felszín - 250m							
7. réteg	prealbai							
8. felszín	a 7. felszín és a modelltalp közötti vastagság fele							
8. réteg	prealbai							
9. felszín	-1500m							

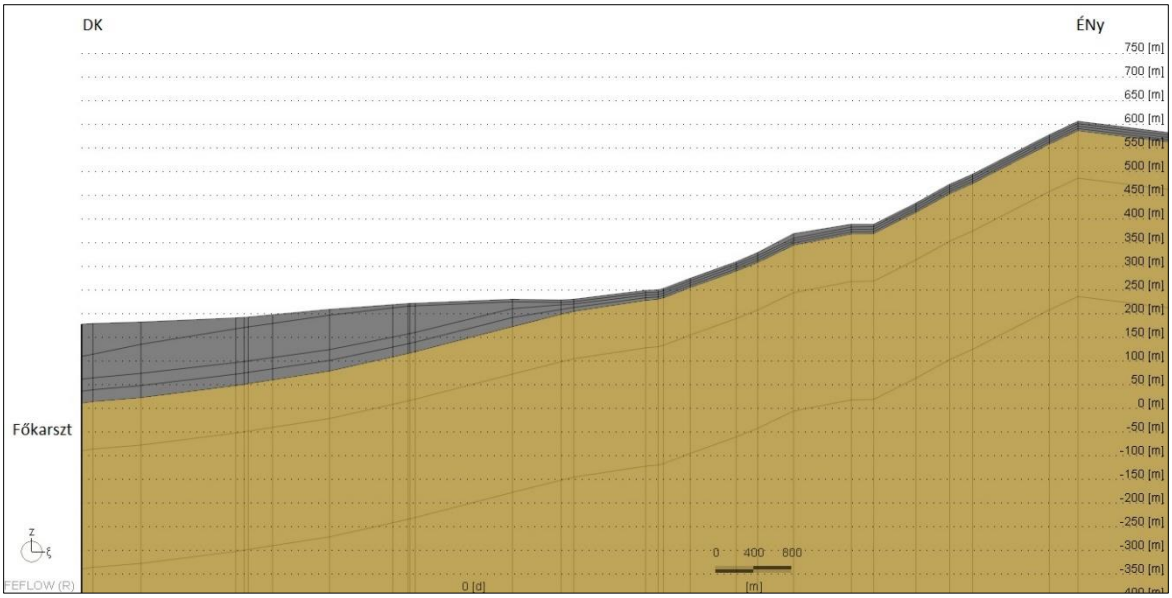


9. ábra: A fehérvárcsurgói numerikus modellterület É-D-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás) [mBf]



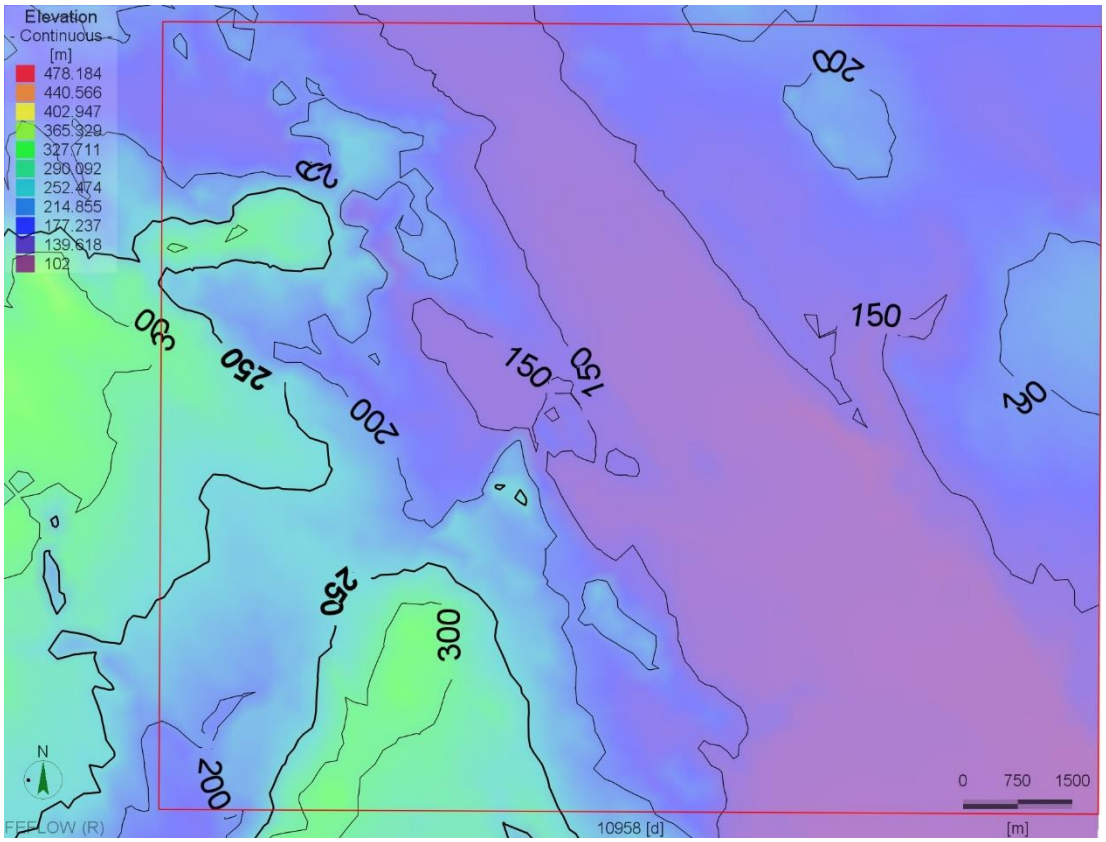
10. ábra: A fehérvárcsurgói numerikus modellterület Ny-K-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás)

A ***11. ábra*** szemlélteti azt, hogy a modell geometriájának kialakítása során, miként vettük figyelembe azokat a területeket, ahol a valóságban főkarszt a felszínen van. Ezeken a helyeken – hasonlóan a regionális modellhez - az adott rétegben a geometriai megoldáson túl, paraméterváltást alkalmazunk a főkarsztvíztároló leképezésére (***3.3.1. fejezetre***).

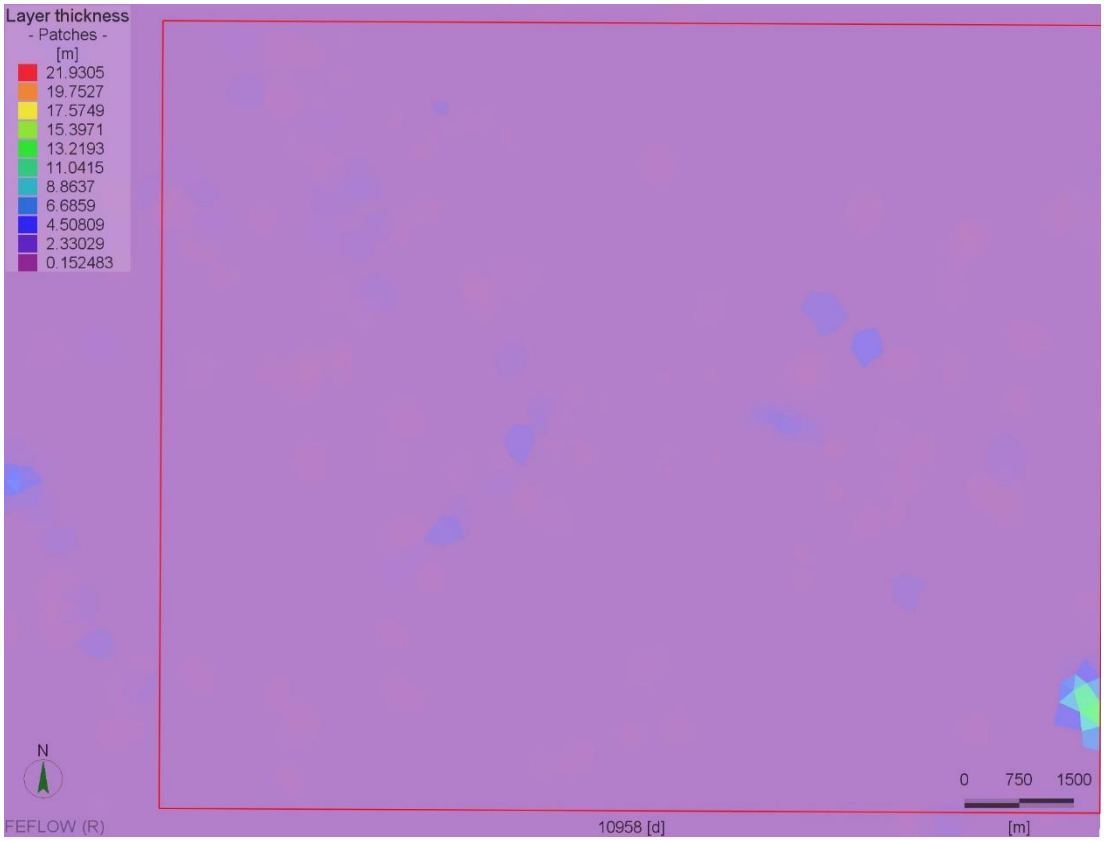


11. ábra: Példa a főkarszt kibúvás geometriai leképezésére egy numerikus modellben (5x túlmagasítás) (forrás: *Smaragd GSH 2020 [3]*)

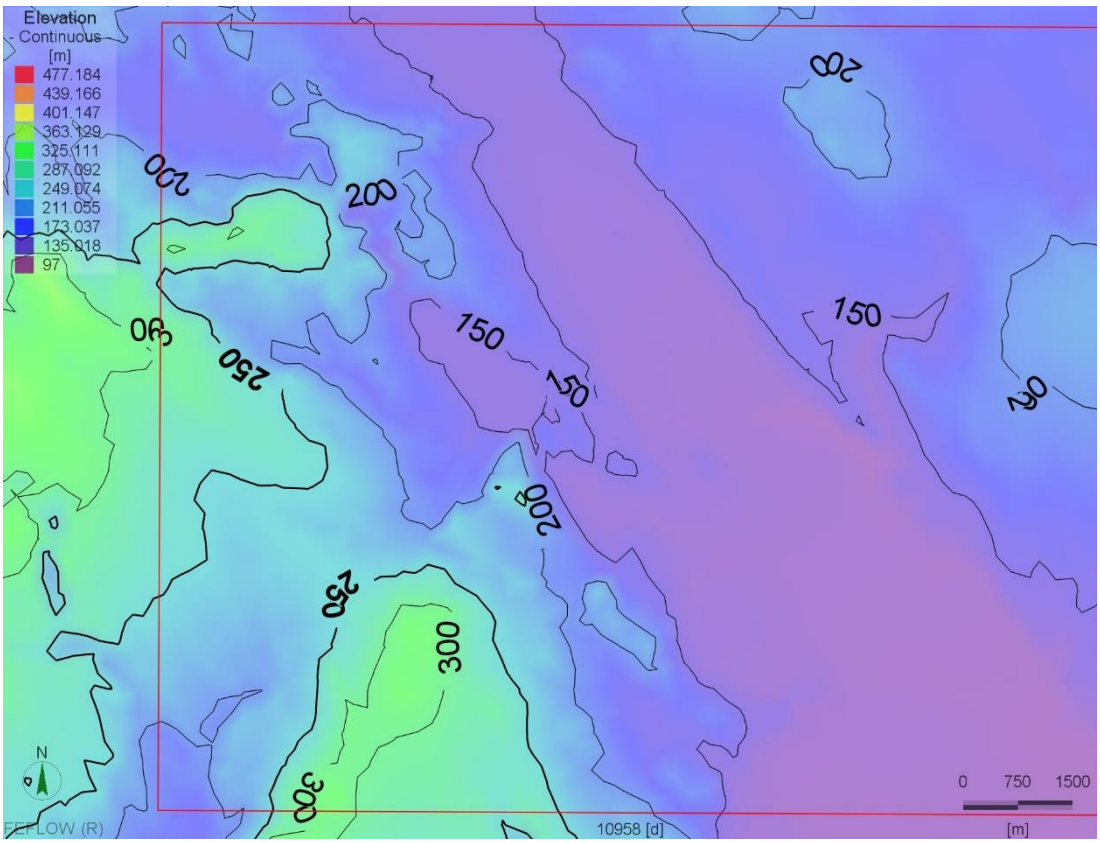
A ***12-18. ábra***sorozat mutatja be a numerikus rétegek egyes felszíneit Fehérvárcsurgó lokális modell területén.



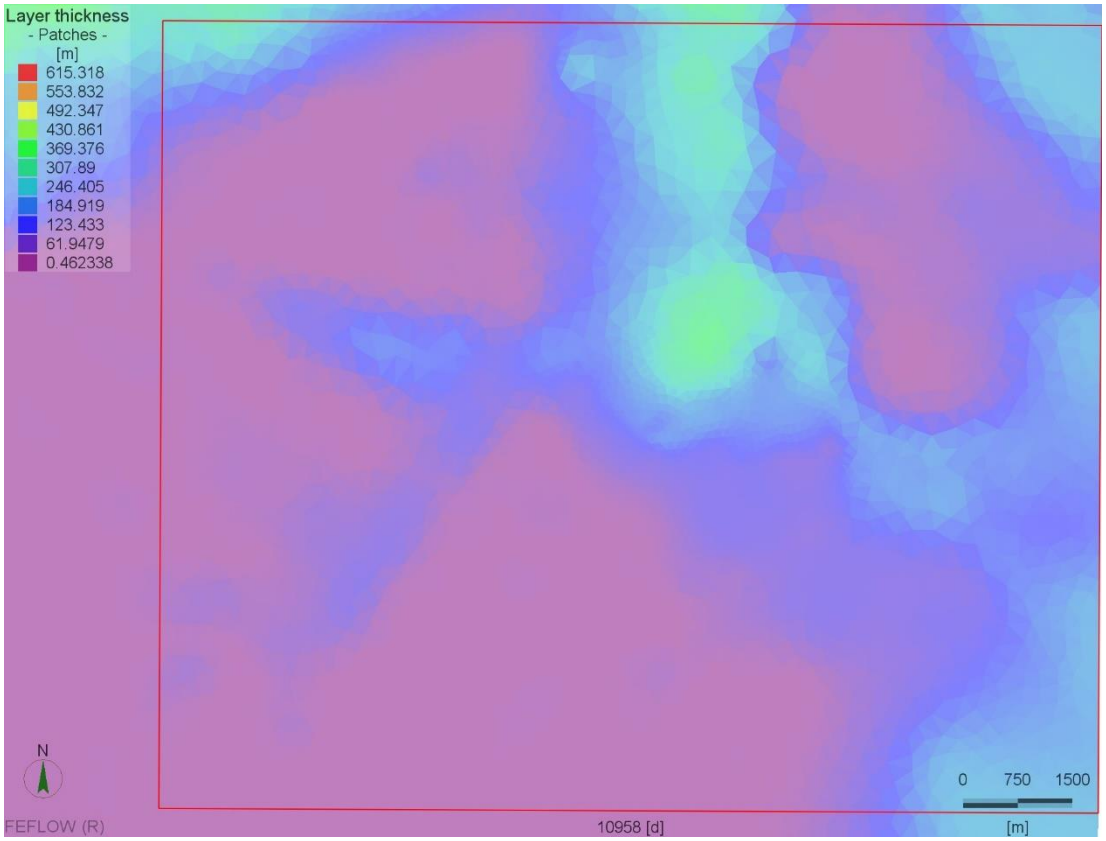
12. ábra: Az 1. numerikus modellfelszín [mBf]



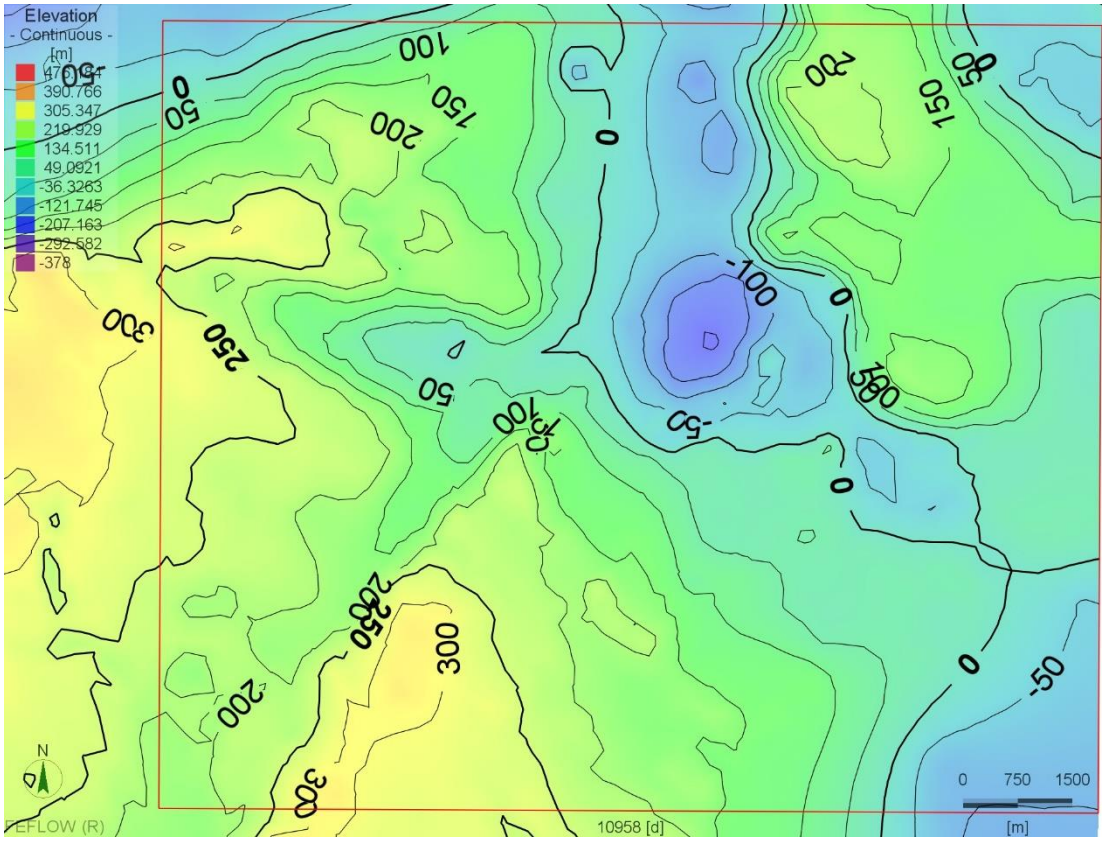
13. ábra: Az 1. numerikus modellréteg vastagsága



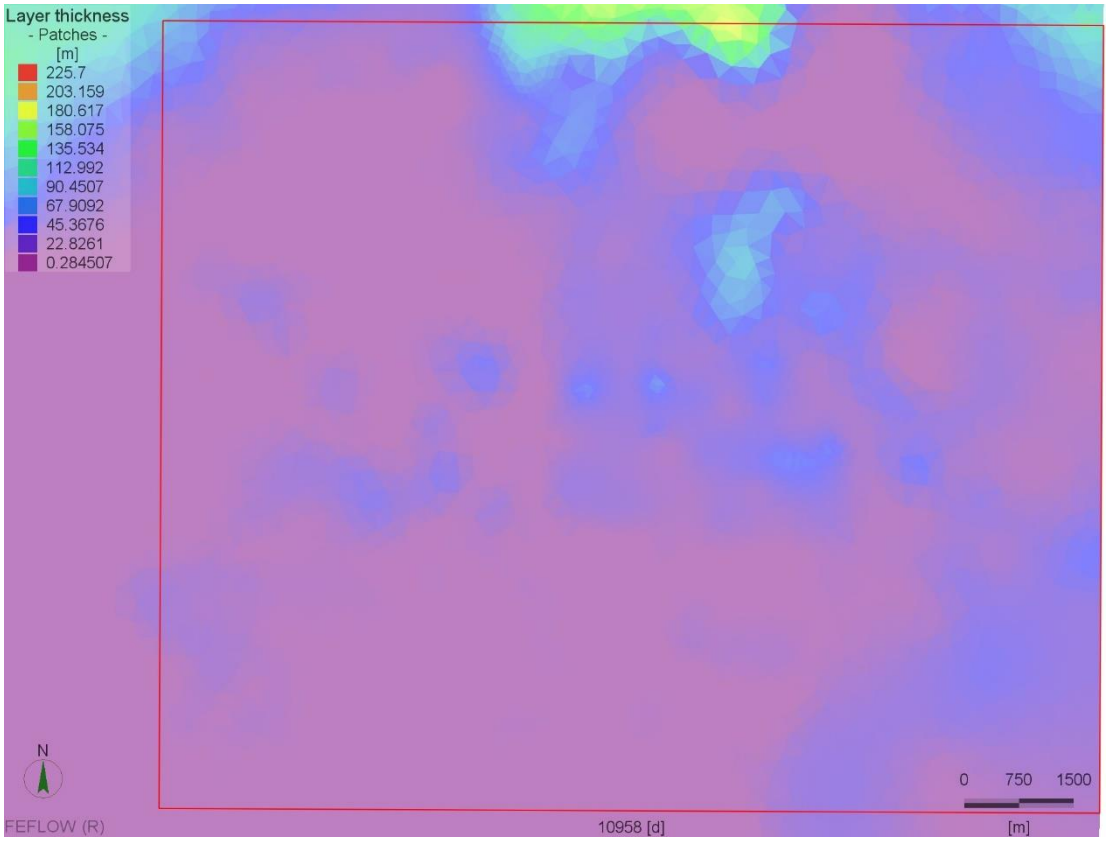
14. ábra: A 2. numerikus modellfelszín [mBf]



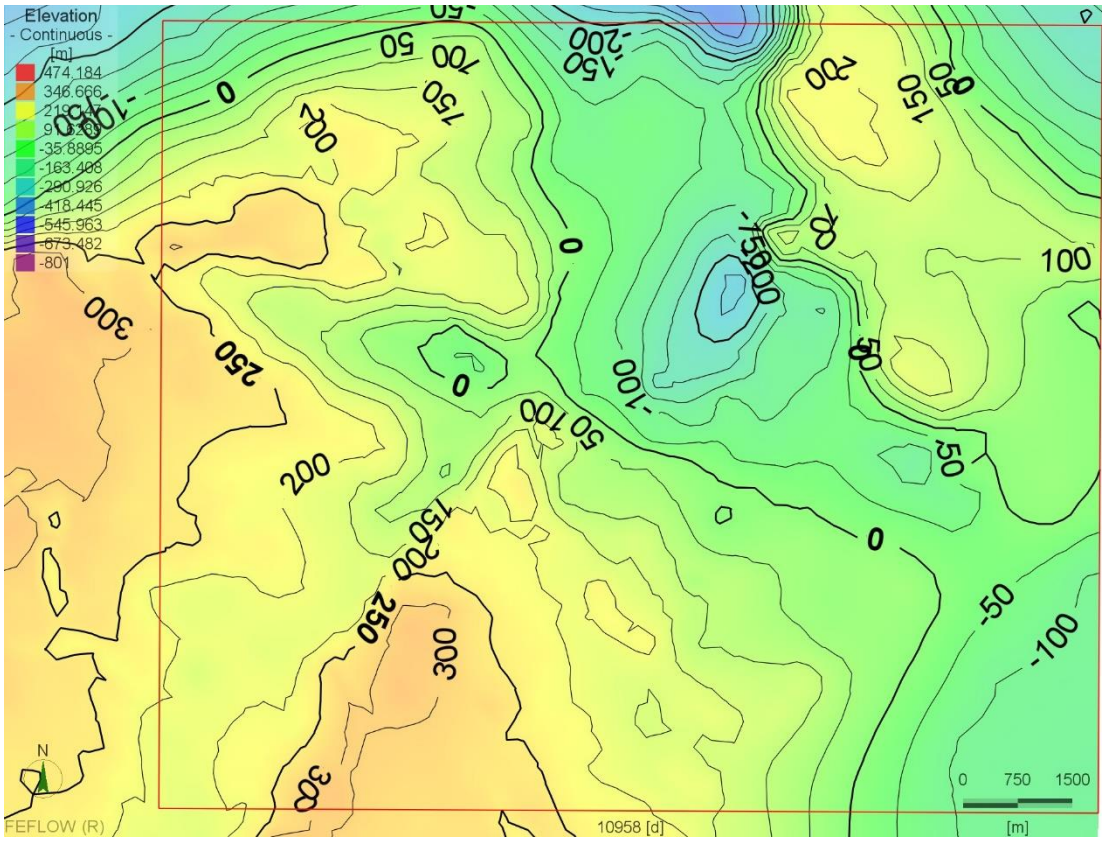
15. ábra: A 2. numerikus modellréteg vastagsága



16. ábra: A 3. numerikusmodellfelszín [mBf]



17. ábra: A 3. numerikus modellréteg vastagsága



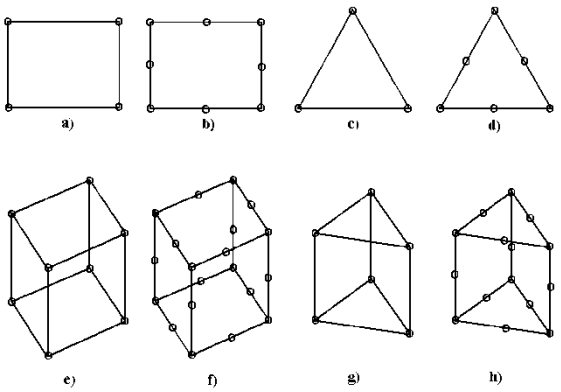
18. ábra: Az 5. numerikus modellfelszín [mBf]

3.2 A numerikus modell rácshálójának kialakítása

A numerikus modellezés során véges sok változóval közelítjük meg a valóságot, azaz a vizsgált teret kisebb egységekre osztjuk (diszkretizáció). A diszkretizáció két legismertebb fajtája a véges differencia, illetve végeselem módszerek.

A Fehérvárcsurgó lokális numerikus modellezéséhez használt FEFLOW program a vizsgált tér diszkretizációjához a végeselem módszert alkalmazza.

A végeselem módszer lényege, hogy a modellezni kívánt teret tetszőleges számú és alakú elemre bontjuk (***19. ábra***). Az elemek egymással csomópontjaikon keresztül kapcsolódnak, illetve a csomópontok koordinátái határozzák meg térbeli helyüket. Az elemek lehetnek egy-, két- és háromdimenziósak, ezáltal az elemháló rugalmasan alakítható és fontos számítási helyeken (pl.: kutak, források, vetők) tetszőlegesen sűríthetők, így biztosítva a változatos geológiai felépítésű terek modellezését.



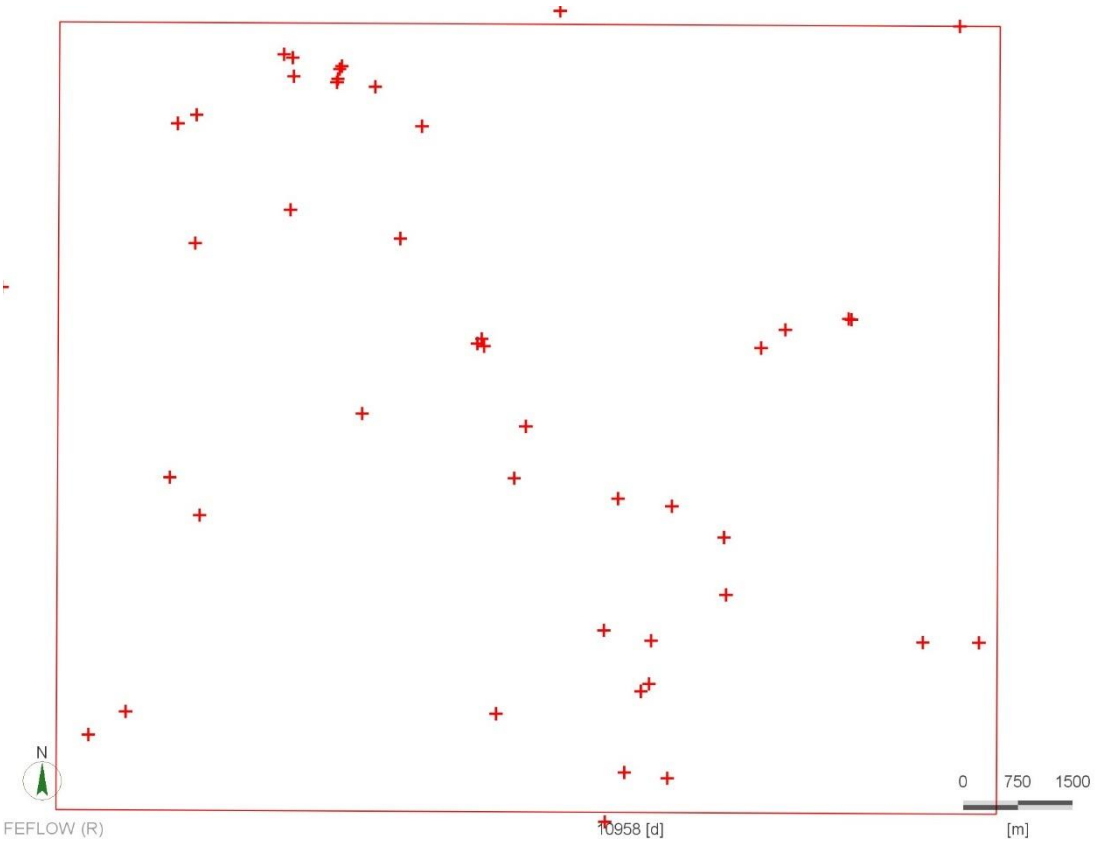
2D modul:
a) 4-csomópontos
b) 8-csomópontos négyoldalú elemek
c) 3-csomópontos
d) 6-csomópontos háromoldalú elemek
3D modul:
e) 8-csomópontos
f) 20-csomópontos négyoldalú prizmák
g) 6-csomópontos
h) 15-csomópontos háromoldalú prizmák

19. ábra: A FEFLOW szoftverben alkalmazható elemek

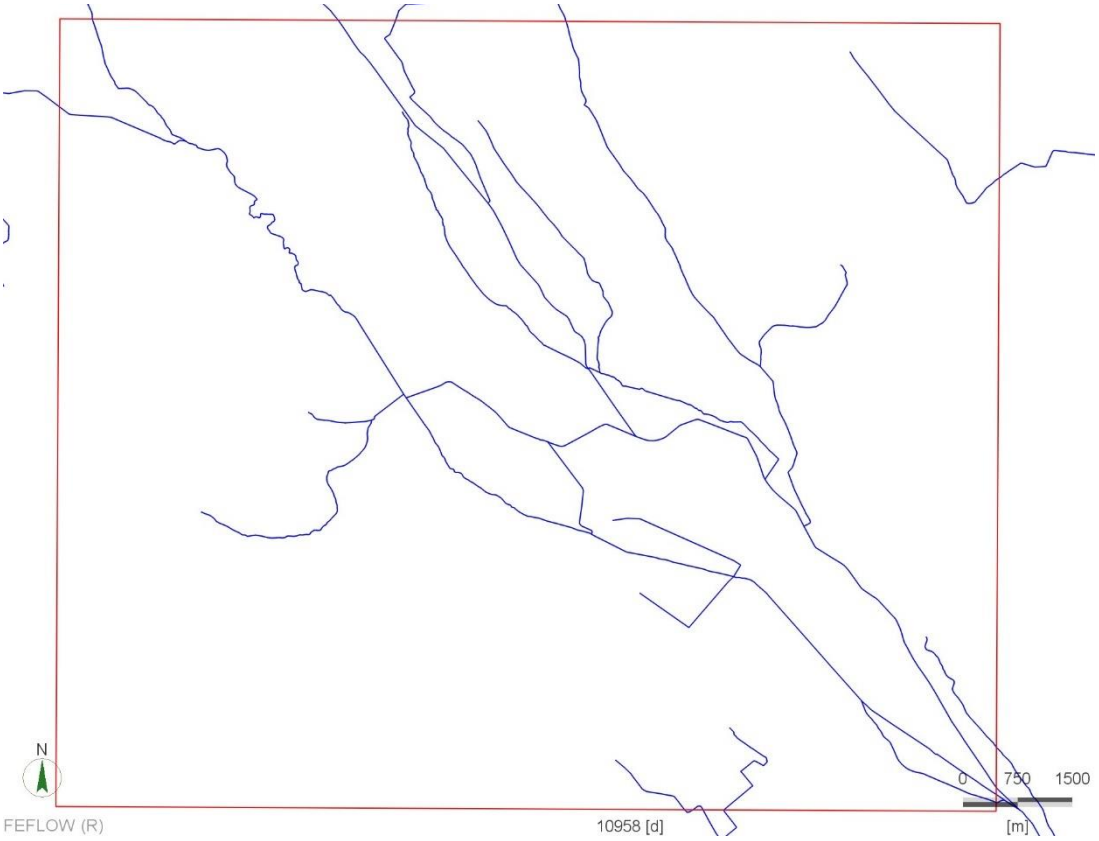
A hálókiosztás során a modellezett térrészt háromszög alapú prizmákkal definiáltuk (6-csomópontos háromoldalú lineáris prizmák). A rácsháló kialakításánál a következő elemekhez rendeltünk csomópontot:

- Pont elemek (***20. ábra***):
  - a lokális modell területén a karsztot, illetve a fedőt megcsapoló termelő objektumok, amelyekből van termelési adat
  - minden forrás a Smaragd-GSH Kft. által a projekt keretében 2019-ben végzett forrásfelmérés alapján
  - törzshálózati karsztvízszint észlelő monitoring kutak
- Vonal elemek:
  - egyszerűsített vetőhálózat
  - egyszerűsített folyó és kisvízfolyások hálózata

A vízfolyásokat egyszerűsített vonal elemekkel definiáltuk (***21. ábra***), hogy elkerüljük a felesleges pontokon való sűrítést. A vízfolyások hálózatát az OVF vízrajzi állományából szűrtük le méret, illetve a karszttárolóval való kapcsolat szerint. A regionális modellel ellentétben, a lokális modellben a kisebb vízfolyásokhoz is rendeltünk csomópontot.

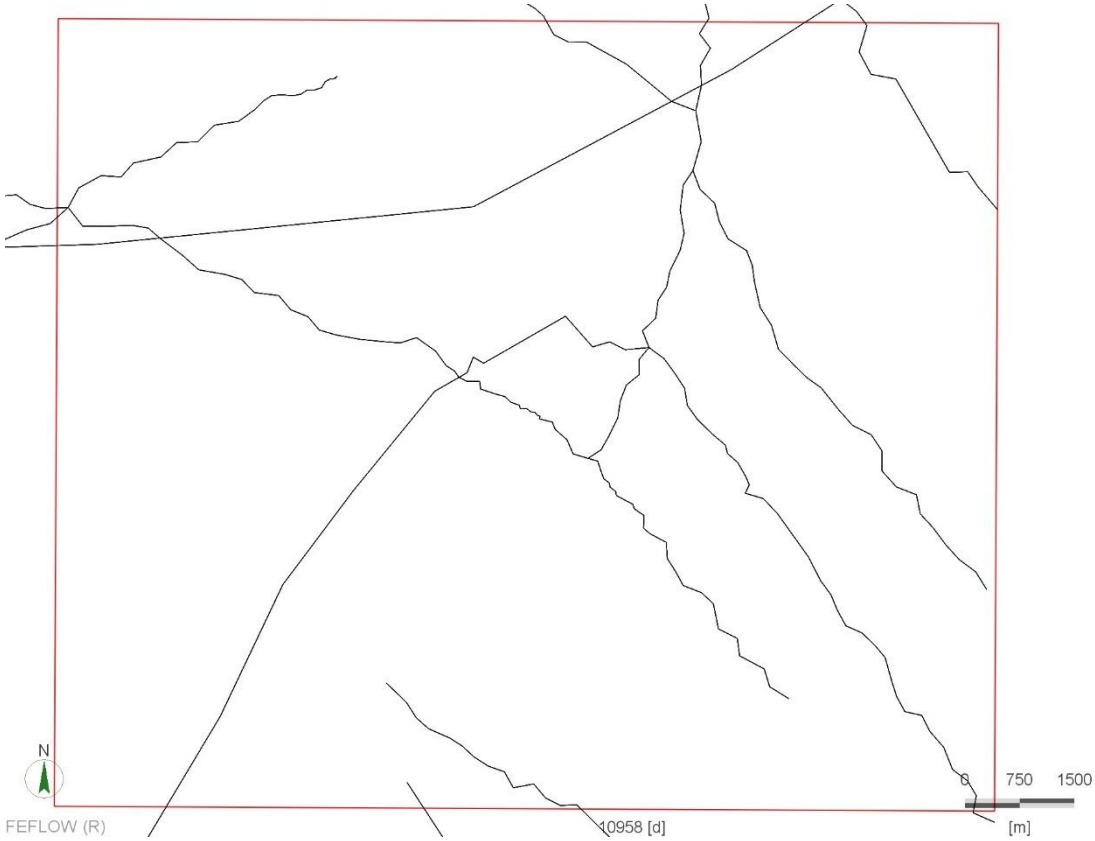


20. ábra: Pont elemek



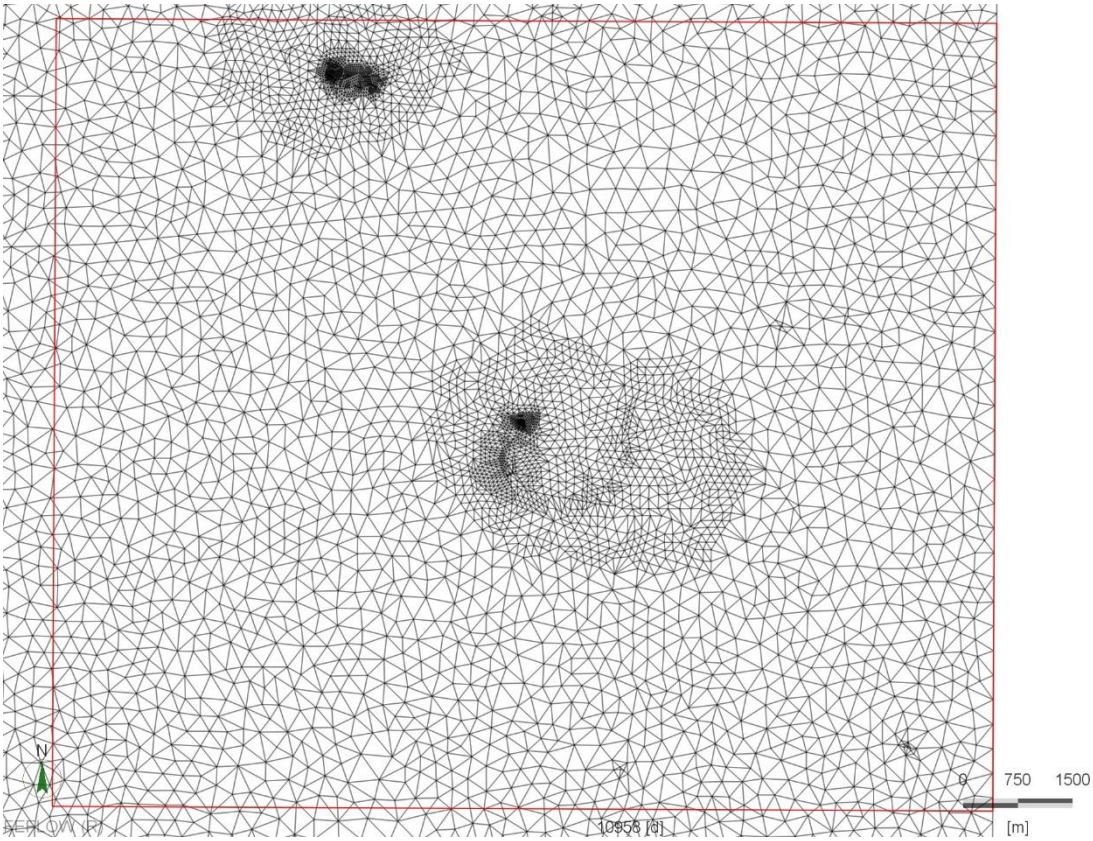
21. ábra: Egyszerűsített folyóhálózat

A vetőket az M= 1:500 000 prekainozoos földtani térkép [15] és a terület prealbai földtani térképe [16] alapján vettük figyelembe (***22. ábra***).



22. ábra: Egyszerűsített vetőhálózat

A mesh generálást a FEFLOW Triangle Mesh Generator funkciójával végeztük el. A három modellterületen együttesen (Bodajk-Fehérvárcsurgó-Csór) a rácsháló egy felületen összesen 9 312 db csomópontot és 18 361 db elemet tartalmaz. A teljes 8 rétegű numerikus modell, így összesen 83 808 db csomópontból és 146 888 db véges elemből áll. A ***23. ábrán*** a Fehérvárcsurgó lokális modellterületre eső rácsháló részlet látható. A rácsálót sűrítettük (az akna közvetlen környezetében 5-20 m, távolabb: 50-150 m), illetve ráigazítottuk a Rákhegy-vízakna vágataira. A vágatok térképét, a DRV Zrt. bocsájtotta rendelkezésünkre.



23. ábra: A numerikus modell rácshálójának Fehérvárcsurgó lokális modellterületre eső részlete

3.3 A numerikus modell hidraulikai paraméterezése

3.3.1 Szivárgási tényező értékek a numerikus modellben

A numerikus modellek a szivárgási alapegyenlet iterációsan közelítő megoldásai. Az áramlási egyenletek lamináris áramlás és telített közeg esetére (Darcy-törvény miatt) érvényesek, melyeket parciális differenciálegyenletekkel tudunk leírni permanens és tranziens állapotra.

Ha a vizsgált rendszerben jelenlévő víz mennyisége nem változik. Homogén izotróp esetben és permanens állapotban a Laplace egyenlettel fejezhetjük ki az áramlási pályát:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

ahol h: a hidraulikus emelkedési magasság [m]

Ha figyelembe vesszük a szivárgási tényező (K [m/s]) irány és hely szerinti változását is, akkor az egyenlet a következőképpen módosul:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K(x,y,z)_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K(x,y,z)_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K(x,y,z)_z \frac{\partial h}{\partial z}) = 0$$

A Laplace-egyenlet az alapja az analitikus és numerikus vízáramlás modellezéseknek. Az adott szoftver egy térrészre megadott hidraulikus peremfeltételeknek megfelelően számolja a h értékeket a tér minden egyes pontjára.

Tehát a vízföldtani tulajdonságok közül a szivárgási tényező határozza meg a különböző kőzettestekben a vízáramlás sebességét, ezáltal a vízszint eloszlást is befolyásolja. Emiatt ennek a paraméternek a meghatározása a modellezés egyik kalibrációs folyamata. Ez azt jelenti, hogy a numerikus modellezés kezdeti szakaszában feltételezett K-tényező eloszlást módosítani, igazítani kell a monitoring kutakban mért valós vízszintek figyelembevételével.

A lokális modellezés egyik célja az volt, hogy a numerikus számítás hibája kisebb legyen, mint regionális modellben. Ennek megvalósítására, a terület parametrizálása első lépésben a hidrosztratigráfiai egységek alapján történt meg, figyelembe véve a regionális modell kalibrációja során kapott értékeket. Ezt követően került sor további pontosításra a lokális modell kalibrációja során. A pontosításhoz hozzátartozik, hogy a porózus fedőképződmények részletesebb bontásra kerültek. A regionális modellterületen az átlagos szivárgási tényezővel jellemzett porózus pannon összletet a lokális numerikus modellben tovább bontottuk az agyag- és homoktartalom alapján. Ezekre a kőzetekre jellemző K-tényező értékeket a T-JAM projekt eredményei (*Fodor et al. 2011*) [13] szerint vettük figyelembe.

A regionális modellezés során alkalmazott alapkoncepciót, a lokális modellezés során is alkalmaztuk, miszerint a szivárgási paraméterek meghatározásakor a felszínen megtalálható, jobban karsztosodott, repedezett, mállott képződmények nagyobb értékkel rendelkeznek, mint ugyanezen képződmények fedett helyzetben. A főkarszt felszíni kibúvásainak szivárgási tényezőjét hasonlóképpen, mint a regionális modellben, a bányászati víztelenítés során számolt és mért transzmisszivitás értékekből becsültük (*Schmieder – Szilágyi 1988*) [12]. A karbonátos vízadó paraméterezését a kalibráció során pontosítottuk – értékét és területi eloszlását tekintve is – annak érdekében, hogy a modellezett vízszint és forráshozam értékek, a valós mért értékeket minél jobban leképezzék.

A numerikus rétegekben, a kalibrálás után elfogadott K-tényező eloszlást a ***24-31. ábrák*** mutatják, a különböző hidrosztratigráfiai egységek, illetve kőzettestek szivárgási tényező értékeit a ***5. táblázat*** szemlélteti. A lokális modellek elkészítése során egyre nagyobb szerepet kaptak a kisebb léptékben is előforduló földtani különbözőségek. Ez alapján előfordult, hogy azonos hidrosztratigráfiai egységhez sorolt képződményeket, területenként eltérő hidraulikai paraméterekkel láttunk el. A ***5. táblázat***ban az egységekhez az alkalmazott értékek teljes intervalluma került feltűntetésre. A táblázatban bemutatott szivárgási tényezők nem a teljes rétegre, csak az adott formáció valós elterjedési területeire vonatkoznak.

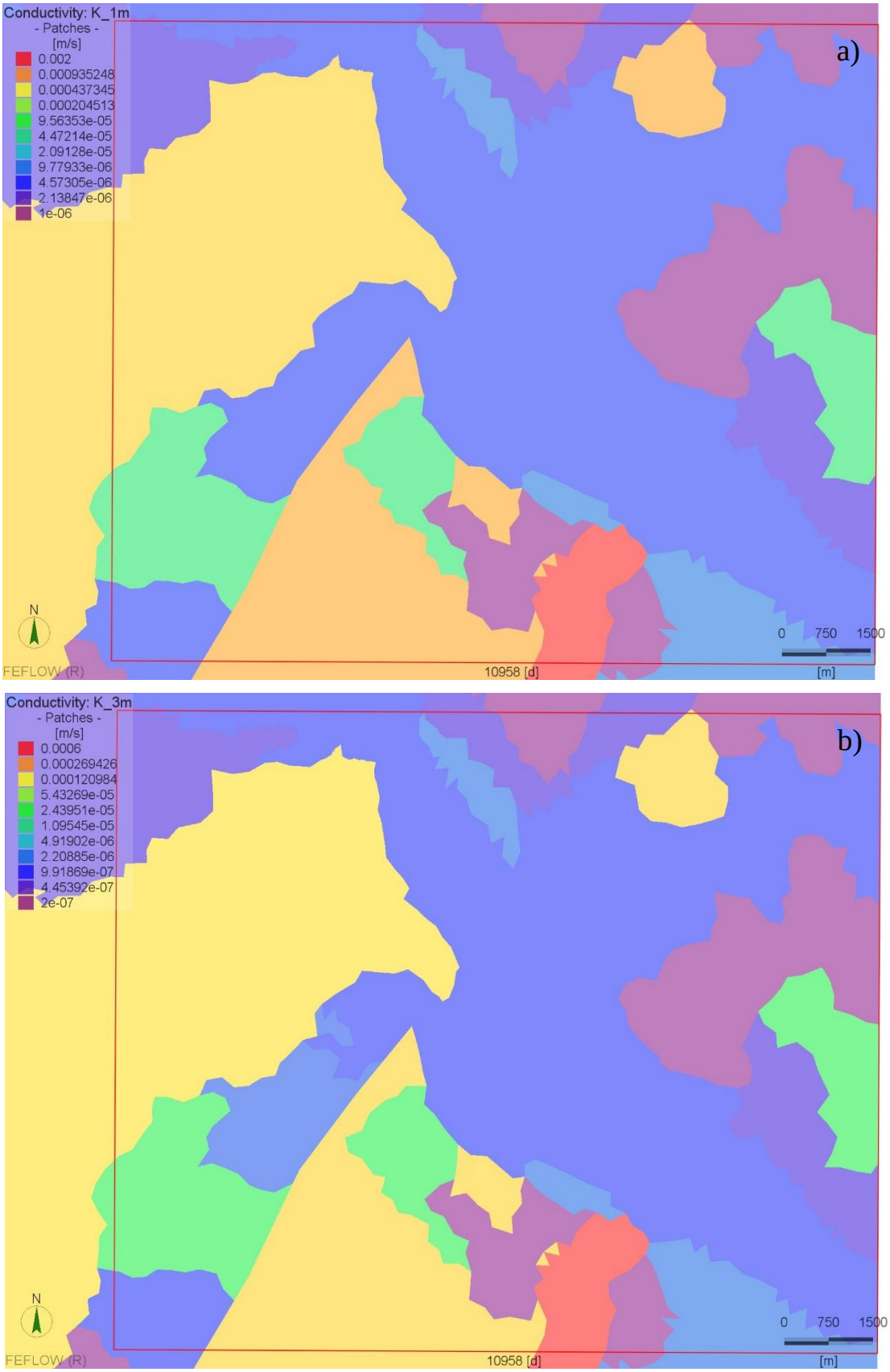
A modellben a konduktivitási mező rétegenként inhomogén és anizotróp. Ez azt jelenti, hogy a vertikális szivárgási tényező meghatározásánál, minden képződménynél feltételeztünk anizotrópiát, ez képződményenként eltérő mértékű. A horizontális szivárgási tényezőknél csak a karsztban definiáltunk anizotrópiát, első megközelítésben ebben az esetben a felére csökkentettük y irányban az értékeket. A későbbi kalibrálás során ez az arány lokálisan, a karsztos területek kis részén változhatott, de jellemzően K_x/K_y arány 1:2 maradt. A modellben a szivárgáshidraulikai paraméter referencia tengelyét elforgattuk, az elforgatás szöge: 40°. A karbonátos képződményekre jellemző a nagyfokú karsztosodás, mely gyakran vertikális irányban is nagyfokú vízvezető képességet eredményezhet. Ez alapján a karsztos területeken a K_x/K_z arány az adott terület földtani sajátosságai alapján rendkívül változatos lehet. Ennek értelmében bizonyos területeken (elsősorban a nyílt karsztos területek alatt) a vertikális szivárgási tényező értéket (K_z) is megnöveltük.

A fehérvárcsurgói lokális modellterület déli részén, Iszkaszentgyörgytől és Kincsesbányától keletre egy nagy nyíltkarsztos térrész helyezkedik el. A terület földrajzilag a Keleti-Bakonyhoz tartozik és jelentős beszivárgási zónának tekinthető. Innen északra egy másik, a Tési—fennsíkhoz kapcsolódó nyílt karsztos terület is elkülöníthető. A két beszivárgási terület között az 1-4. rétegekben jellemzően változatos összetételű porózus üledék, valamint jó vízvezető édesvízi mészkő ($K_x=5*10^{-5}$) található. A terület ÉK-i részén a Móri-árok húzódik, mely a modell 1-4. rétegében viszonylag nagy vastagságú,

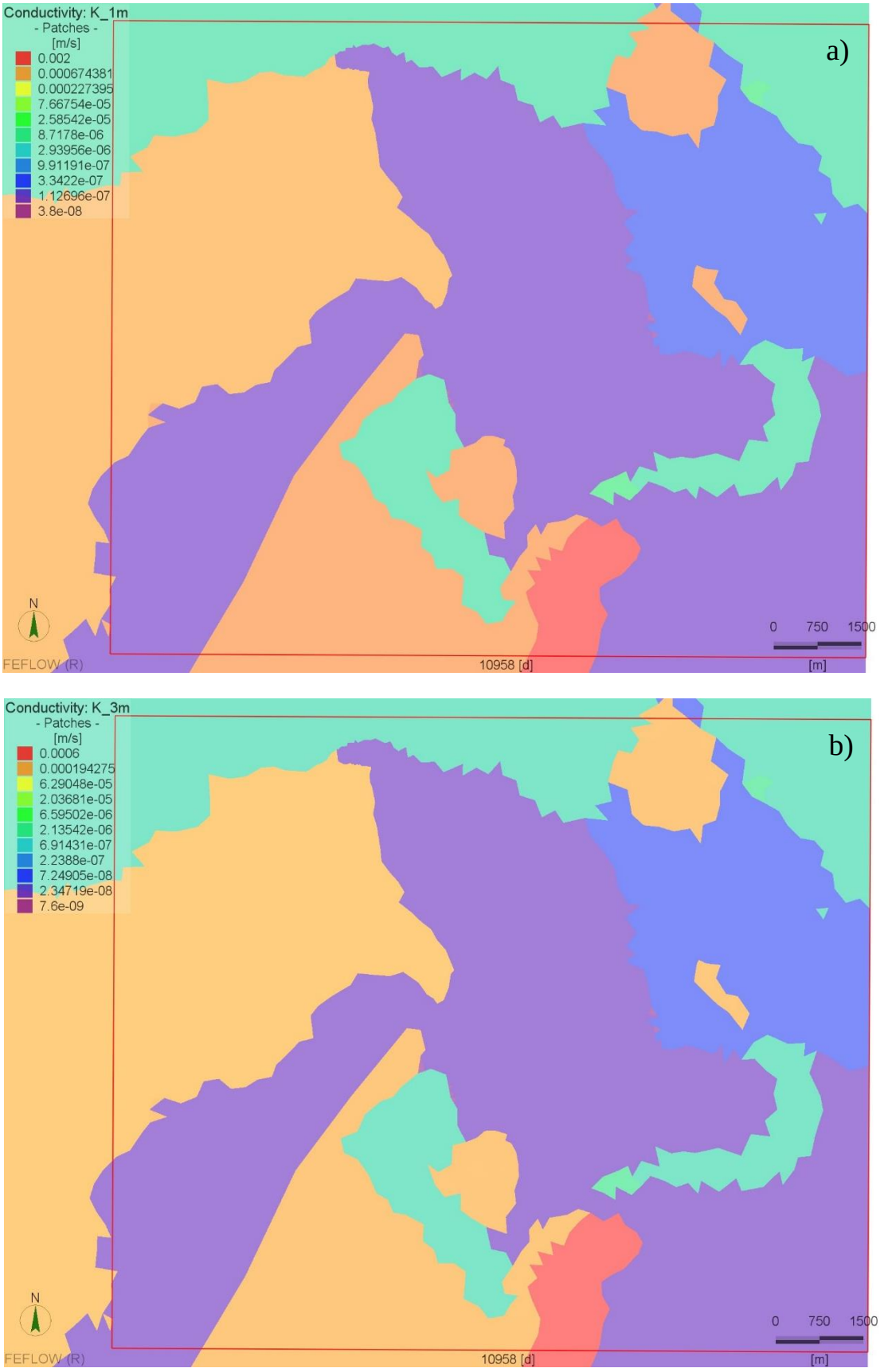
porózus üledékek formájában jelenik meg. Ezek részben rossz vízadó finomszemcsés képződmények, de jó vízadó homokos-kavicsos képződmények is megjelennek Az 1-4. rétegben megjelenő porózus képződmények (agyag, aleurit, homok, kavics) szivárgási tényező értékei $K_x=1*10^{-7}$-$5,8*10^{-6}$. között változnak. A 3-4. rétegekben, Kincsesbánya térségében megjelenő függőkarsztos képződményekhez tartozó rossz vízadó márgák ($Kx=2*10^{-7}$), illetve jó vízadó mészkövek ($Kx=5*10^{-5}$) is megjelennek.

Az 5. rétegtől kezdve a nyílt karszt alatti képződmények a mélységgel egyre csökkenő hidraulikus vezetőképesség értékkel rendelkeznek. A két nyílt karsztos terület egy ÉK-DNy-i irányú vető mentén határolódik el egymástól. Ez a vető az úgynevezett Bakonykúti-feltolódás, amely hidraulikailag vízrekesztő szerepet tölt be és jelentős hatással van a térség felszín alatti vízáramlására.

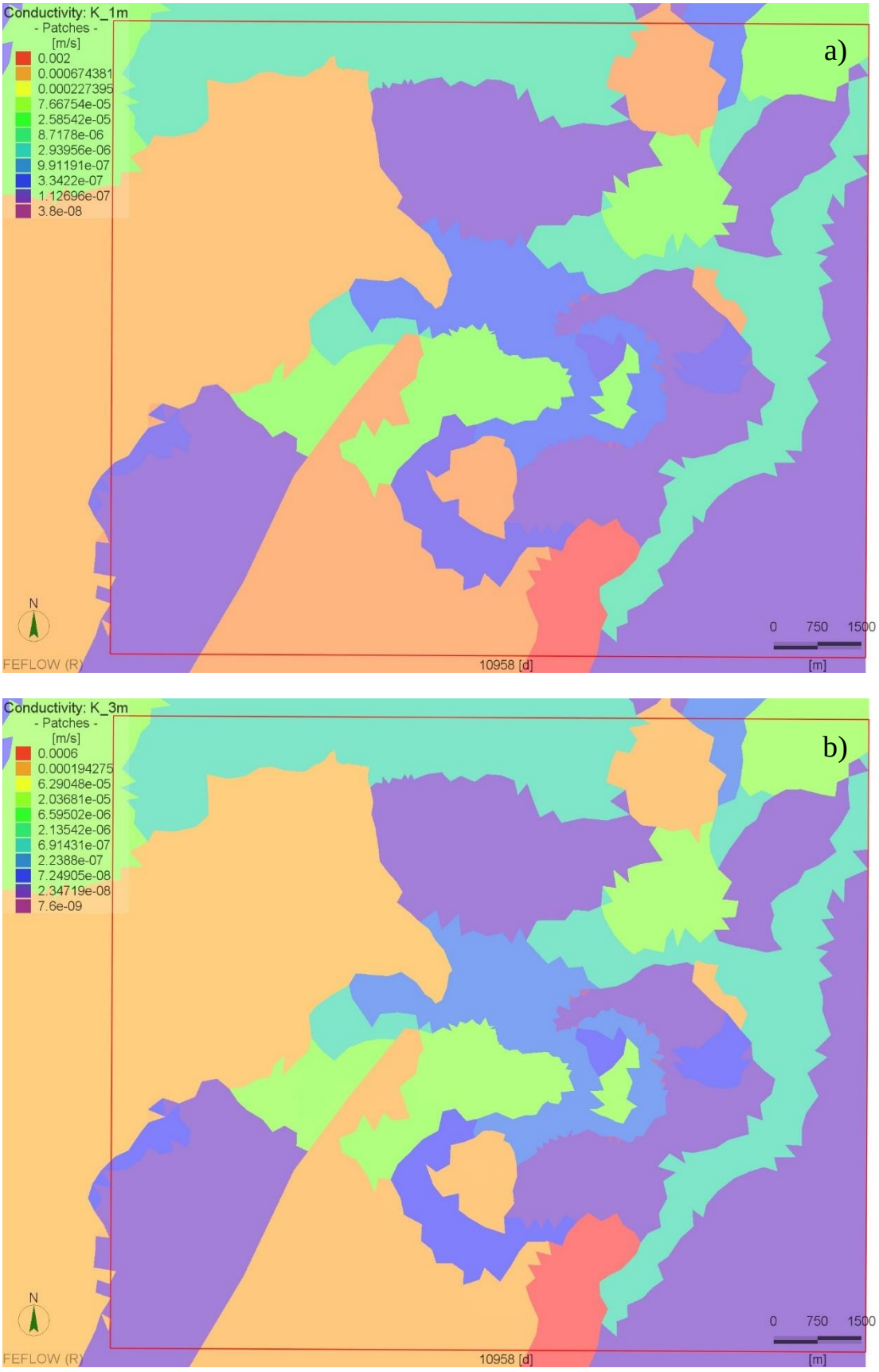
A karsztos vízadók hidraulikai tulajdonságait az adott területet jellemző karsztosodás mértéke és egyéb utólagos hatások (pl. szerkezeti mozgások) is nagyban befolyásolják. Ezek alapján az 5. rétegben a felső-triász Fődolomit Formációhoz tartozó képződmények szivárgási tényező értéke $K_x=1*10^{-5}$-$4*10^{-4}$ m/s között változik, míg a területen megjelenő idősebb karbonátok (pl.: Budaörsi Dolomit, Aszófői Dolomit) nagyon jó, $K_x= 6*10^{-5}$-$8*10^{-4}$ m/s szivárgási tényező értékkel rendelkeznek. A környezetéhez képest magasabb szivárgási tényező értékeket a modellterületen található akna (rákhegyi akna) közvetlen környezetében adtuk meg az 5. rétegben, ezzel reprezentálva az bányászati beavatkozás hatását a földtani közegre (***28. ábra***).



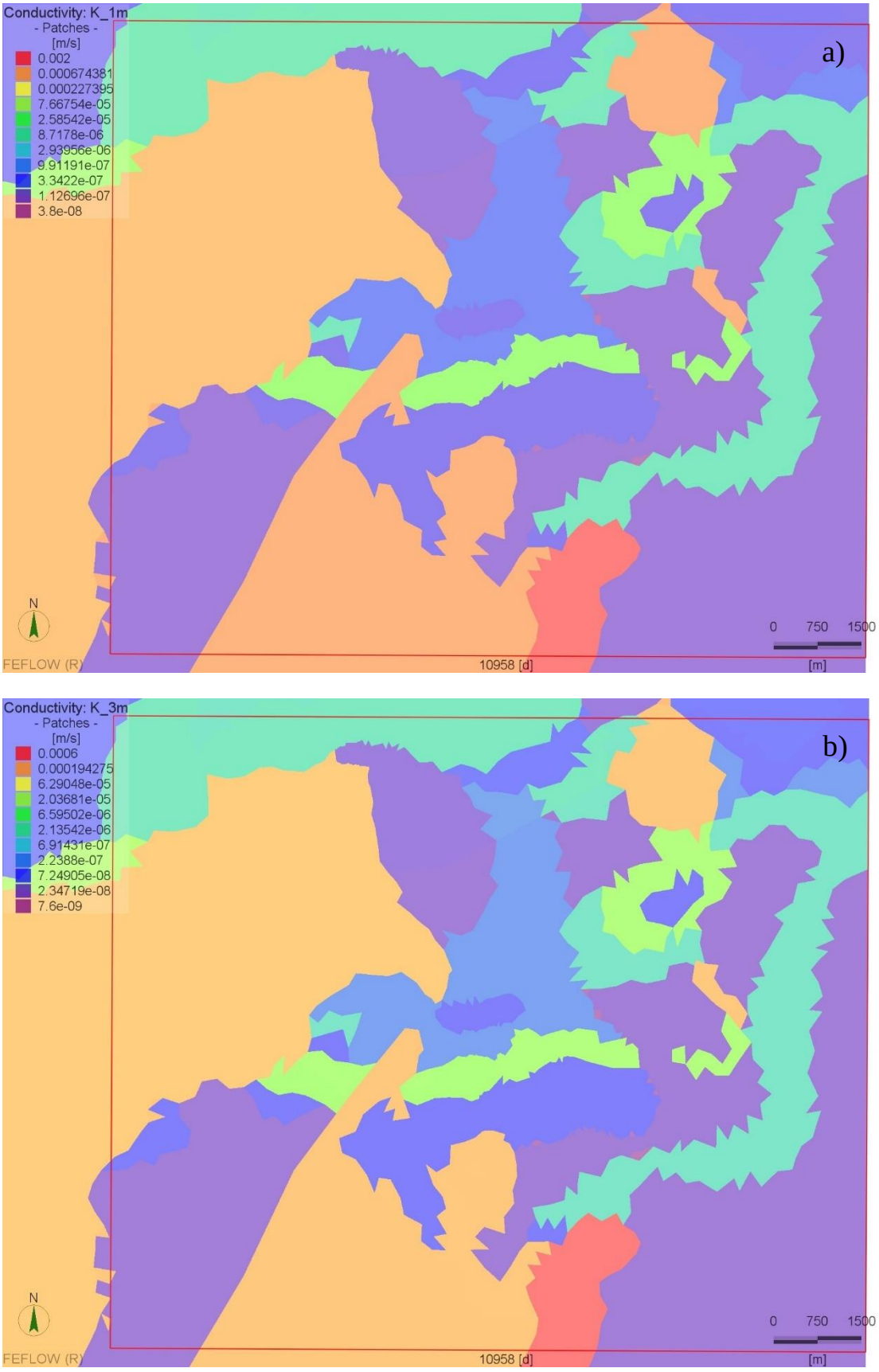
24. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



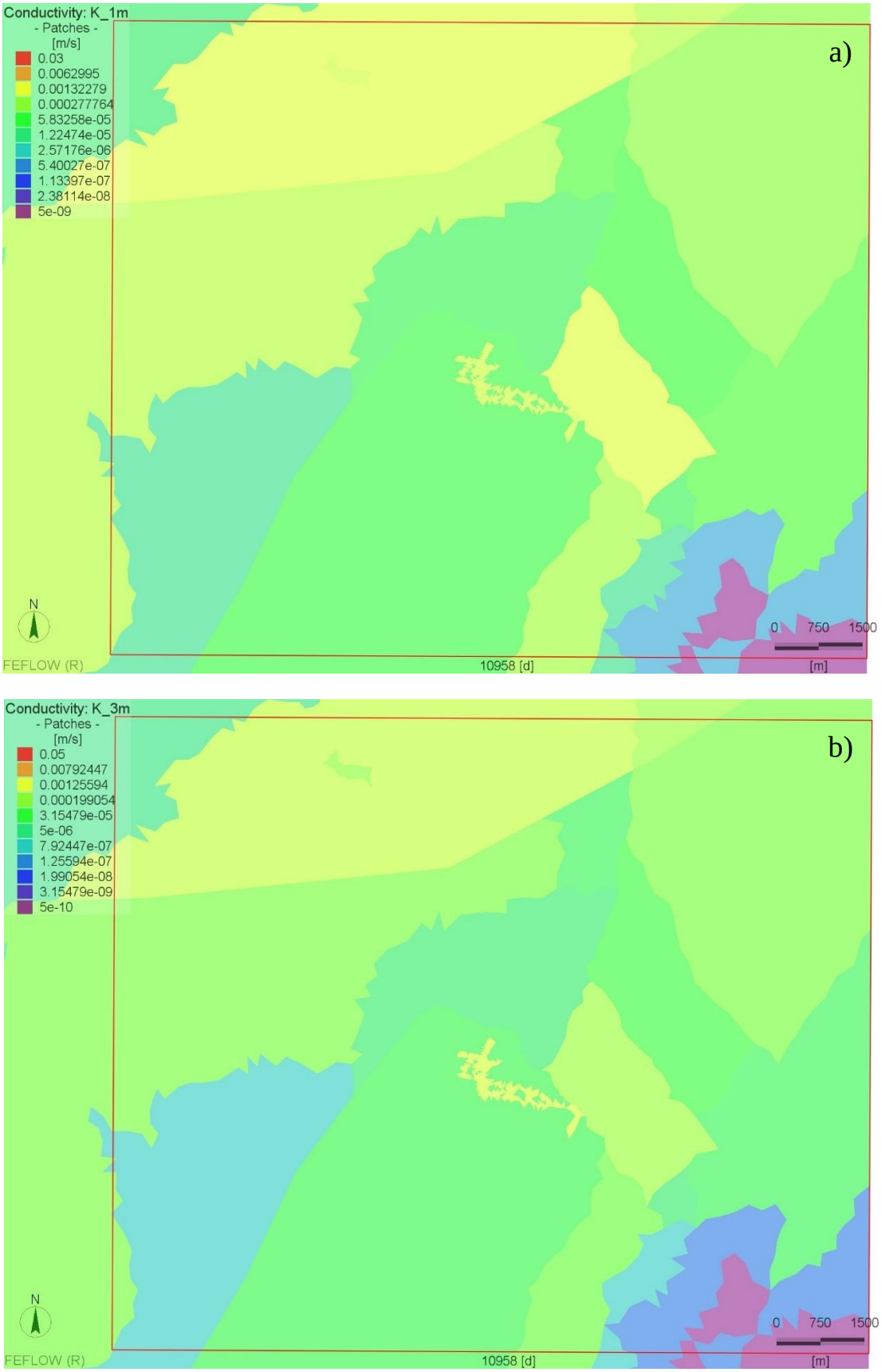
25. ábra: A 2. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



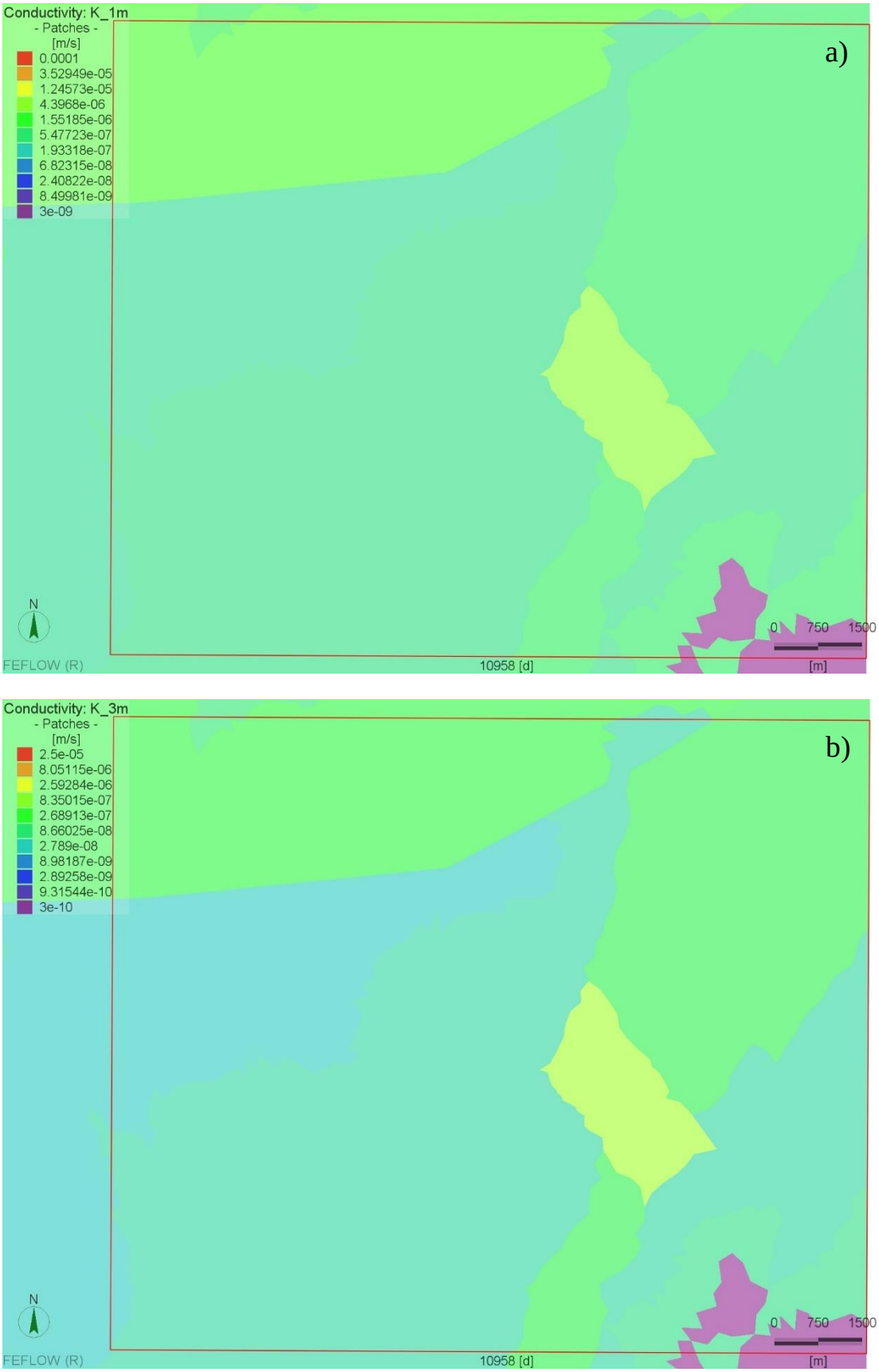
26. ábra: A 3. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



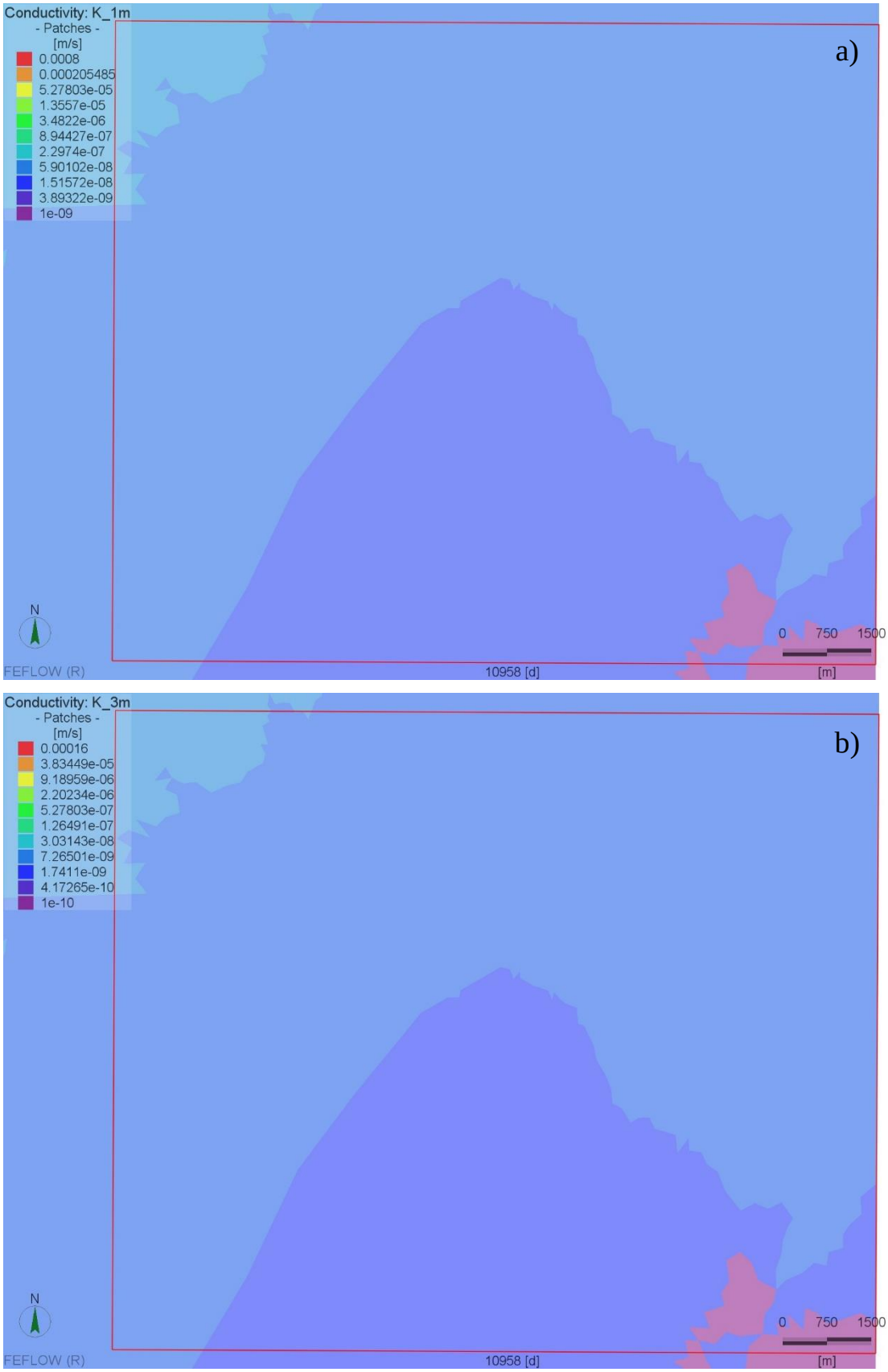
27. ábra: A 4. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



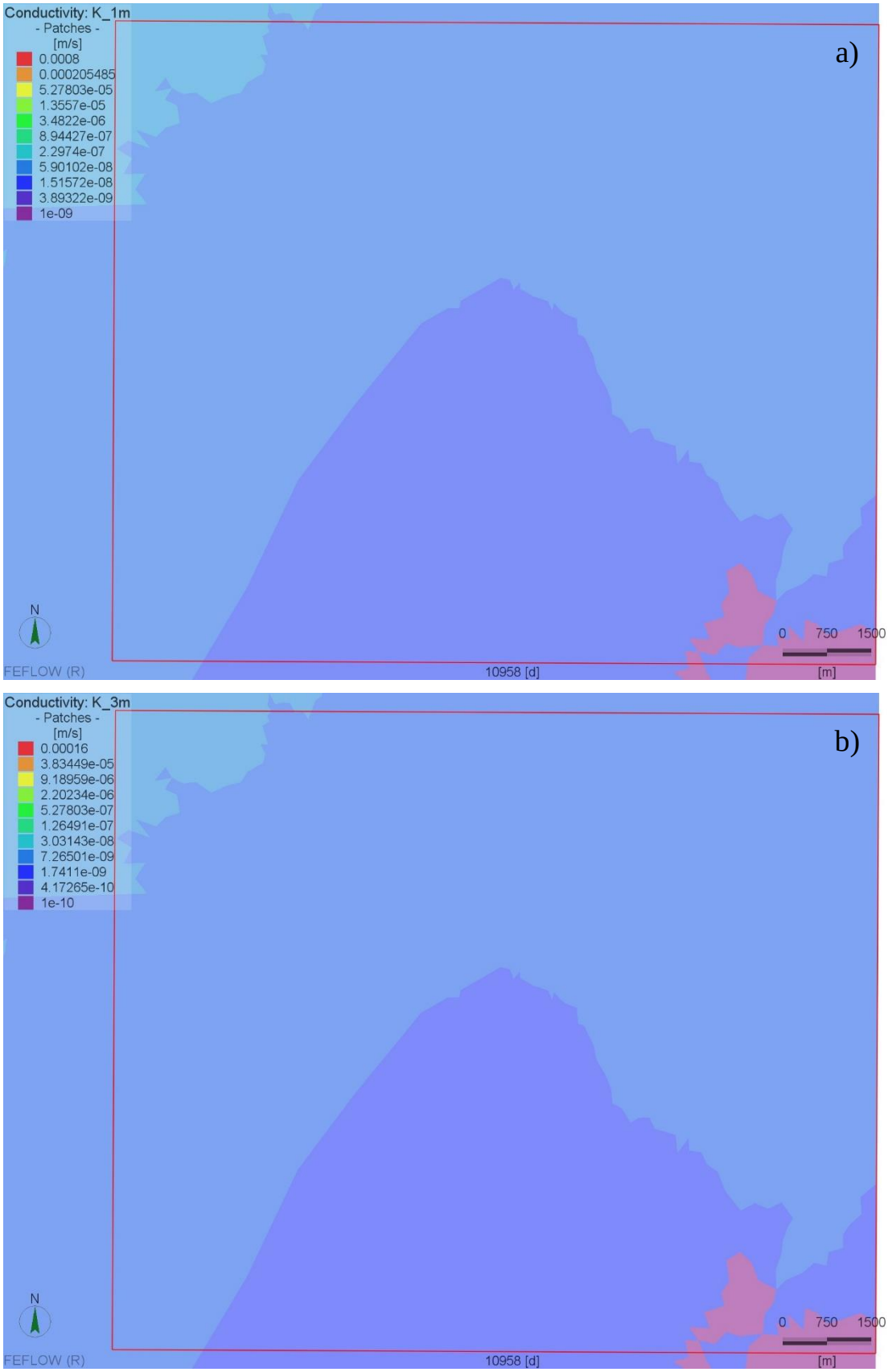
28. ábra: Az 5. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



29. ábra: A 6. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



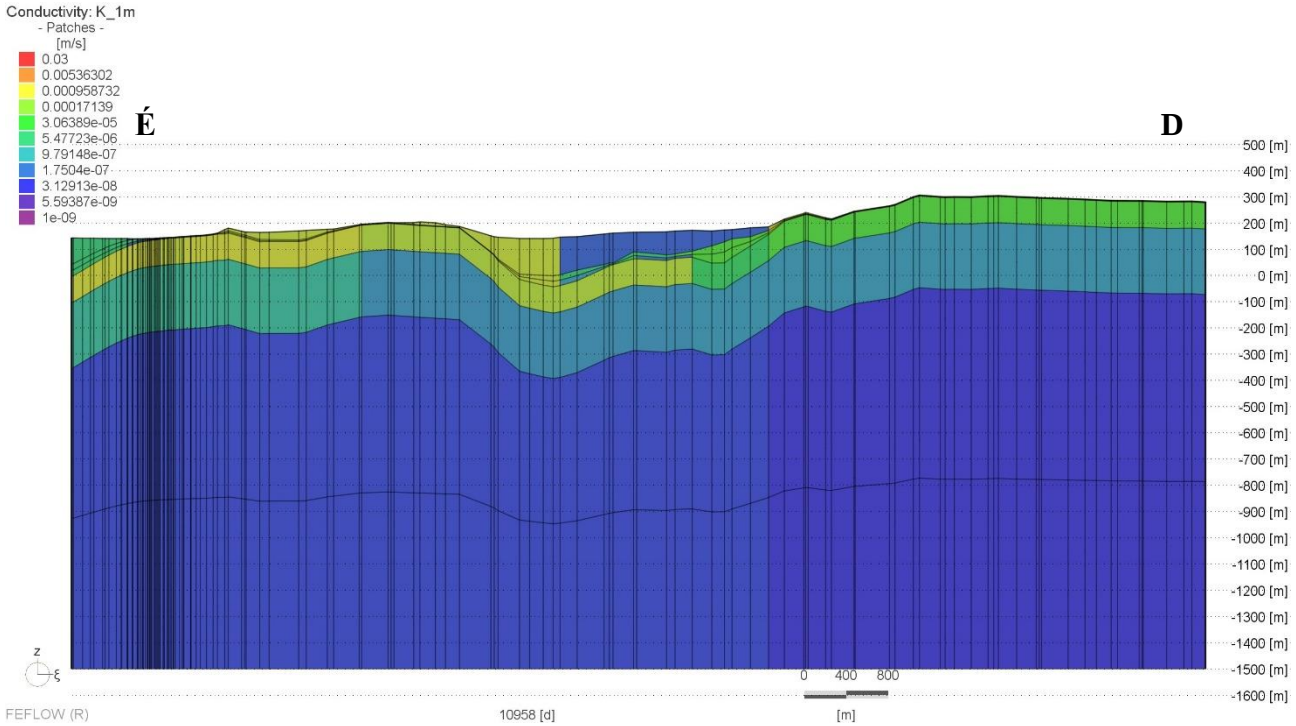
30. ábra: A 7. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



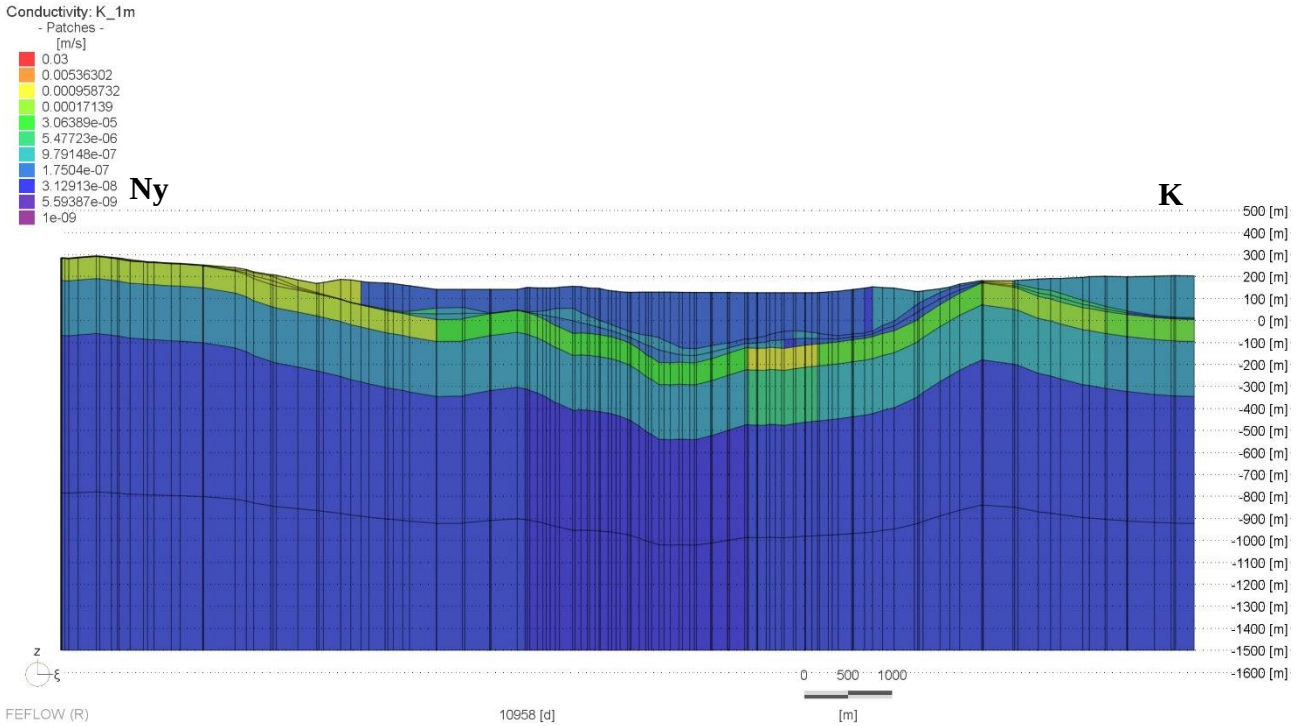
31. ábra: A 8. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás

5. táblázat: Az egyes képződmények K-tényező értéke a numerikus modellben

Numerikus réteg		Nyílt karsztos területek								Medence területek											
		kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)
1	Q-Pa2	Pre-albai (T3 Fődolomit Fm.)	6E-04 - 8E-04	Kx*0.5	1,5E-04 - 1,7E-04	Pre-albai (T2-3 Vértesi Fmcs.)	2E-03	Kx*0.5	6E-04	Q-Pa2	1E-07 - 1E-05	Kx*0.5-1	2E-06 - 2E-07	Q-Pa2	1E-07 - 1E-05	Kx*0.5-1	2E-06 - 2E-07	Q-Pa2	1E-07 - 1E-05	Kx*0.5-1	2E-06 - 2E-07
2	Pa1-M-Ol													Pa1-M-Ol (Gyulafirátóti Fm., Csatkai Fm.)	1E-07/ 5,8E-06	Kx*1	2E-08/ 1,16E-06				
3	Függőkarsztos rétegcsoport - mészkő									Függőkarszt (mészkő/ márga)	5E-05/ 2E-07	Kx*0.5	1,7E-05/ 6,67E-08								
4	Függőkarszt rétegcsoport - vízrekesztő																				
5	Pre-albai*		8E-04 - 5E-05		2E-05 - 4E-04		3E-04 - 9E-04		7,5E-05	Pre-albai (Fődolomit Fm./Vértesi Fmcs.)	3,3E-05 - 8E-04		9E-06 - 2E-04	Pre-albai (Fődolomit/ Vértesi Fmcs.)	3,3E-05 - 8E-04 1.25E-06 5E-09	Kx*0.5-1	9E-06 - 2E-04 1.25E-06 5E-09	Pre-albai (Fődolomit/ Vértesi Fmcs.)	3,3E-05 - 8E-04 1.25E-06 5E-09	Kx*0.5-1	9E-06 - 2E-04 1.25E-06 5E-09
6	Pre-albai segédréteg		5E-07 - 2E-06		5E-08 - 2E-07		8E-07		1,7E-07		5E-07 - 4E-06		5E-08 - 1E-06		4E-07 - 4E-06 7,5E-07 3E-09		3,2E-08 - 1E-06 7,5E-08 3E-10		4E-07 - 4E-06 7,5E-07 3E-09		3,2E-08 - 1E-06 7,5E-08 3E-10
7	Pre-albai segédréteg	Pre-albai (Fődolomit/ Vértesi Fmcs.) Balatonfelvidéki Homokkő	5E-08- 2,5E-08		2,5E-09 5E-09	Pre-albai (Fődolomit/ Vértesi Fmcs.) Balatonfelvidéki Homokkő	2,5E-08		2,5E-09		2.5E-08		2.5E-09	Balatonfelvidéki Homokkő Lovasi Agyagpala	1E-08 - 5E-08 2,5E-08 1E-09		1E-09 - 5E-09 2,5E-09 1E-10	Balatonfelvidéki Homokkő Lovasi Agyagpala	1E-08 - 5E-08 2,5E-08 1E-09		1E-09 - 5E-09 2,5E-09 1E-10
8	Pre-albai segédréteg																				

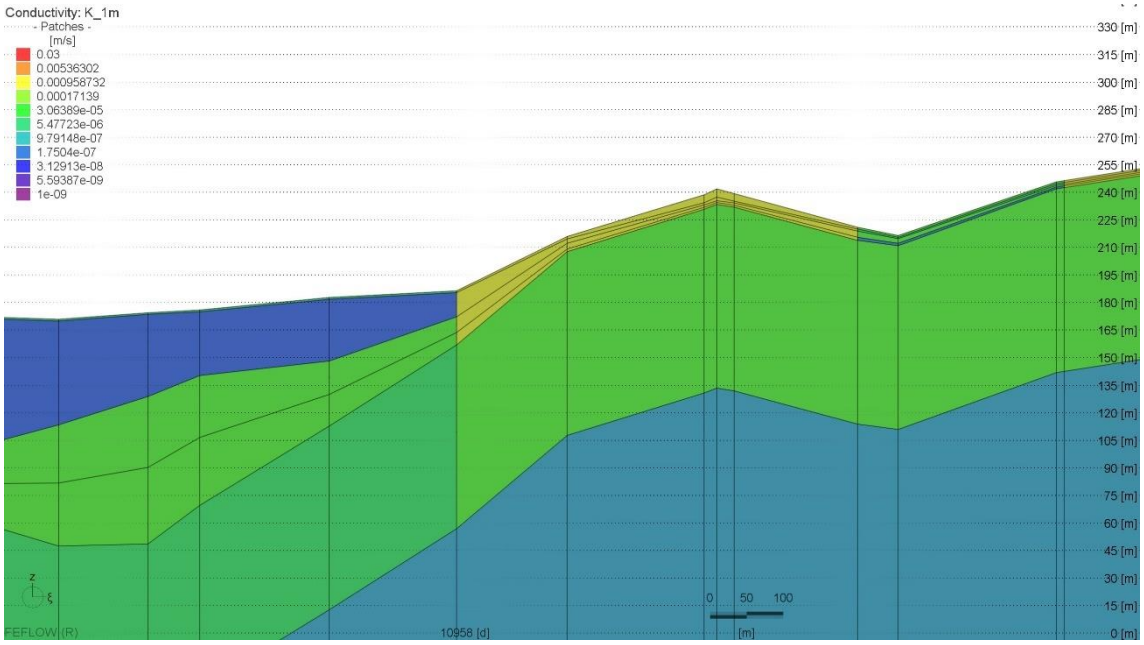


32. ábra: A szivárgási tényező eloszlás É-D-i irányú szelvényen (2,5x túlmagasítás)



33. ábra: A szivárgási tényező eloszlás Ny-K-i irányú szelvényen (2,5x túlmagasítás)

A valóságban, az idősebb karbonátos kőzetek és a fiatalabb üledékes kőzetek egymás mellett fordulnak elő, ezt a modellben, a geometriai megoldáson túl (***3.1. fejezet***), paraméterváltással lehet leképezni (***34. ábra***).



34. ábra: K-tényező változása azonos rétegekben, É-D-i irányú szelvényen kinagyítva (2,5x túlmagasítás)

A különböző korú kőzettestek vertikális elterjedése sem azonos, ezt a modellezés során igyekeztünk leképezni. Az ***6. táblázat*** mutatja, hogy az egyes képződmények melyik numerikus rétegben fordulnak elő.

		Numerikus rétegek							
Formáció	Képződmény kora	1. réteg	2. réteg	3. réteg	4. réteg	5. réteg	6. réteg	7. réteg	8. réteg
Kvarter és felső-pannon általában	Q-Pa2								
Nagyvázsonyi Mészkő	Pa2								
Oligocén-miocén vízrekesztő/vízvezető	M-Ol								
Eocén mészkő	E2								
Eocén vízrekesztő	E2								
Fődolomit	T3								
Idősebb triász dolomitok (Sédvölgyi Dolomit, Budaörsi Dolomit, Megyehegyi D., Iszkahegyi D., Aszófői D.)	T2-3								
Balatonfelvidéki Homokkő	P2								
Lovasi Agyagpala	O-D								

6. táblázat: Az egyes képződmények vertikális elterjedése a numerikus modellben

3.3.2 Fajlagos tározás értékek a numerikus modellben

Tranziens áramlás esetén az áramlási kép időbeli változását is figyelembe vesszük. Tehát a vizsgált térrészben a bemenő tömegáram nem azonos a kilépővel. Ehhez ismerni kell, hogy a víztartó egységnyi térfogatából egységnyi idő alatt mennyi víz szabadítható fel, amit a fajlagos tározás definiál (S_0 [1/m]). A fajlagos tározás által meghatározott vízmennyiség két mechanizmus révén szabadul fel: az egyik a víz nyomáscsökkenés hatására bekövetkező tágulása, a másik a megnövekedett effektív feszültség miatt bekövetkező víztartó kompakció hatására. Ez a két folyamat a közeg (α) és a víz kompresszibilitásának (β) függvénye.

$$S_0 = \rho g(\alpha + n\beta)$$

ahol ρgα a kompakció útján, míg ρgnβ a víz tágulása révén felszabaduló vízmennyiséget képviseli, az n a kőzet teljes porozitása.

A Laplace-egyenletet az idő és fajlagos tárózással átalakítva megkapjuk a diffúziós egyenletet:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_0}{K}\frac{dh}{dt}$$

A diffúziós egyenlet a tranziens vízáramlást adja meg homogén és izotróp esetre, ha az anizotrópiát is figyelembe vesszük, akkor a következő egyenlet adja a megoldást:

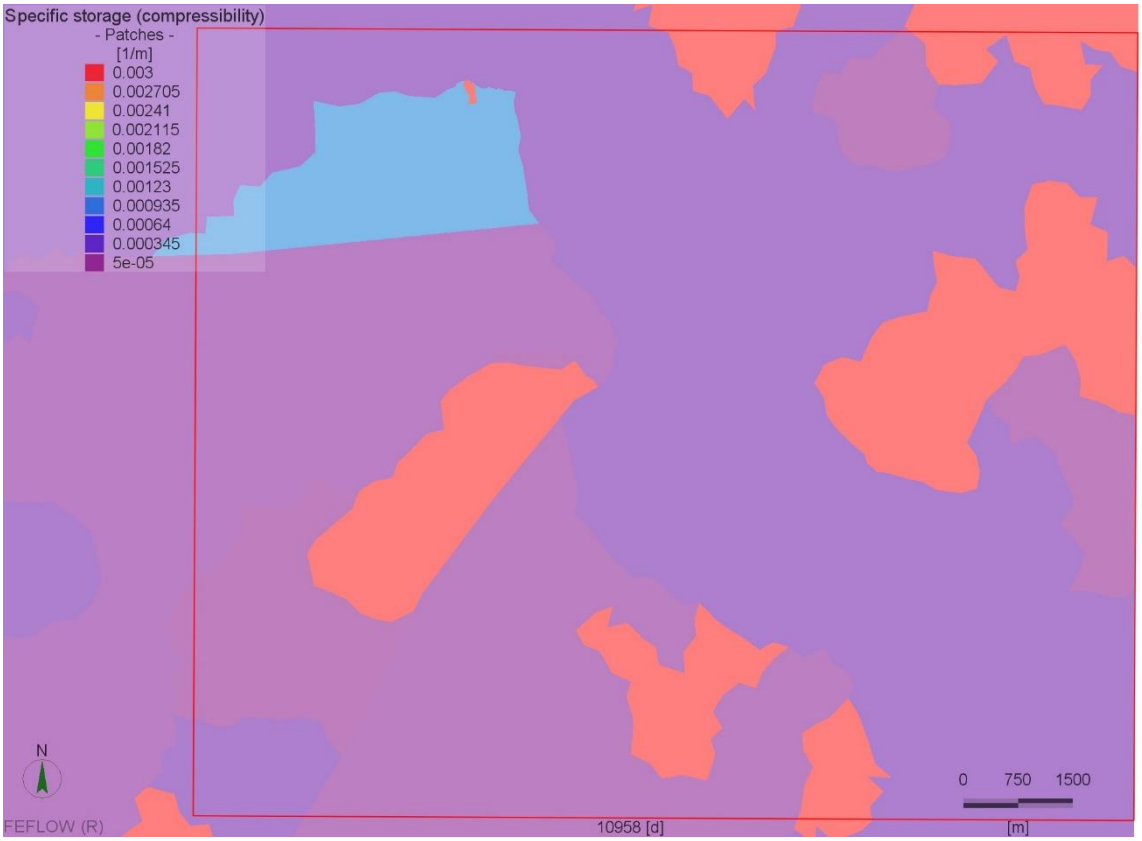
$$\frac{\partial}{\partial x}(K(x)\frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K(y)\frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K(z)\frac{\partial h}{\partial z}) = S_0\frac{dh}{dt}$$

A tranziens áramlási egyenlet a pórusnyomás változás időbeli terjedését írja le. Ha az egyenletet b vastagságú fedett, horizontális víztartóra írjuk le, akkor a következő egyenletet kapjuk:

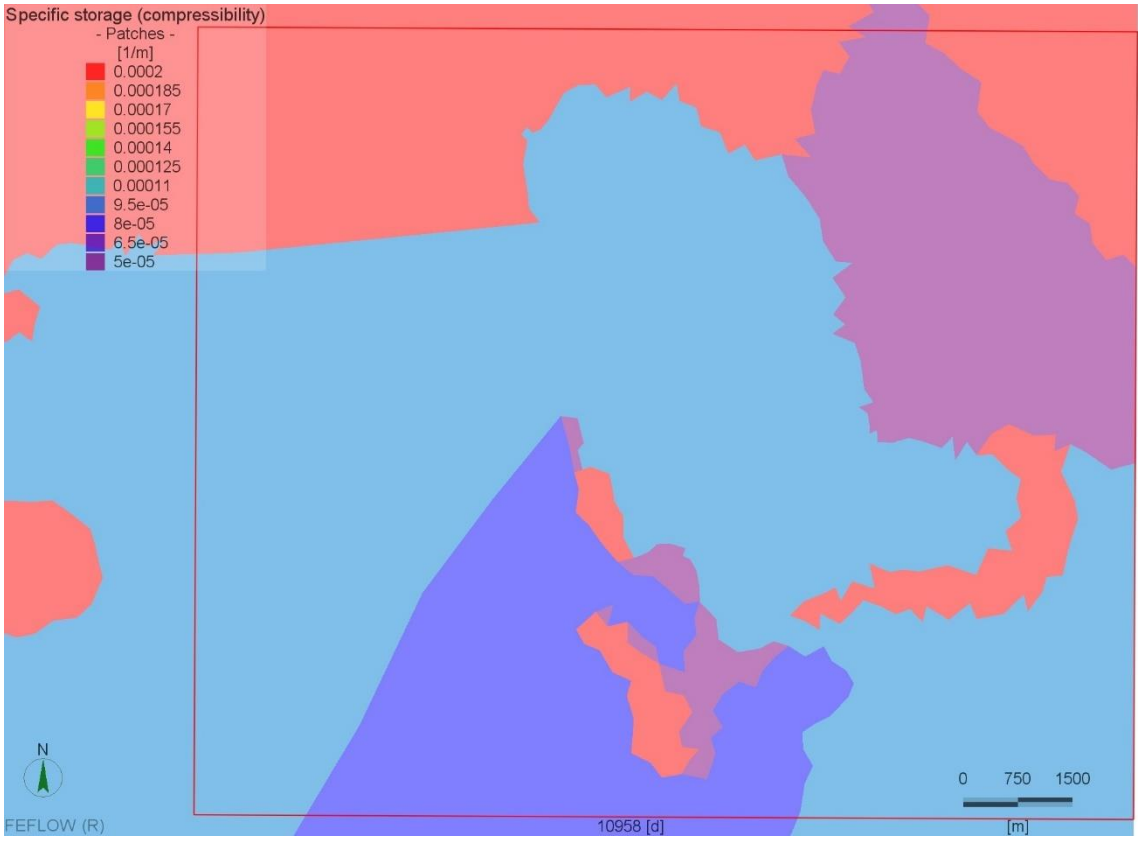
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T}\frac{dh}{dt}$$

ahol S: a tározási tényező [-], T: a transzmisszivitás [m^2/s]

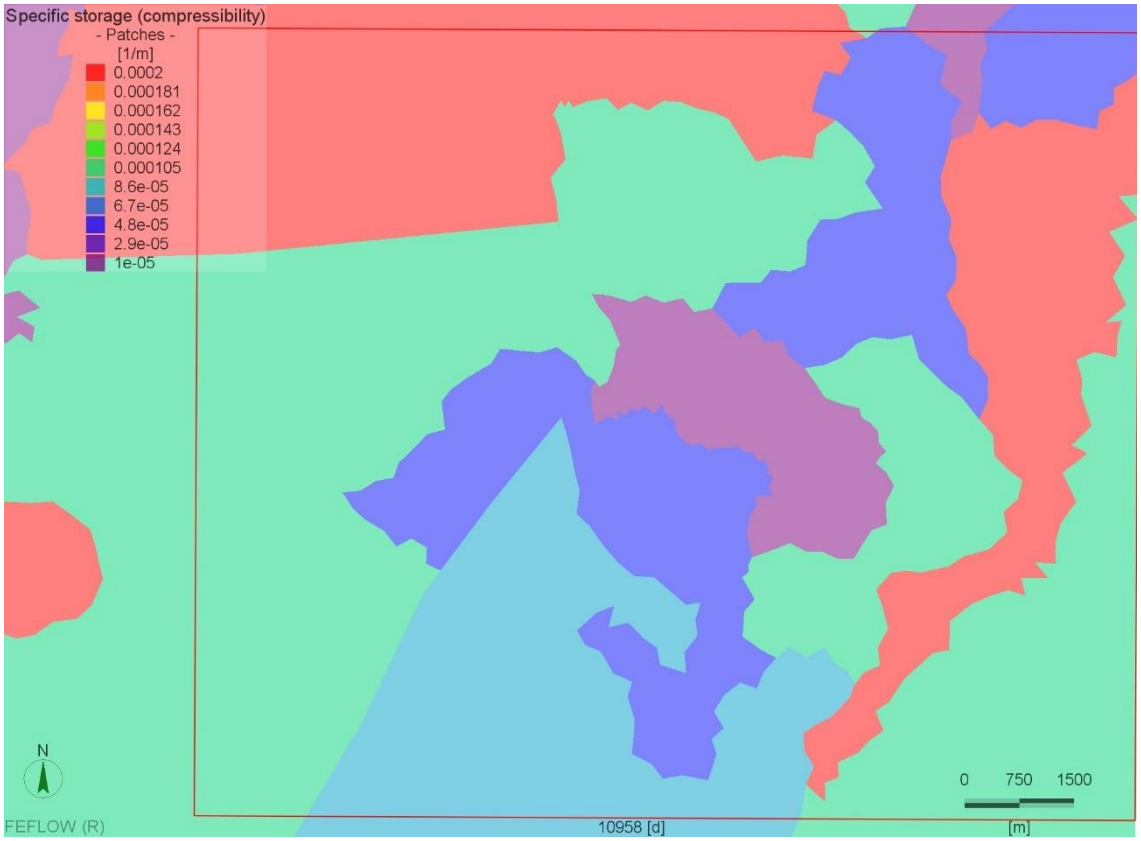
Első lépésben a fajlagos tározás értékeket irodalmi adatok alapján számoltuk ki a Dunántúli-középhegység regionális modell bemeneti paramétereihez [3]. A fajlagos tározás számításához szükséges, kőzetre jellemző teljes porozitást a T-JAM [13] alapján, míg a közeg kompresszibilitását (α) *Domenico & Schwartz, 1990* [6]szerint határoztuk meg. Ezeket a kalkulált értékeket használtuk fel később a lokális modell kezdeti értékeinek, majd a kalibráció során pontosítottuk azokat. A fajlagos tározás értékek elkülönítése részben hidrosztratigráfiai egységek alapján történt, azonban bizonyos esetekben – elsősorban karbonátos képződményeknél – adott képződménynél akár kis távolságon belül is valamelyest eltérő értékeket adtunk meg. Ennek oka, hogy a karbonátok fajlagos tározási képessége széles skálán változhat, hiszen az eltérő mértékű utólagos hatások (karsztosodás mértéke, szerkezeti mozgások, stb.) befolyásolják a kőzetestek hidraulikus tulajdonságát. A 7. rétegtől nincs képződménybeli elkülönítés a fajlagos tározásban. A numerikus modellben a kalibrálás után kapott tározás eloszlását a ***35-40. ábrák*** szemléltetik.



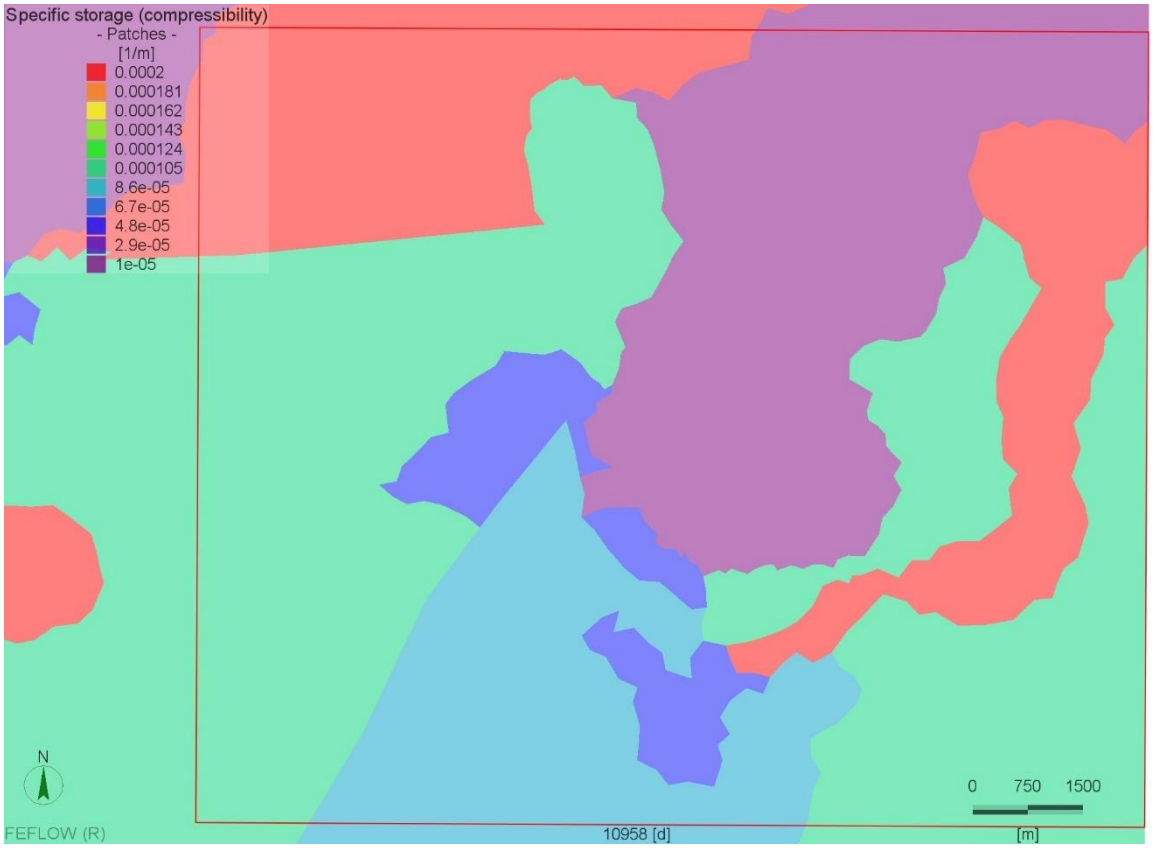
35. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



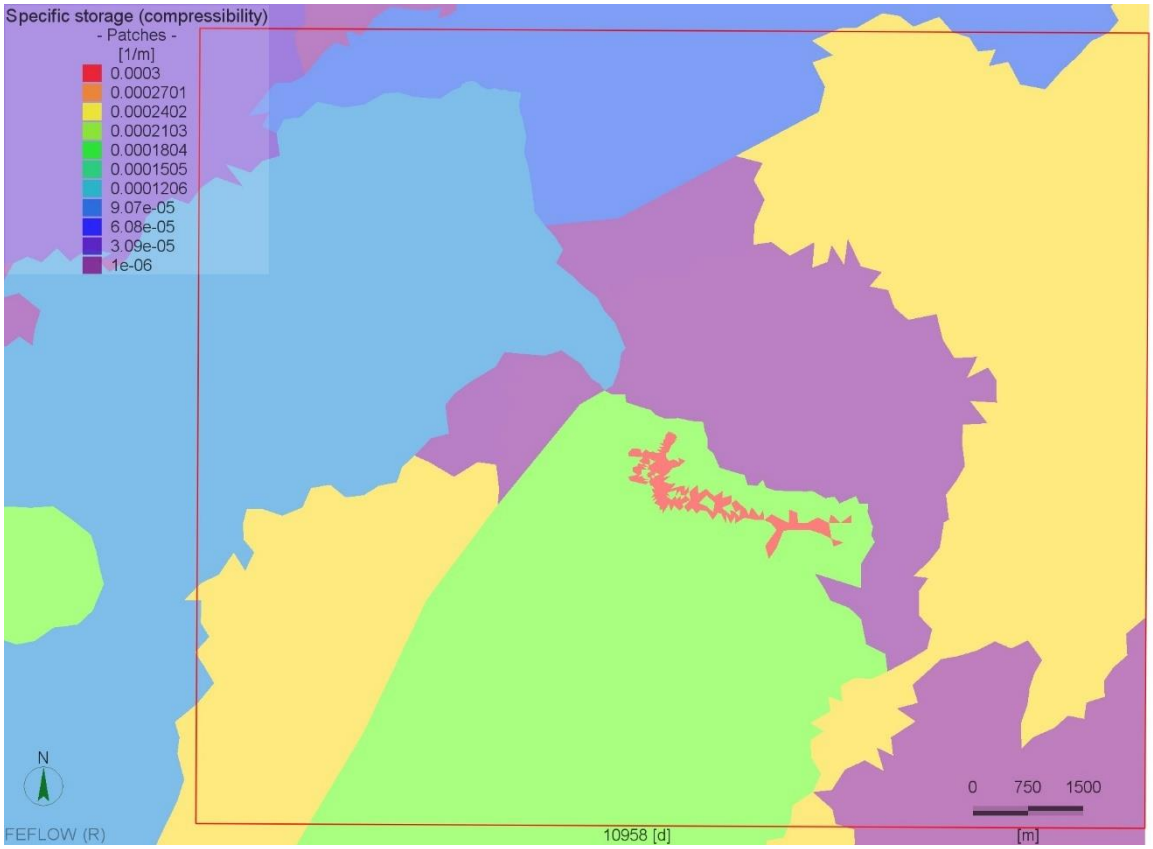
36. ábra: A 2. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



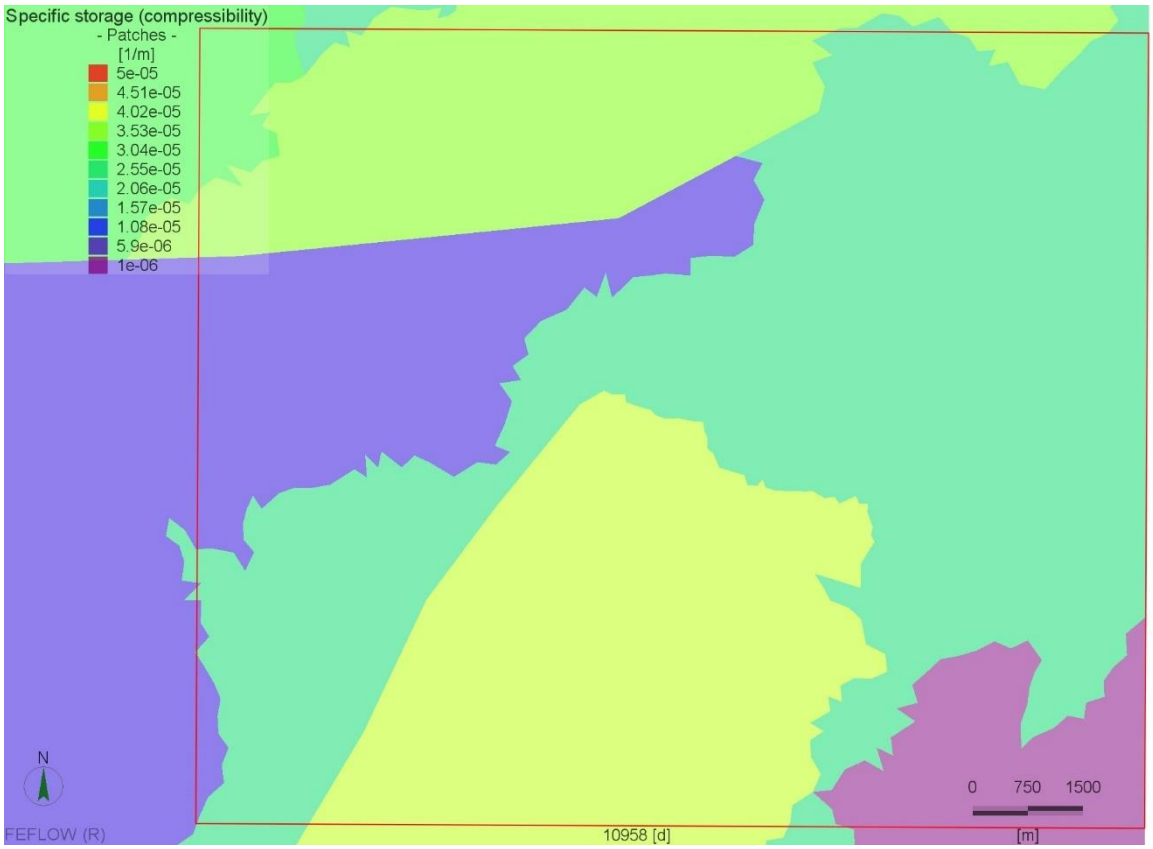
37. ábra: A 3. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



38. ábra: A 4. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



39. ábra: Az 5. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



40. ábra: A 6. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás

3.3.3 Beszivárgás a numerikus modell felszínén

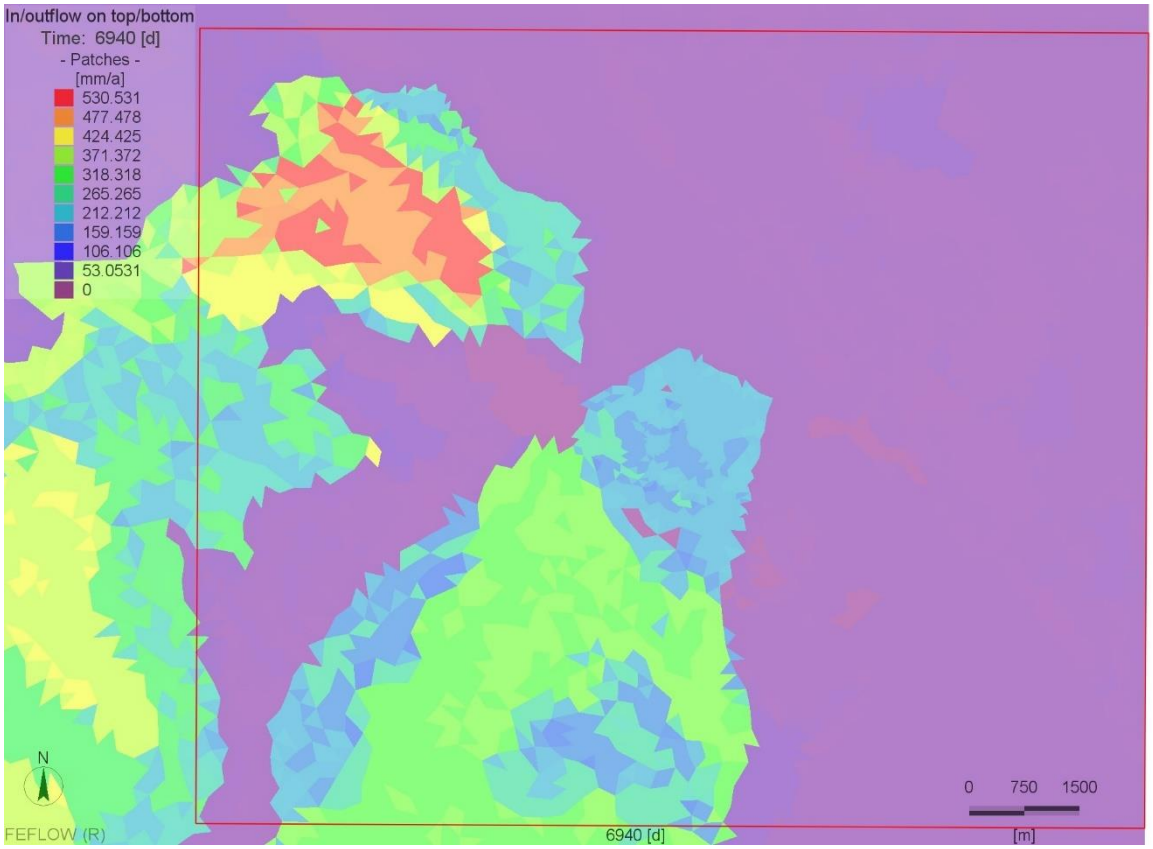
A beszivárgást a WHI UnSat Suite szoftvercsomag HELP moduljának felhasználásával számítottuk. Ennek módszertanát és eredményeit részletesen a Dunántúli-középhegység regionális modellezés jelentésének *I. kötet/3.1. fejezetében* mutattuk be [2]. Az I. kötetben bemutatott beszivárgás számítást a teljes regionális modellezési területre, a hideg és a termál karsztvíztestek felszínére elvégeztük. A HELP szoftverrel számított beszivárgás nem a karsztvíztárolóba beszivárgott mennyiséget adja meg, hanem a felszínen beszivárgott mennyiséget.

A nyílt karsztos területeken a felszíni beszivárgás megegyezik a karsztvíztárolóba történő beszivárgással. A fedett területeken csak a felszínen beszivárgó csapadék egy hányada jut el a karsztvíztárolóba. Ennek mennyisége eltérő a természetes áramlási rendszerben, és a bányászati víztelenítés időszakában, amikor a rendelkezésre álló irodalom arról számol be, hogy a fedő kőzeteket is szárazra szívták. Vagyis a hideg karsztvíztestek felszínén fontos, hogy egy időben változó beszivárgás értéket adjunk meg a fedő kőzetekre is. Így a lokális modellterületen beszivárgás szempontjából elkülönítettük a fedett és a fedetlen területeket. A nyílt karsztos területeken első megközelítésben a szoftver által számolt értéket, míg a fedett területeken a kalkulált értékek 10%-át adtuk meg. A modellterületen megtalálható kisebb tavak területén a beszivárgás 0 mm/év értékkel lett megadva.

A beszivárgás kiszámítása a Dunántúli-középhegységben található csapadékállomások adatai alapján készült, melyek azonban nem reprezentálják teljes egészében a középhegység minden részegységének beszivárgási sajátosságait. Ez alapján a HELP szoftver által kapott értékeket kalibráció során arányosan változtatni kellett bizonyos területeken, ha a modellezett karsztvízszintek nem adták ki a területre jellemző mért értékeket.

A fehérvárcsurgói modellterületen két fő beszivárgási területet tudunk elkülöníteni. A modellterület déli részén megtalálható nagy kiterjedésű nyílt karsztos térrészt, valamint a modell Ny-i részén, a Tési-fennsíkhoz kapcsolódó nyílt karsztot. A két terület beszivárgás szempontjából nem azonos zónába sorolható, míg a Tési-fennsíkon történő beszivárgás kiszámításához a bakonynánai meteorológiai állomás adatait használtuk fel, addig a Kincsesbányától délre található területeken a sólyi meteorológiai állomás lett figyelembe véve. A Tési-fennsíkot viszonylag nagy mennyiségű csapadék éri el, ezzel összhangban a területet megnövekedett beszivárgás jellemzi. A kalibráció során szükségessé vált a HELP szoftver által erre a területre számolt értékeket az itt található megfigyelő kutak vízszintértékei alapján tovább növelni. Ezt a vízszintnövelés több lépcsőben végeztük el olyan módon, hogy először a Tési-fennsíkhoz tartozó teljes beszivárgási felületen (nyílt karszt) a megadott érték 120%-át vettük. Ezt követően pedig már nem az egész nyílt karszton, csak annak a magasan fekvő részei által körül határolt poligonon belül a kevésbé csapadékos évek (pl.: 2011) beszivárgás értékeit további 120%-kal növeltük. A Kincsesbányától délre található nyílt karsztos területeken a HELP szoftver által számított érték lett megadva.

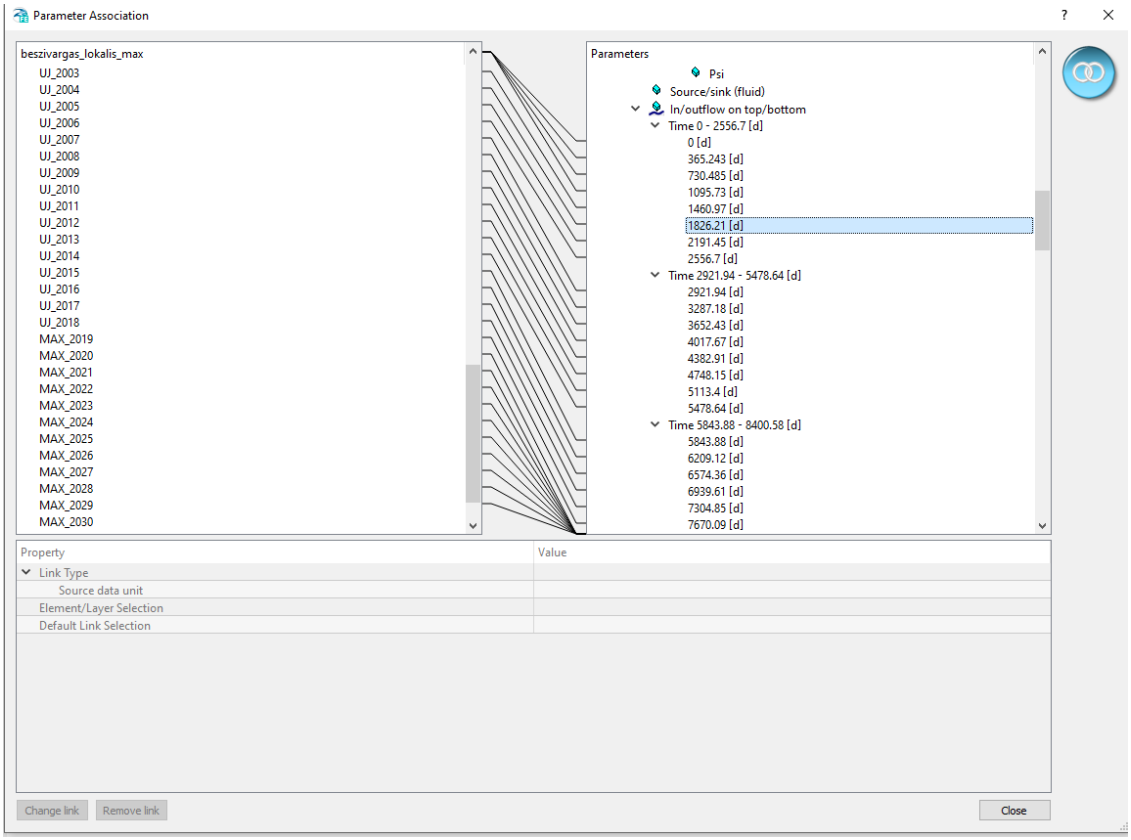
A beszivárgást az 1. numerikus felszínre adtuk meg, a cellák teljes területére, „inflow on top” paranccsal (***41. ábra***).



41. ábra: A 2018-as év végére számolt beszivárgás a numerikus modellben

A HELP szoftverrel napi beszivárgást számítottunk, így tetszőlegesen számítható havi, illetve éves mennyiség. A tranziens modellben a beszivárgást éves időlépcsővel adtuk meg a 2000 és 2030 évek között.

Az ***42. ábra*** szemlélteti azt a transzformációs lépést, amelyet az adatbázison kell elvégezni ahhoz, hogy a modellben fel lehessen használni a beszivárgás értékeit. A szoftver az éves időlépcsők közötti időkre lineárisan interpolálja az értékeket.



42. ábra: A különböző évekre számított beszivárgás értékek kapcsolása a tranziens modellben

3.3.4 A diszkrét elemek a numerikus modellben

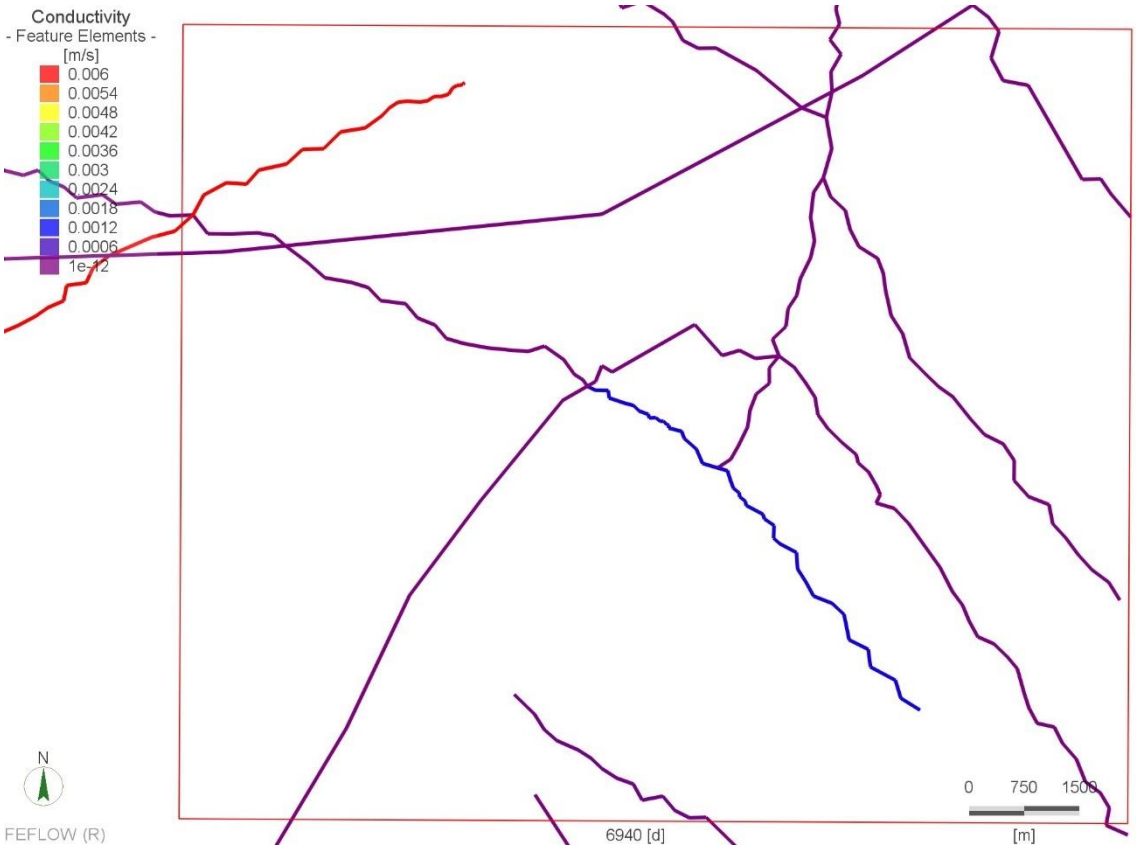
A dunántúli-középhegységi áramlások szimulációja nem készíthető el a térségre jellemző vetőrendszerek leképezése nélkül. A szerkezeti felépítéshez a MÁFI M=1:500 000 méretarányú Magyarország prekainoozos földtani térképét [15], valamint a pretercier földtani térképet [16] használtuk.

A vetők a teljes modellt átszelő 2D-s vertikális elemekkel adtuk meg. A paraméterezés első lépésben a ***7. táblázatban*** összefoglaltak alapján történt meg. Az 1D- és 2D-s elemek hidraulikai paramétereinek meghatározása, szintén kalibrációs feladat volt. Ennek eredményeként a vetők vastagság és szivárgási tényező értékei a megfelelő vízszinteloszlás kialakítása szerint változtak, így a különböző vetők vastagsága 0,001-10 méter között változik.

A vetők hidraulikai szempontból rendkívül eltérő módon viselkedhetnek (akár egyazon szerkezeti elemen belül), így a kalibrált modellben a vetők szivárgási tényező értéke is széles skála között mozog. Hidraulikai szempontból megkülönböztetünk vezető és záró vetőket. Az elnevezés a kőzetvázhoz képesti viszonyukat jelöli. A vezető vetők koncentráltabb áramlást biztosítanak. A záró vető megoszthatja az egyébként hidraulikailag egységes részeket. A vetők viselkedése függ attól is, hogy az áramlási irányra párhuzamosak vagy merőlegesek. Nem csak a különböző vetők rendelkezhetnek különböző paraméter értékekkel, de egyazon vetőn a mélység függvényében is viselkedhet hidraulikailag eltérő módon, így ez alapján, ahol szükséges volt különböző paraméter értékekkel láttuk el a szerkezeti elemeket (***43. ábra***).

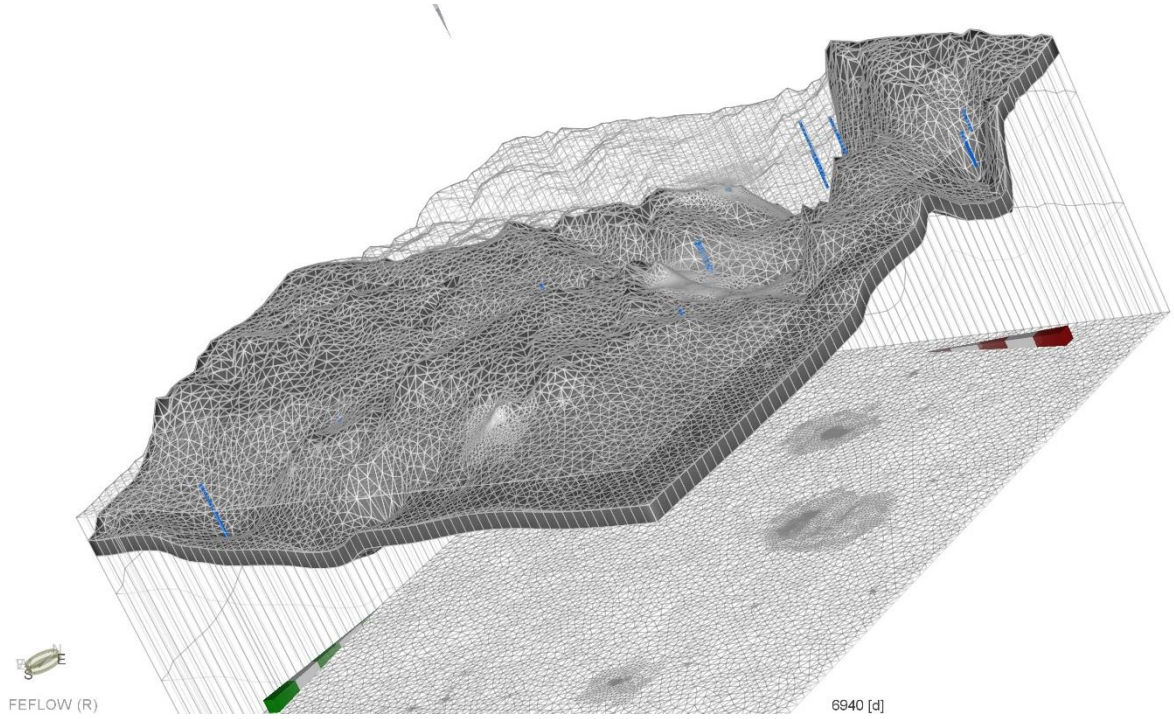
7. táblázat: A szerkezeti elemek hidraulikai paraméterei

Paraméter	Érték
Keresztmetszet (1D)	1-3 m^2
1D-s elem szivárgási tényezője	$1*10^{-4}$ m/s
Vető szélesség (2 D)	0,001-10 m
Vető szivárgási tényezője	$6*10^{-3}$-$1*10^{-12}$ m/s



43. ábra: A numerikus modellbe beépített vetők szivárgási tényező értékei az 5. rétegben

A numerikus modellben modellezés technikai megoldásképpen 1D-s elemek használatával teremtettük meg a közvetlen kapcsolatot az 1. numerikus felszínre definiált források (***3.4.1. fejezet***) és a főkarsztot képviselő 5. réteg között (***44. ábra***).



44. ábra: A numerikus modellben a források összekötése az 5. rétegig 1D elemmel
Sötét szürkével az 5. réteg látható

3.4 Peremfeltételek a numerikus modellben

A modellnek a környezetével való kapcsolatát a peremfeltételeken keresztül adjuk meg. A perem lehet adott hozamú - ennek egy speciális esete, amikor nincs keresztáramlás, „no-flow boundary”, illetve adott nyomású.

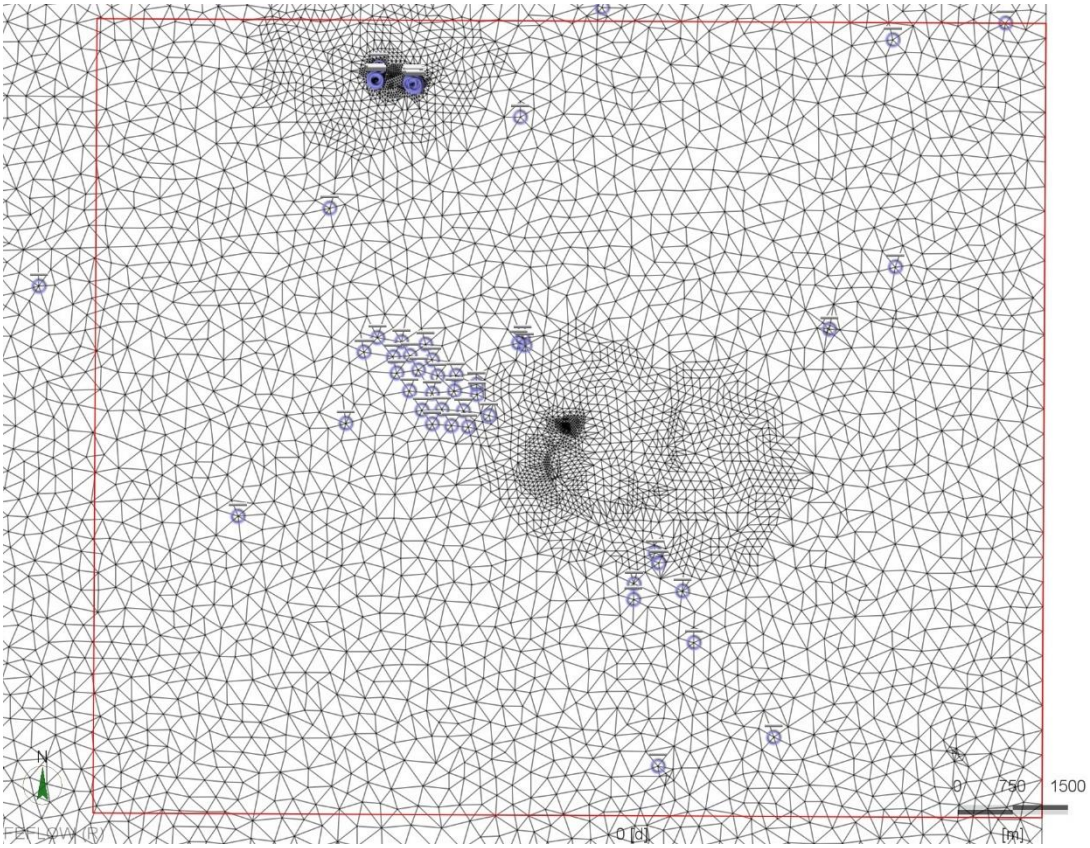
A modellezett területen természetes megcsapolók a források, vízfolyások, patakok, melyeket kötött peremként adtunk meg. Így a megcsapolódó vízhozamot a program számítja a vízszint, a fakadási szint és az átszivárgási együttható alapján. Mesterséges megcsapolóknak a kutas vízkivételeket tekintjük.

A peremfeltételeket megadása során a potenciálszintek mellé alsó és felső hozamkorlátot, a hozamszintek mellé pedig alsó és felső potenciálkorlátot is meg lehet adni, ahol a peremfeltételhez tartozó csomópont csak addig működik az előírásnak megfelelően, amíg a hozzá kötött változó értéke a megadott tartományban van. Ilyen módon lehetséges pl. előírni, hogy az adott potenciálszintű forráskilépések esetén csak kiáramlás legyen a modellben.

3.4.1 1. típusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel

A modellterület felmért forrásait fakadási szintjeikkel határoztuk meg az 1. numerikus felszínre, azzal a kitétellel, hogy mindenképp kifolyóként kell viselkedniük. A modellterületen lévő nagyobb állóvizes területként adtuk meg a fehérvárcsurgói víztározó szintjét, amely a 10 m-es ddm alapján került meghatározásra. A termelő forrásvízműveket szintén fakadási szintekkel definiáltuk. A kincsesbányai homokbánya tavait, szintén megadtuk a modellben a 10 m-es ddm alapján. A modellterület északi pereménél elhelyezkedő bodajki Tó-forrást és a Nádastavi-forráscsoportot szintén 1. típusú peremfeltétellel határoztuk meg a 10 m-es ddm alapján, több rácspontban. A bodajki Tó-forrás szintje ~145 mBf, míg a Nádastavi-forráscsoport 141 mBf-es szinten fakad (***45. ábra***).

A modell oldalsó peremeihez nem rendeltünk peremfeltételt, azokat zárt peremként adtuk meg. A modell aljára – a nagy mélység miatt feltételezve, hogy ott a vertikális vízforgalom már elhanyagolható – nem határoztunk meg peremfeltételt, tehát a modell alulról is zárt.



45. ábra: A numerikus modellben szereplő 1.típusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel

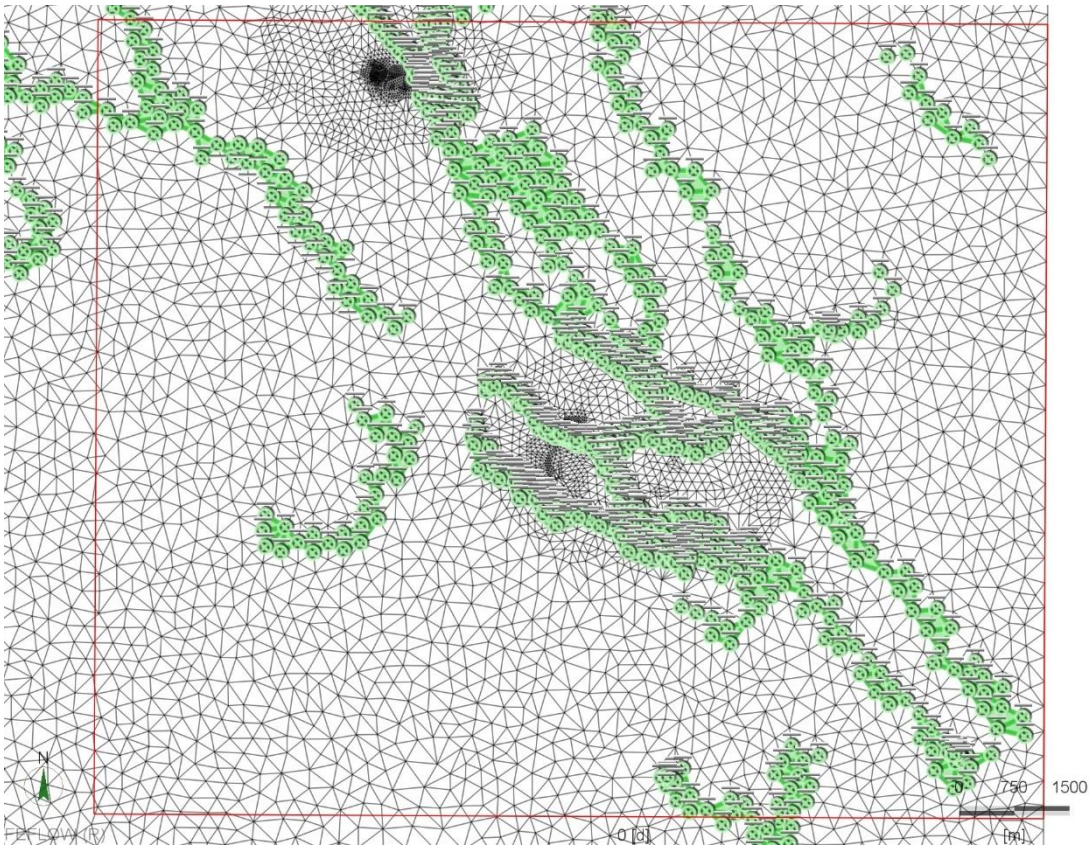
3.4.2 3. típusú (Transfer)-Cauchy peremfeltétel

A vízfolyások vonalas objektumokként kerültek be az 1. numerikus felszínre. A patakok és folyók csomópontjait úgynevezett puha peremmel adtuk meg (Transfer), melyekhez egy referencia vízszintet határoztunk meg. A kisvízfolyások referencia vízszintjét a 10x10 m-es DDM alapján adtuk meg (***46. ábra***).

A területen található legtöbb vízfolyás utánpótlódik a felszín alatti vízből. Ez alapján a kontrollálatlan hozambeáramlás miatt a peremfeltételt korlátoztuk, a legtöbb esetben csak fakadást engedélyeztünk. Az átszivárgási együttható egységesen 0,04 1/nap.

A vizsgált terület jelentős vízfolyása a Gaja-patak, amely hidrológiai szempontból azért is érdekes, mert részben nyílt karsztos területen halad át, aminek következtében a vízfolyás egy szakaszán a felszíni víz beszivárog a karsztvízbe, ezzel közvetlenül megemelve annak szintjét. A Gaja-patakot nemcsak a főkarsztból eredő források táplálják, hanem számos, a fedőkarsztból eredő kisebb forrás és vízfolyás. A Gaja-patakot nemcsak a főkarsztból eredő források táplálják, hanem számos, a fedőkarsztból eredő kisebb forrás és vízfolyás. Az elnyelődésre vonatkozó mennyiségeket a Smaragd GSH 2014 évi mérései alapján becsültük [1]. Ekkor a Gaja-patak hozama a patak felső szakszán a Gaja-szurdok völgye előtt 20 200 m^3/nap volt. A Gaja-szurdokban a patak elnyelődik a fődolomitból

álló karsztos felszínen, a patak alsóbb szakaszán végzett második mérés kisebb, 12 344 m^3/nap hozamot mutatott. (***46. ábra***).



46. ábra: A numerikus modellben szereplő 3. típusú (Transfer)-Cauchy peremfeltétel

3.4.3 4. típusú (Well)-Kút peremfeltétel

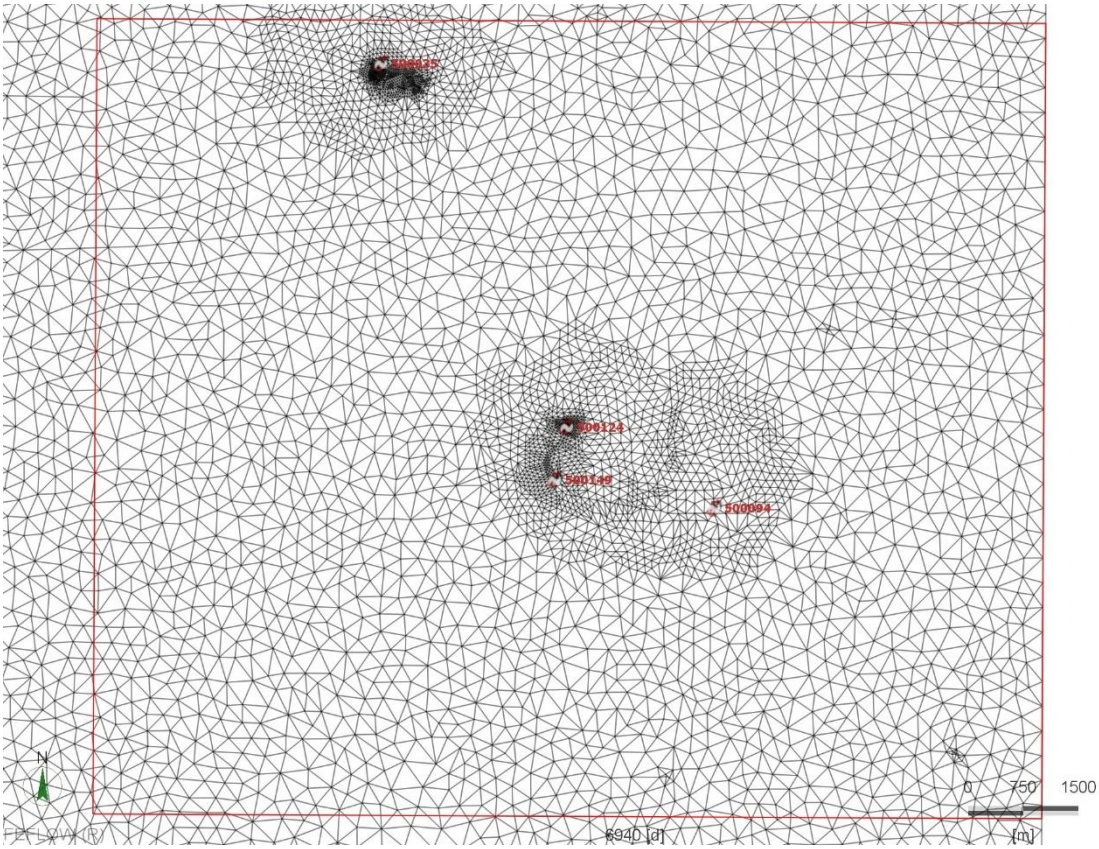
A termelő kutakat adott hozamú peremekként határoztuk meg (Well). A modellezés során az éves vízkivételeket m^3/nap-ra leosztva adtuk meg.

A numerikus modellben a következő termelőobjektumok szerepelnek:

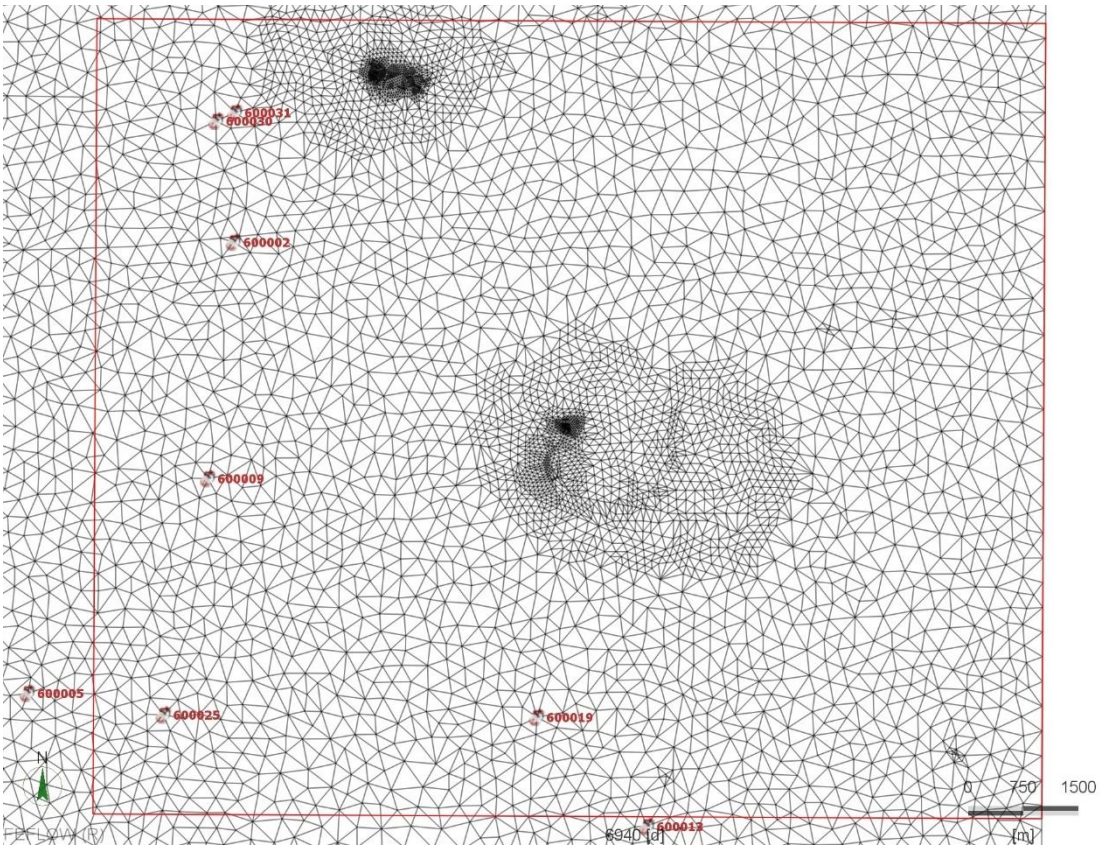
- A karsztot, illetve a fedőt megcsapoló termelőobjektumok, amelyekből van termelési adat 2003-2020 között.

A főkarsztvíztárolót megcsapoló objektumok termelését megadó peremfeltételek az 5 és 6. numerikus rétegekbe kerültek beépítésre (***47-48. ábra***).

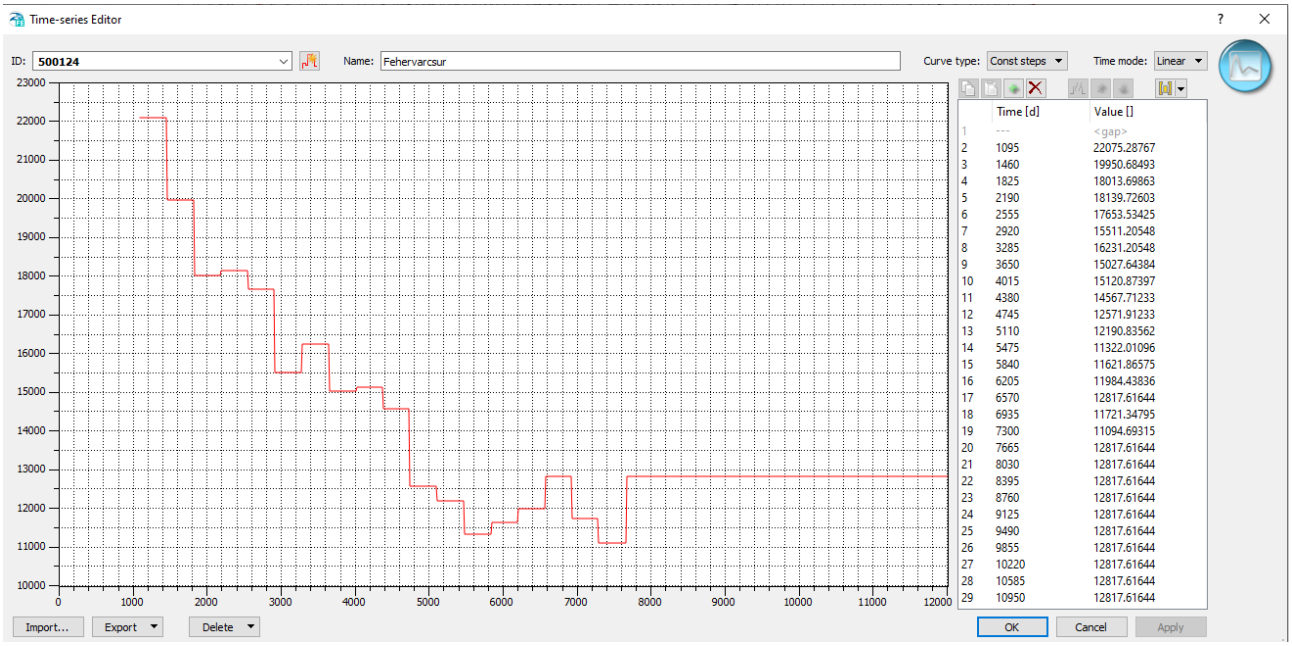
A tranziens modellben a vízkivételeket éves időlépcsővel, lépcsős függvénnyel definiáltuk (***49. ábra***). Ez azt jelenti, hogy az adott évre megadott termelést a rákövetkező évig tartja a modell. Azokat az időszakokat is figyelembe vettük, amikor a kutak nem termeltek. A regionális modellhez képest (a regionális modellnél a termelési adatszolgáltatás 2018 év végével zárult) termelési idősorokat kiegészítettük a VIZIG 2019-2020 adatszolgáltatásával, azonban a prognosztizált időszakra a kutak a 2018. évi tényleges vízkivételével kalkuláltunk, akárcsak a regionális modellben.



47. ábra: A főkarsztot (5. réteg) megcsapoló termelőkutak a numerikus modellben



48. ábra: A főkarsztot (6. réteg) megcsapoló termelőkutak a numerikus modellben



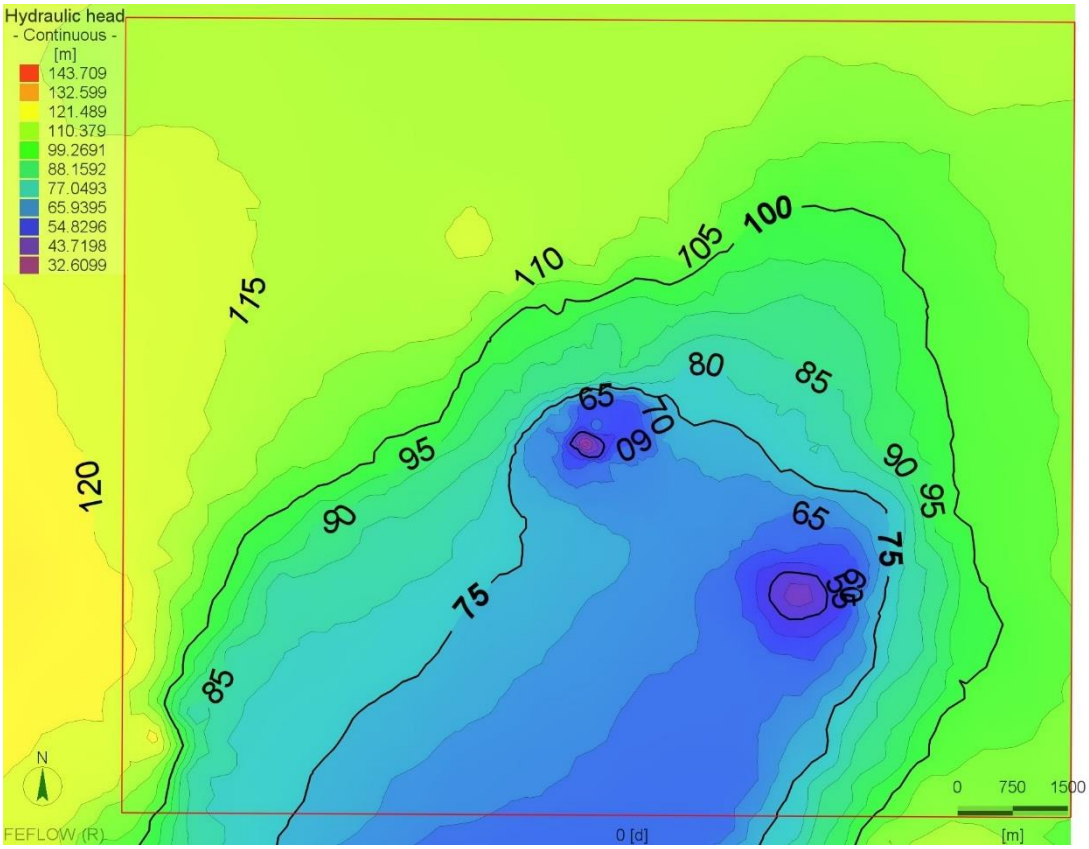
49. ábra: A vízkivételek modellbeli leképezése a rákhegyi vízakna példáján

3.5 A tranziens modellezés

3.5.1 A tranziens modellezés kezdeti feltételei

A projekt feladatkiírása szerint a tranziens modell kezdeti időpontja 2003. január 1. Tranziens modellek esetén azonban a futtatás kezdeti időszakában a kapott modellezett értékek bizonytalanok lehetnek, így célszerűnek láttuk a futtatási időszak 2000.01.01-2030.01.01. közötti időszakra történő kiterjesztését. A kapott adatok értelmezése ugyanakkor a megjelöltek szerint 2003-tól kezdődően történt meg.

A lokális tranziens modell kezdeti vízszintjeinek meghatározása az elkészült Dunántúli-középhegység regionális modell eredményeire épül. A kezdeti vízszintek a regionális modell kötött vízszintekkel futtatott verziójának 2000.01.01-re kinyert vízszinteloszlás értékeit tartalmazza (***50. ábra***). Ez alapján modellben megadott összes monitoring kút vízszintje a bennük mért vízszint értéknek felel meg, a közöttük lévő vízszinteloszlást a modell kalkulálja.



50. ábra: A tranziens modell kezdeti (2000.01.01) vízszinteloszlása az 5. rétegben

3.5.2 A tranziens modell időléptéke

A tranziens modell havi időlépcsőnkét számítja és jeleníti meg az eredményeket, ebbe a szökőéveknek megfelelő bontás is beletartozik. Tehát a numerikus modell összesen 361 időpontra végzi el a számítást, 2030 január 1-ig. Az előzőekben már említettük, hogy 2000. január 1 a modell kezdeti, azaz 0. időpontja, a 2019 január 1-e pedig a modell 6940. napjának felel meg.

3.5.3 A numerikus modell kalibrálása

3.5.3.1 A karsztvízszint kalibrálása a 2019 állapotra

A Csór-Fehérvárcsurgó-Bodajk összevont modellterületen 11 db karsztvízszint megfigyelő kút található. Ebből 6 db esik Fehérvárcsurgó lokális modellterület határán belülre, valamint Isztimér-3 kút ugyan a modellterület határán kívül található, de annak viszonylagos közelségében (***51. ábra***).

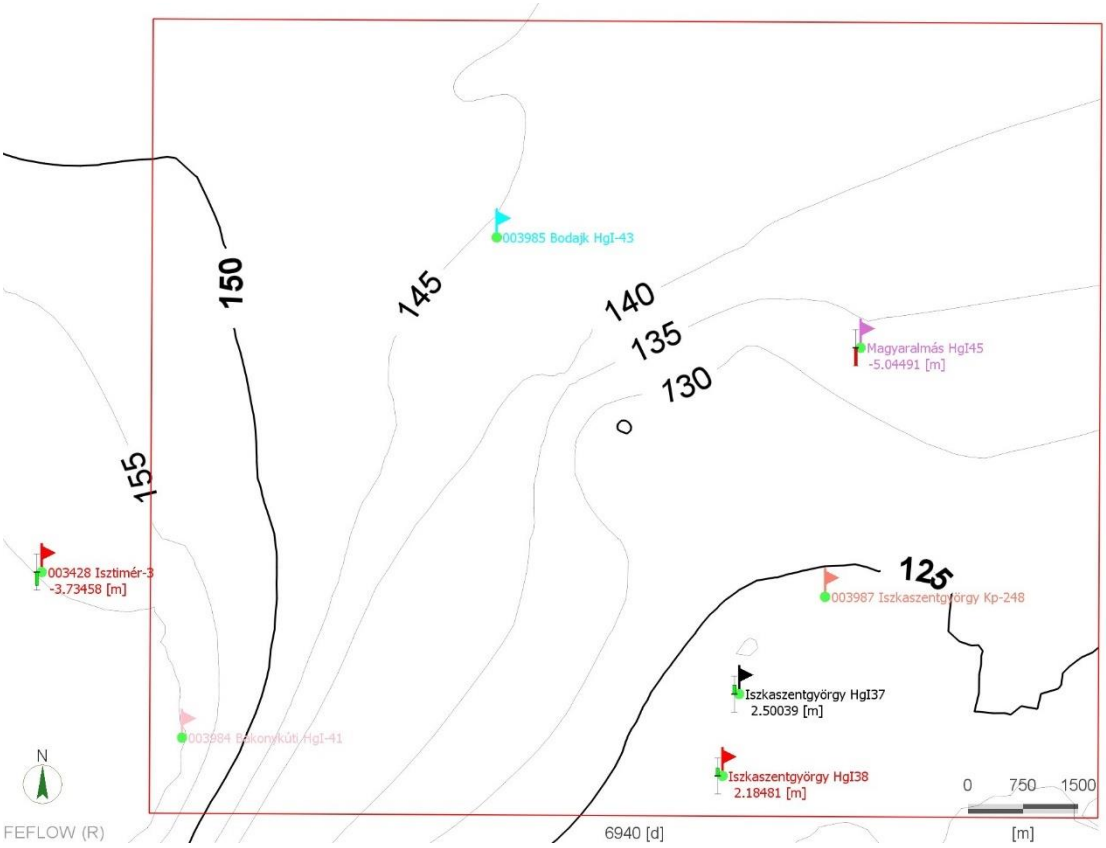
A Csór-Fehérvárcsurgó-Bodajk összevont modell a három lokális modell (Csór, Fehérvárcsurgó, Bodajk) területét teljes egészében magába foglalja. Mivel 1-1 lokális modell területen meglehetősen kevés monitoring kút található, célszerűnek láttuk az összevont modell egységes kalibrálását az itt található mind a 11 db kút bevonásával, a kalibrálás és az eredmények azonban lokális modellterületenként kerülnek bemutatásra. A Fehérvárcsurgó lokális modellterületen található monitoringkutak kalibrálási idősorát a ***4. fejezet*** tartalmazza.

A mért vízszinteket havi időlépcsővel hívtuk be a modellbe, minden hónap első mért értéke került be. A tranziens modell kalibrálását a 2019-es januári állapotra végeztük el. A területen található 3 db

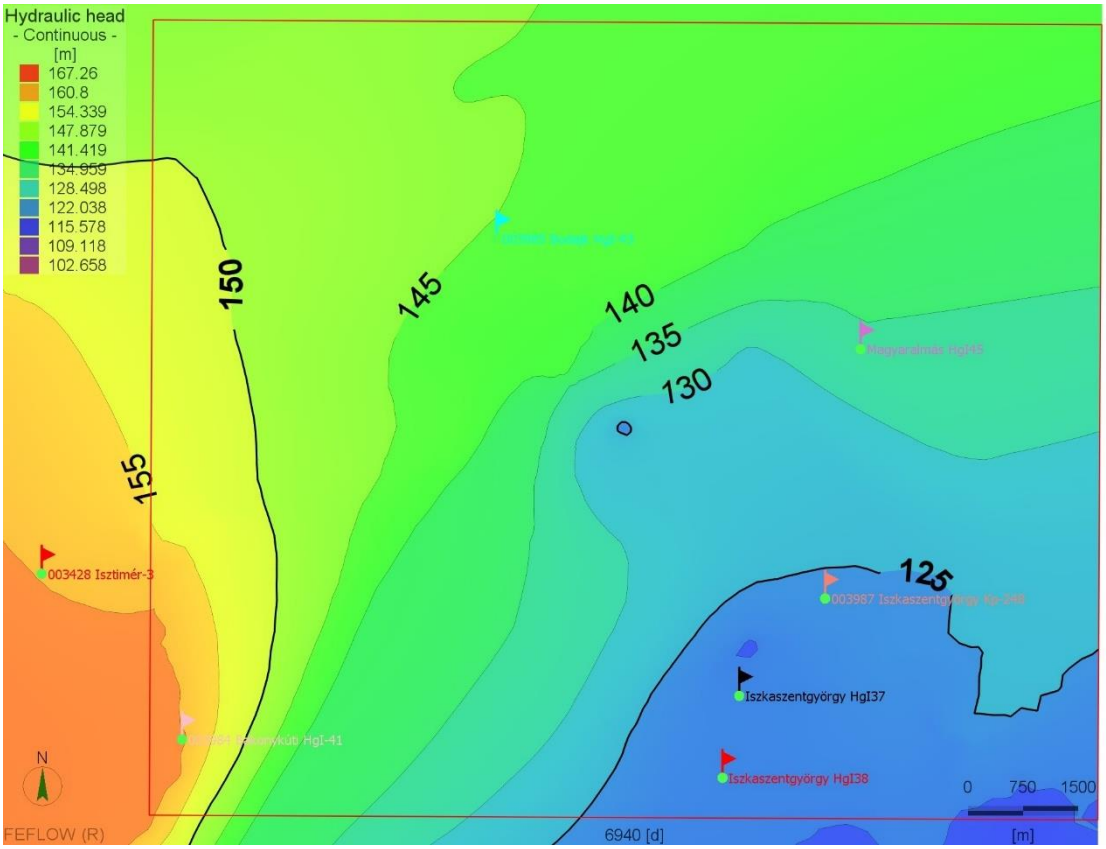
kútból (Bodajk HgI-43, Bakonykúti HgI-41 és Iszkaszentgyörgy Kp-248) nem rendelkezünk 2019. januári eleji mért adattal, így annak kalibrációja 2018. novemberre történt meg.

A 2019-es állapotra modellezett karsztvízszintet a ***52. ábra*** mutatja.

Az egyes monitoring kutakban mért és számított vízszint összehasonlítását a 2019-es állapotra a ***8. táblázat*** mutatja be. Ezek alapján Fehérvárcsurgó lokális modellterületen és annak közvetlen környezetében a modellezett karsztvízszint a kutakban átlagosan 3,02 méterrel tér el a mért vízszintektől.



51. ábra: A lokális modellterületen található monitoring kutak elhelyezkedése és a modellezett-mért vízszintek eltérése 2019. január 1-i állapotra



52. ábra: A numerikus modell számított vízszinteloszlása 2019. január 1-i állapotra (mBf)

8. táblázat: A mért és modellezett vízszintek a megfigyelőkutakban a kalibráció időpontjában

Kút	Mért vízszint (mBf)	Modellezett vízszint (mBf)	Különbség
3985 Bodajk HgI-43	147.35	144.66	-2.69
Magyaralmás HgI-45	138.58	133.53	-5.04
3987 Iszkaszentgyörgy Kp-248	120,27	124,37	+4,10
Iszkaszentgyörgy HgI-37	118,73	121,23	+2,50
Iszkaszentgyörgy HgI-38	119,07	121,26	+2,18
3984 Bakonykúti HgI-41	159,91	160,83	+0,92
3428 Isztimér-3	163,58	159,85	-3,73

A mért és számított vízszintek közötti eltérések részben a lokális modellezési terület felbontásából (rácsháló, DDM), a beépített különböző információk sűrűségéből, azok helyességéből és a modellezésnél elkerülhetetlen egyszerűsítésekből, pontosabban az ezek közötti ellentmondásokból adódik.

Például, míg a valóságban, a kutakban a vízszintet cm-es pontossággal mérik, és két kút közötti távolság gyakran a 10 km-t is eléri, a modellben több száz m-es léptékű a rácsháló és 10 m-es a domborzatmodell felbontása. Ez azt jelenti, hogy a kutak közötti adatoknál – réteg elhelyezkedése, szivárgási tényező, fajlagos tározás – felbontás csökkentést, míg a vízszintnél felbontás növelést kell alkalmazni, hogy hozzá lehessen rendelni a rácshálóhoz. (A végeselem módszernek épp ez az előnye a véges differenciával szemben, de ennek is megvannak a határai. Például, cm-es rácshálót nincs értelme egy kút köré tenni, aminek dm-es a nagyságrendje.)

Nyílt karsztos területen a karsztvízszintek kalibrálása kifejezetten nagy kihívást jelenthet. Ezeken a területeken a vízszintek alakulását a beszivárgás közvetlenül befolyásolja. A hirtelen csapadékesemények ezeken a területeken mutatkoznak a legmarkánsabban a vízszint idősorokban, mely így a karsztvízszintek nagyon hirtelen és nagymértékű megváltozását eredményezheti. A vízszintek mérése azonban nem folyamatos, így a vízállásról csak pillanatnyi információt kapunk. A numerikus modell időlépcsője viszont havi léptékű, így a hirtelen változások leképezésére nem alkalmas, elsősorban a karsztvíz hosszabb távú változásainak jellegére tudunk belőle következtetni. Ennek következtében egy megadott időpillanatra vonatkozó kalibráció némely esetben pontatlansággal terhelt lehet.

Összefoglalva az eltérés okai a következők lehetnek:

1. földtani/vízföldtani okok (pl.: ismerethiány, blokkos szerkezet, karsztvíz emeletek kis távolságon belül)
2. modellezési okok (pl.: rácsháló felbontása, paraméterezés, egyszerűsítés)
3. mért értékek helyessége/bizonytalansága/ellentmondása.

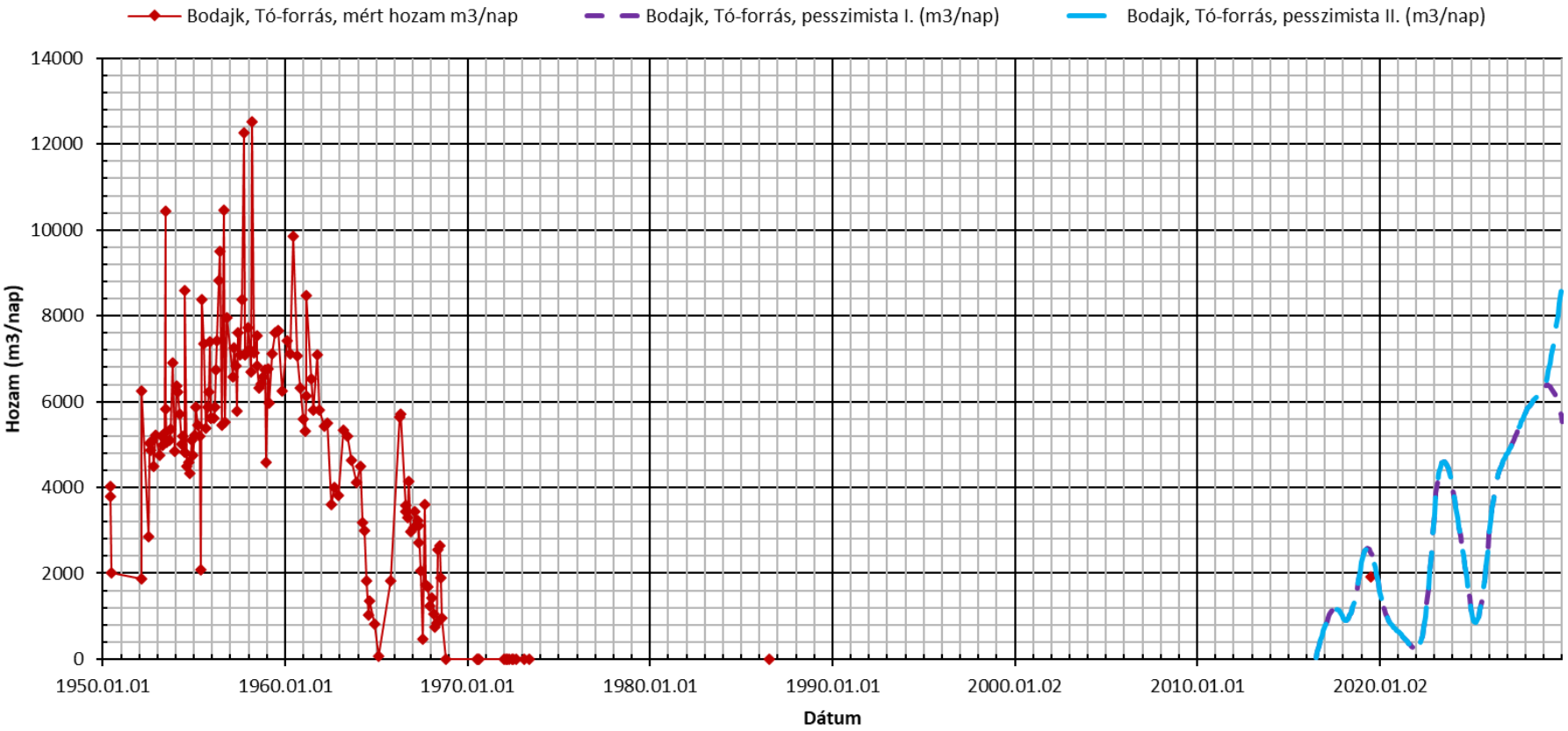
Az OVF a projekt keretében felülvizsgáltatja a monitoring kutak műszaki állapotát. Sajnos azonban ez a felülvizsgálat a modellezés befejezéséig nem valósult meg, így a kutak adatait csak az adatbázisokban szereplő értékekkel tudtuk figyelembe venni, elfogadva azt, hogy a kút műszaki állapota és bemért értékei megfelelőek.

A projekt egyik legfontosabb feladata a prognózis, különböző hidrometeorológiai viszonyok bekövetkezése esetén kialakuló állapotok vizsgálata, összehasonlítása. Az ilyen komparatív vizsgálatok során a modellek korábban felsorolt jellegű állandó hibái okozta hatások kiesnek, ilyen módon a modell a felvetett kérdésekre várhatóan jó és jól értelmezhető válaszokat fog adni. A modell „jóságát” az adja meg, hogy az eltérő jövőbeli állapotok esetére számolt eredmények milyen mértékben logikusak és milyen mértékben értelmezhetőek.

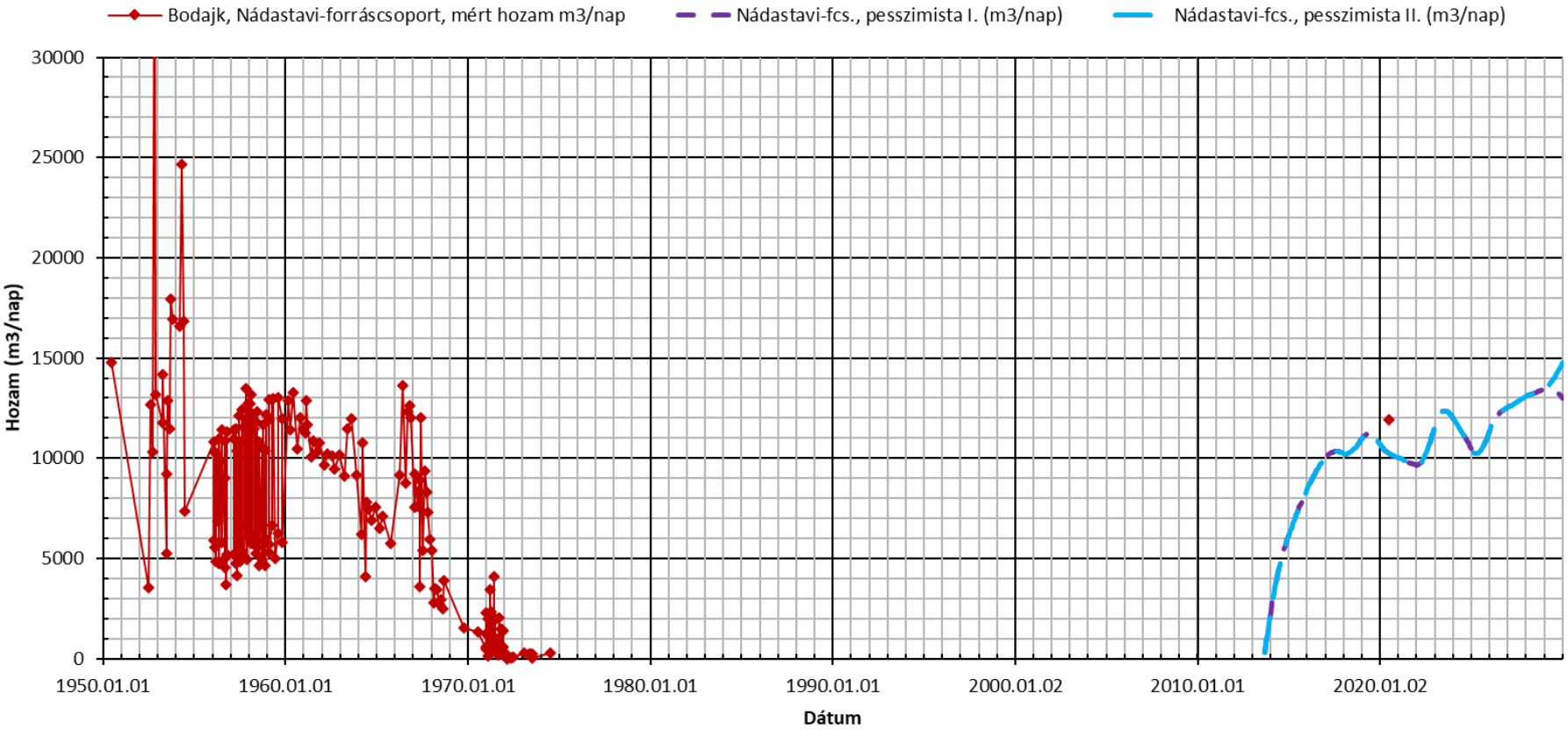
3.5.3.2 A forráshozamok kalibrálása a 2019 állapotra

A modellterület északi részén található két legjelentősebb forrása a bodajki Tó-forrás és a Nádastavi-forráscsoport, a kalibrációt erre a két forrásra végeztük el. A két forrás hozamára elsősorban Rákhegynél történt vízkivétel volt hatással. Ennek eredményeként következett be 1968-ban a Tó-forrás, míg 1975-ben a Nádastavi-forráscsoport elapadása. A forráshozamok mért idősorát, valamint a modell által számított hozamértékeket a ***53***. ábra-***54. ábra*** mutatja. A két nevezett forrásban az 1970-es években megszűnt a rendszeres hozammérés és a források újra fakadását követően sem indult újra. Ennek következtében 2019-ből csak 1 db, a forrásfelmérés során felvételezett mért értékkel rendelkezünk, mely erősen függ az aktuális időjárási viszonyoktól.

A kalibrációs görbe lefutása a vízkivétel kezdeti szakaszában mért vízhozam idősorral összehasonlítható. A görbéken látszódik, hogy a Tó-forrás hozamát nagyobb ingadozás jellemzi, az a beszivárgás mennyiségétől erősen függő. A Nádastavi-forráscsoport egy nagyobb és sokkal stabilabb alaphozammal rendelkezik, mely az 1970 előtt mért és az újrafakadás utáni időszakra a modell által számított hozamértékek alapján is megfigyelhető.



53. ábra: A bodajki Tó-forrás mért és számított hozamadatai



54. ábra: A Nádastavi-forráscsoport mért és számított hozamadatai

3.5.3.3 Az üzemi vízszintek kalibrálása a 2019 állapotra

A Fehérvárcsurgó lokális modellterület legfontosabb vízkivételi helye a rákhegyi vízakna. A rákhegyi vízakna üzemi vízszint adatait az OVF bocsátotta rendelkezésünkre 2005-2018 közötti időszakra az OSAP adatszolgáltatás alapján. Az utolsó mért üzemi vízszintadat 2018. decemberéből állt rendelkezésünkre, így a mért és számított adat összehasonlítása erre az időpontra történt meg. Az adatbázis alapján a mért üzemi vízszint 118,43 mBf volt, míg a modellel kalkulált érték 120,67 mBf. A mért és számított érték közötti eltérés 2,24 méter.

Fontos azonban megjegyeznünk, hogy az aknák területe egy emberi tevékenység által jelentősen módosított terület, így hidraulikai tulajdonságait tekintve jelentősen eltérhet az azt körülvevő földtani közegtől. A területen lezajlott fúrások és az akna létesítése nyomán kialakult üregekben a vízáramlás már nem lamináris, hanem turbulenssé válhat, melynek következtében a Darcy-törvény a 3 dimenziós modelltér ezen kis méretű részein már nem érvényes. A modellben az aknaterület leképezése úgy valósult meg, hogy annak szűk környezetében a hidraulikus paramétereket jelentős mértékben megváltoztattuk, pl.: a hidraulikus vezetőképesség értéke jóval magasabb, mint a környezete. Ugyanakkor a valós hidraulikai viselkedés pontos leképezése az aknák közvetlen környezetében – a fent felsoroltak miatt - még így is nagy kihívást jelentő feladat.

4. A LOKÁLIS MODELLEZÉS EREDMÉNYEI

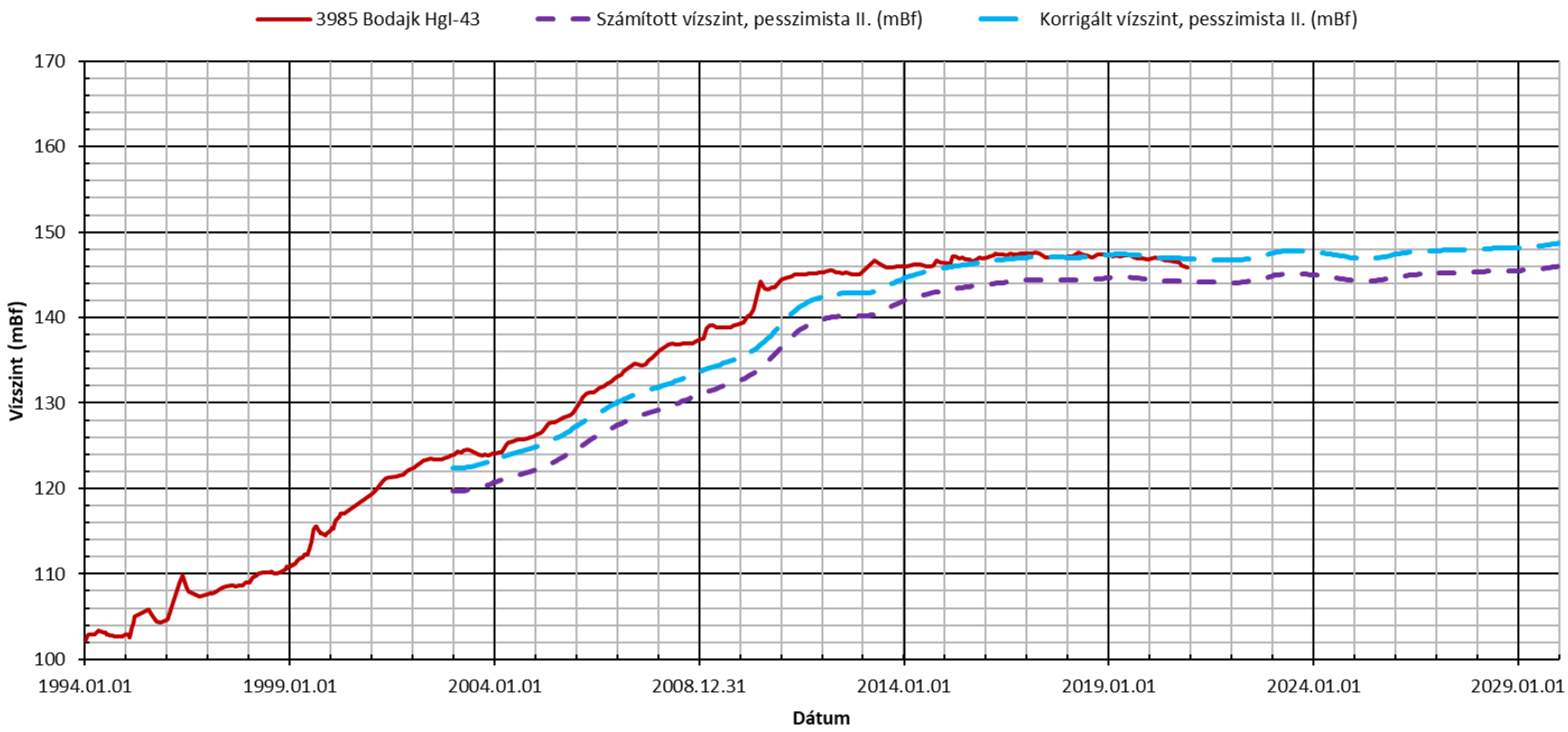
4.1 A 2019-es állapot

A lokális modellezés eredménye alapján lényegben a regionális modellezéssel megegyező következtetéseket vonhatunk le.

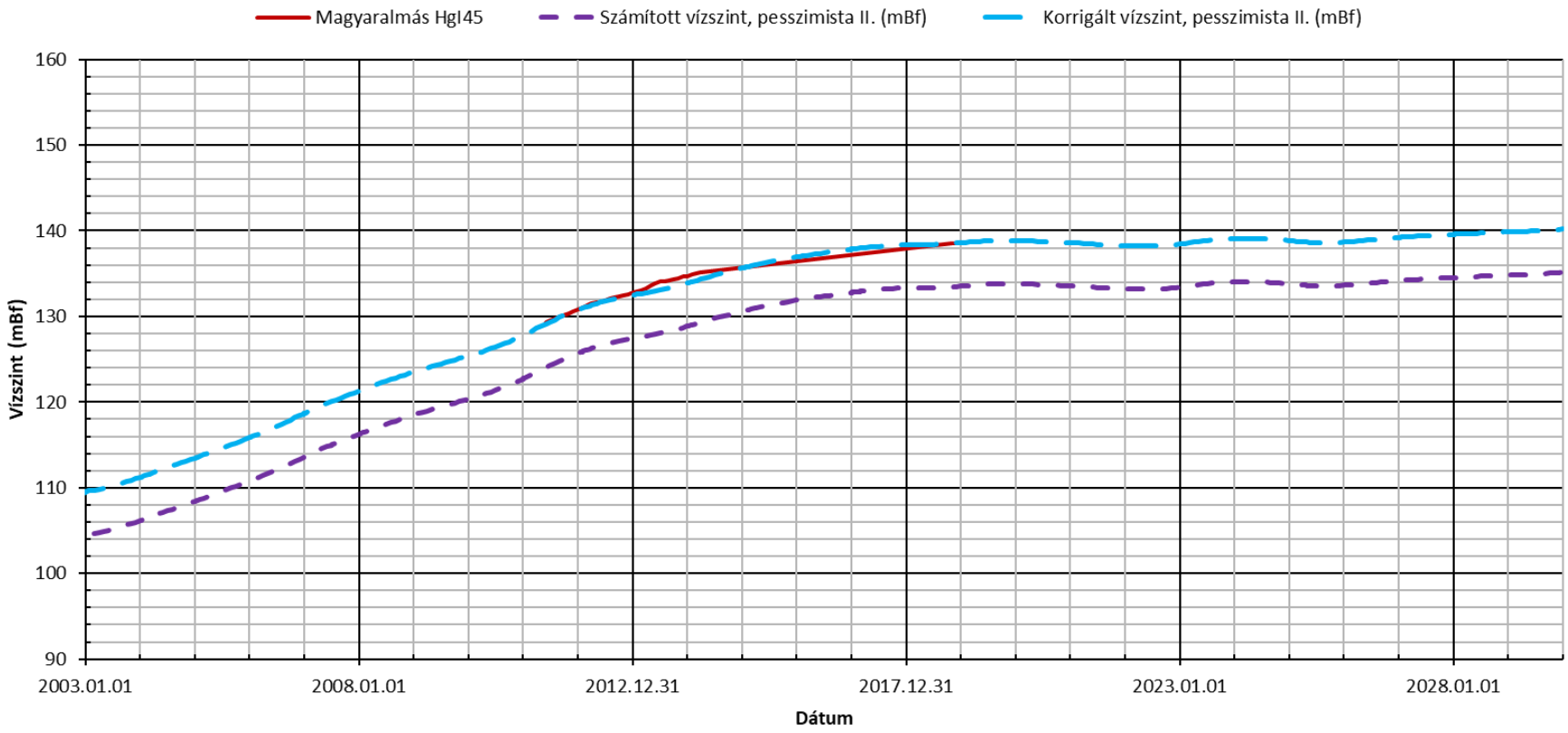
A Fehérvárcsurgó lokális modellterületen belül 6 db olyan megfigyelő kút található, melyből rendelkezünk mért vízszint adatokkal. Emellett Isztimér-3 kút is a terület viszonylagos közelében helyezkedik el. A modell által leképezett karsztrendszer működését jól szemlélteti a modellezett és mért vízszint idősorok összevetése. A modellezett számított és a törzshálózati kutakban mért vízszint idősorokat mutatja be az ***55***. ábra-***58. ábra***. Az ábrákon piros vonal szemlélteti a mért vízszint adatokat, míg a számított vízszintek lila szaggatott vonallal vannak jelölve. A 2030-ra előrejelzett vízszintek (lásd ***4.2. fejezet***) minél pontosabb meghatározása érdekében a számított vízszintek korrigálásra kerültek a 2019. januárra mért és modellezett vízszintek különbségének értékével, melynek eredményét kék szaggatott vonal jelöli.

A lokális modellezés időperiódusa rövidebb volt, mint a regionálisé, 2000-tól kezdődve már csak a visszatöltődés periódusát szimulálta. Az adatok feldolgozása 2003-tól történt meg. A modellezett és mért vízszinteken a visszatöltődés folyamata így is jól látszódik. A visszatöltődés folyamatára jelentős hatással volt a 2010-es extrém csapadékos év, amikor a visszatöltődésben jelentős ugrás következett be. Ez elsősorban azokban a kutakban szembetűnő, amelyekben a beszivárgás ingadozása markánsabb hatással van a karsztvízszintre. A fedett helyzetben elhelyezkedő megfigyelőkutak vízszint idősorára kevéssé jellemző a csapadéknak megfelelő fluktuáció, utánpótlódásuk nem közvetlenül történik a beszivárgott csapadékból. A vízszint idősorok lefutása nagyobb időléptéket tekintve (a modellezési időszak 17 éve alatt) a mért és számított görbék esetén azonos jellegű. A kezdeti szakaszban még egy gyorsabb visszatöltődés figyelhető meg, a vízszintek emelkedése nagyobb ütemű, melyet követően az emelkedés fokozatosan lelassul és a vízszintek a 2010-es évek végére kezdenek egyensúlyi állapotra beállni. 2019-re, ami a regionális modellezés referencia időpontja, a lokális modellel lehatárolt karsztvíztároló részben a karsztvízszint visszatöltődése kvázi befejeződött.

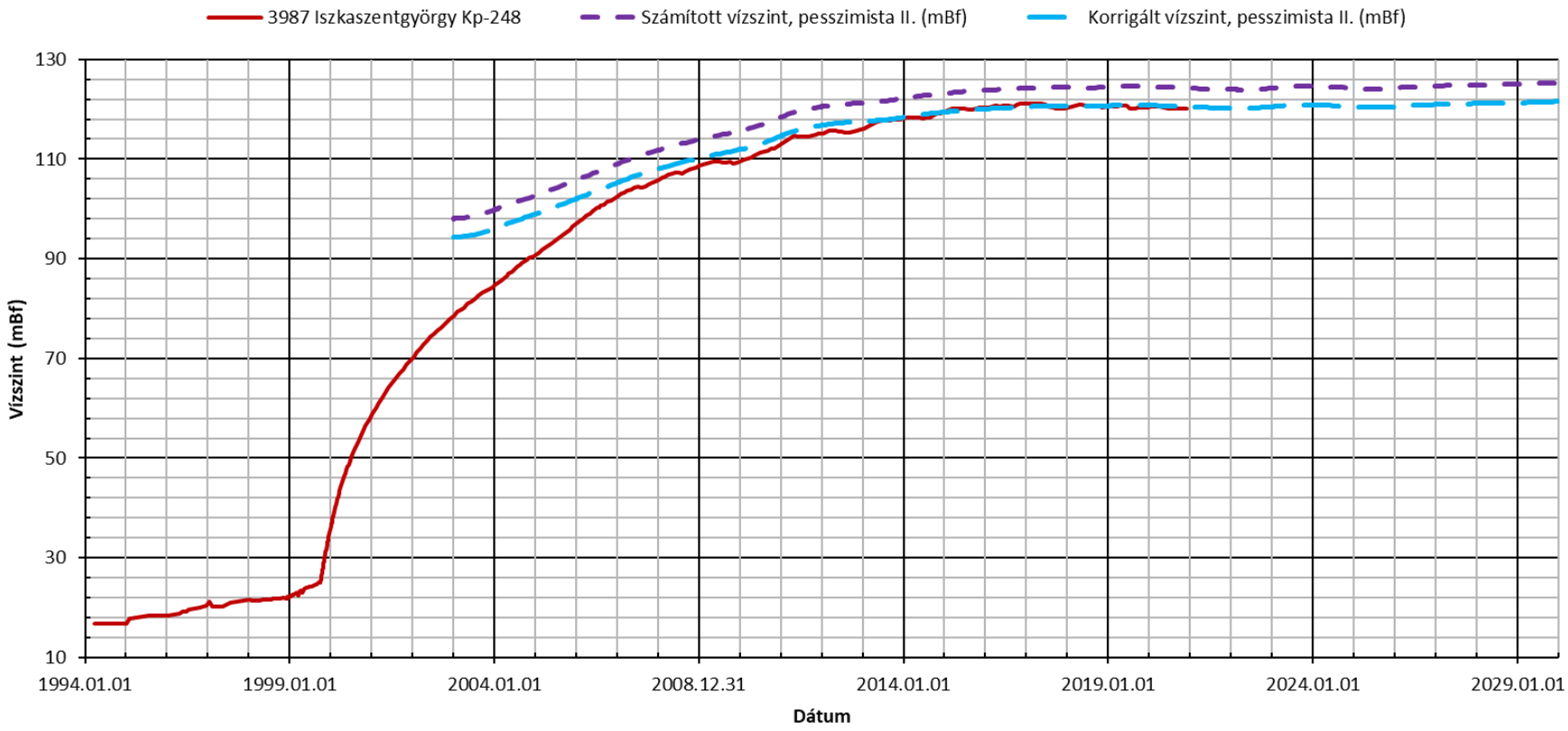
A vízszintek alakulását ezt követően várhatóan már nem a karsztvíz visszatöltődés jelensége, hanem a klimatikus viszonyoknak megfelelő csapadékesemények fogják befolyásolni, melynek hatása a fedetlen területeken várhatóan markánsabb lesz. Napjainkra új egyensúly alakult ki, ahol a feltöltődés folyamatát felülírja a beszivárgás természetes változása, és a helyi vízkivételek nagysága. A karsztvíztároló működését a földtani folyamatok során kialakult dinamikus egyensúly jellemzi. Csapadékszegény időszakban a beszivárgásból eredő hiányt részben a vízszintcsökkenésből származó tárolt vízkészlet változása, részben a források hozamcsökkenése egyenlíti ki. Csapadékosabb időszakban a karsztvízszint ismét megemelkedik, és a két szélső helyzet között ingadozva a főkarsztvíztároló vízforgalma, vízkészlete, nyomás- és mozgásállapota hosszú idő átlagában egyensúlyban marad.



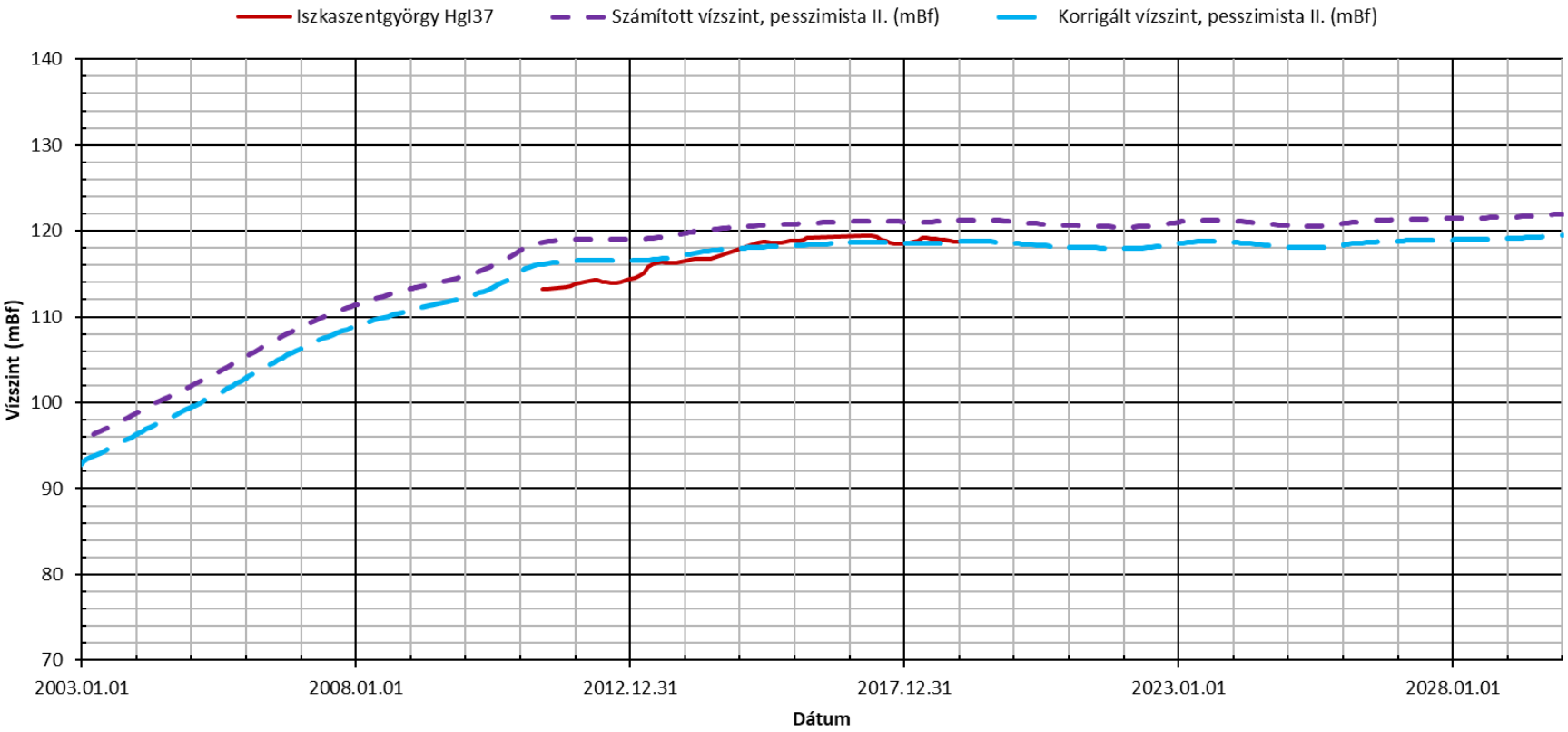
55. ábra: A Bodajk HgI-43 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett vízszint idősora (pesszimista 2. verzió)



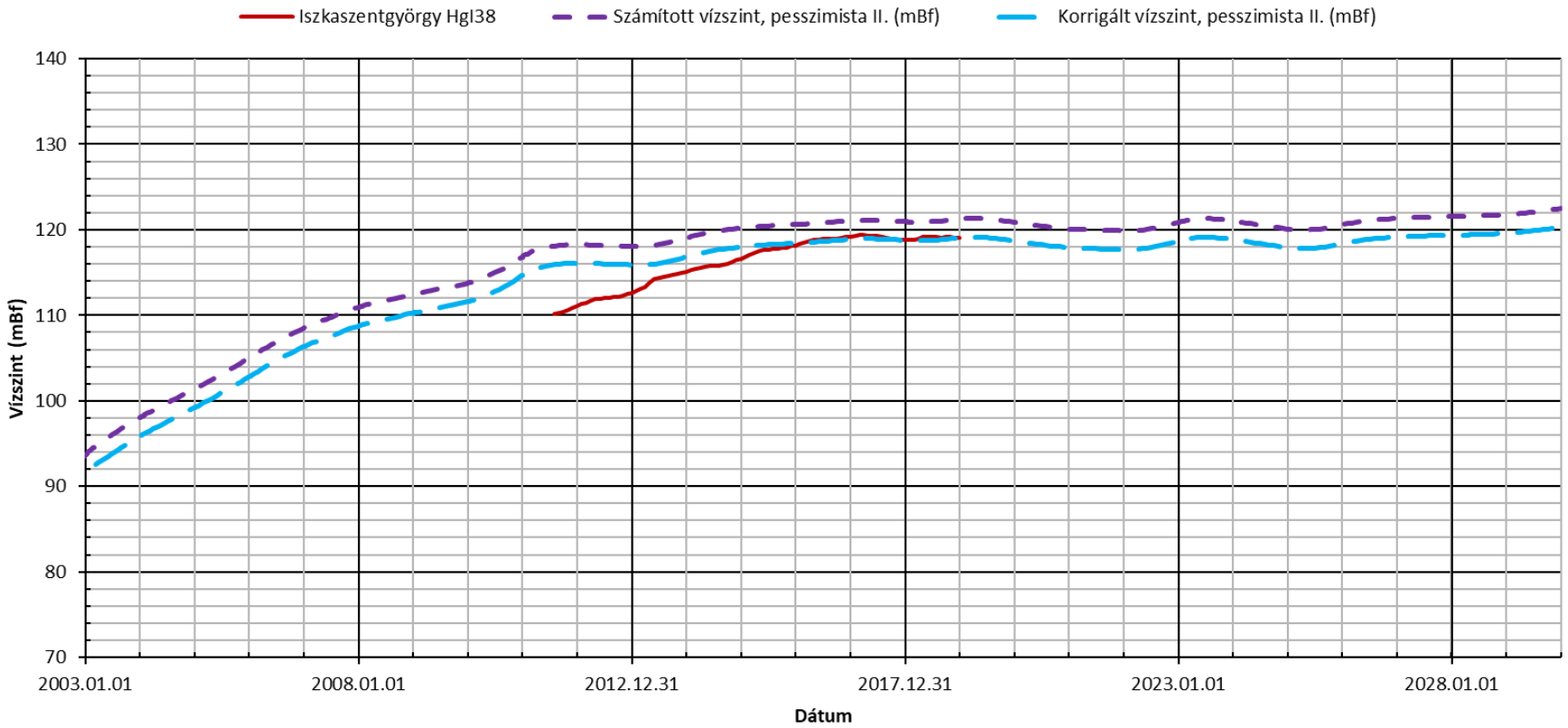
56. ábra: A Magyaralmás HgI-45 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett vízszint idősora (pesszimista 2. verzió)



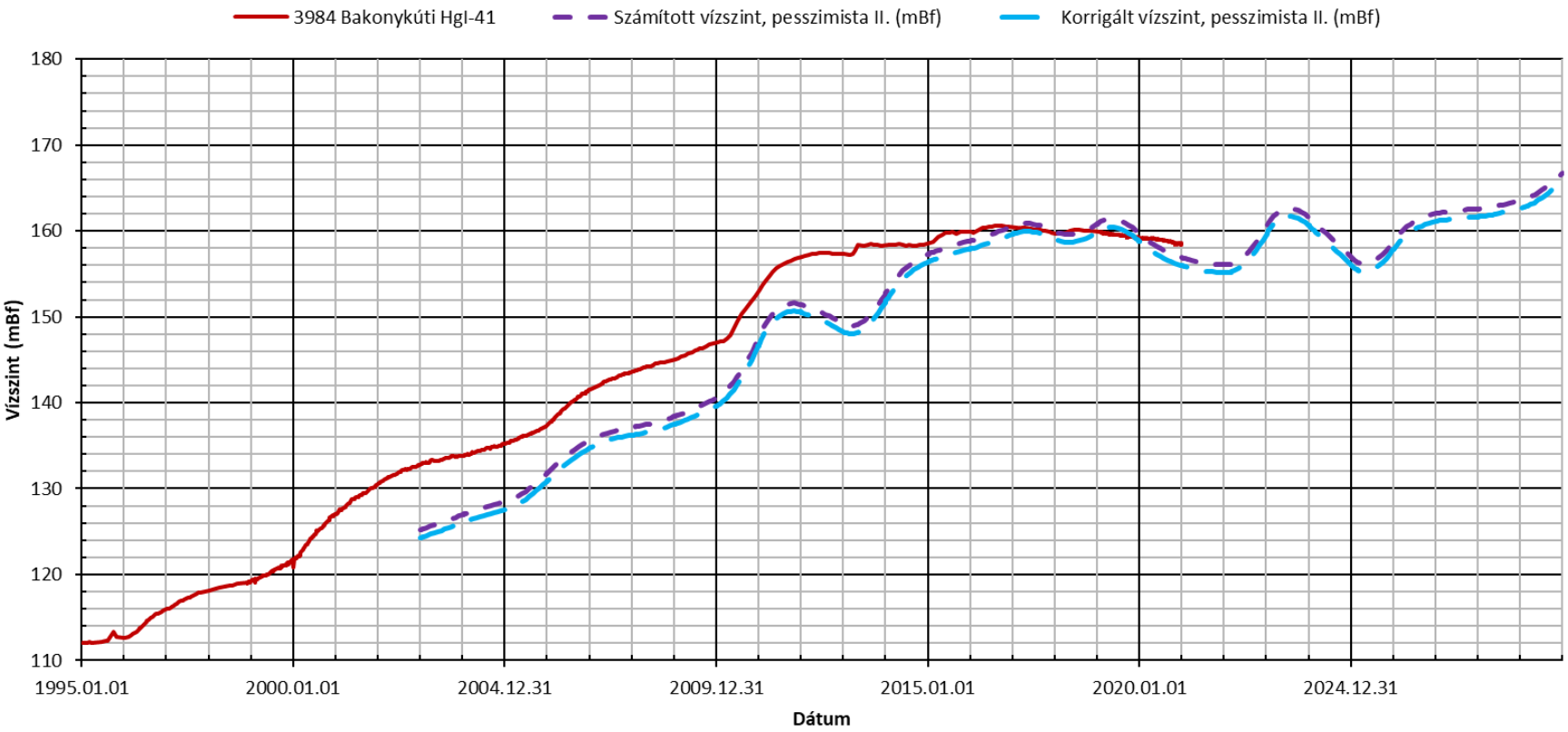
57. ábra: A Iszkaszentgyörgy Kp-248 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett vízszint idősora (pesszimista 2. verzió)



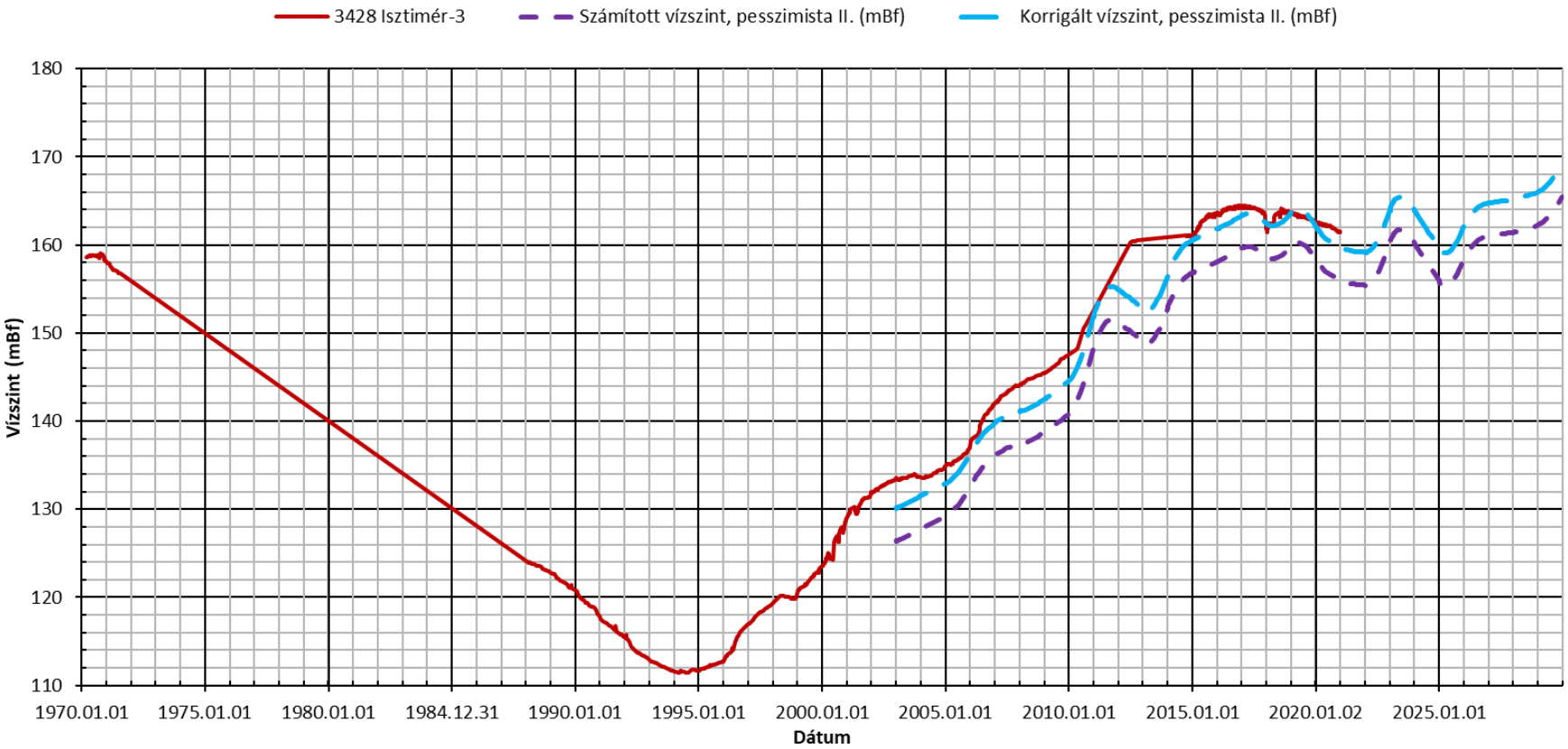
58. ábra: Az Iszkaszentgyörgy HgI-37 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett vízszint idősora (pesszimista 2. verzió)



59. ábra: Az Iszkaszentgyörgy HgI-38 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett vízszint idősora (pesszimista 2. verzió)



60. ábra: A Bakonykúti HgI-41 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett vízszint idősora (pesszimista 2. verzió)



61. ábra: Az Isztimér-3 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett vízszint idősora (pesszimista 2. verzió)

A lokális modell elkészítésének célja a szűkebb terület vízszinteloszlásának pontosítása volt a regionális modellből már ismert eredményekhez képest. A projekt feladatai közé tartozott a 2019. januári 1. állapotú karsztvízszint térkép megszerkesztése Fehérvárcsurgó lokális modellterületre a tranziens hidrodinamikai modellezés eredményei alapján (***1. térképmelléklet)***.

A 2019. januári 1. állapotú karsztvízszint térképet modellezéssel számítottuk/szerkesztettük, oly módon, hogy a monitoring pontokban a valós mért értékeket adtuk meg a modellben, mint számítási eredményt. Ezt mi „kötött vízszintnek" nevezzük, azért mert nem hagyjuk, hogy adott pontban a modell számítsa a vízszintet, hanem a monitoring pontot képviselő rácspontban megkötjük a mért vízszintekkel, azaz az adott pontban nem számolhat mást a modell, mint magát a mért értéket. Ezzel a módszerrel a monitoring pontokban kiküszöböltük a kalibrálási fejezetben ismertetett modellezési hibát. A többi köztes területen (ahol nincs monitoring kút) a modell által számított vízszint eloszlás látható.

A területen a vízáramlás jellemzően Ny-ÉNy-i irányból történik, melyben a Tési-fennsík, mint utánpótlódási terület játszik jelentős szerepet. A térség vízáramlására jelentős hatással van a modellterület déli részét DNy-ÉK-i irányban átszelő vető is (Bakonykúti-feltolódás) amelynek vízrekesztő hatása miatt a hidraulikus gradiens a vető körüli sávban nagyobb (az izovonalak besűrűsödnek).

A visszatöltődés eredményeképpen az elapadt források újból működni kezdtek, illetve a hozamuk is egyre növekedett. A lokális modellterület északi részén, Bodajk térségében több forrás is található. A visszatöltődés eredményeképpen ezek a források az 1960-as évek végi, illetve 1970-es évek eleji elapadásukat követően néhány éve ismét működni kezdtek.

A lokális modell elkészítése nyomán fontos eredmény, hogy annak felhasználásával a Dunántúli-középhegység regionális modell továbbfejleszthető. A kalibráció során a paraméterek változásaira (pl.: K-tényező, fajlagos tározás) vonatkozó új információk a regionális modellbe – részben – beépíthetők, így végeredményben a projekt nem csak a lokális területek szűkebb környezetében ad korrekt ismeretet, de várhatóan a regionális modell eredményei tovább pontosíthatók.

4.2 Prognózis 2030-ra

A projekt egyik fő célkitűzése a 2030-ra jellemző karsztvízszintek előre jelzése volt. A karsztvízszint változását a visszatöltődés és a beszivárgás mennyiségének változása határozza meg.

A beszivárgás mennyiségét számtalan tényező befolyásolja, ezen belül időben változó tényező: a csapadék mennyisége, a csapadék mennyiségének téli és nyári hidrológiai félévi eloszlása, és a csapadék intenzitása.

A módszertan szerint a prognózis időszakára (2019-2030) a beszivárgás mennyiségét az elmúlt 70 év, a Dunántúli-középhegységre jellemző éves mért csapadékadatokból számolt beszivárgási értékek elemzése alapján adtuk meg, vagyis a modellezés során egy már megtörtént éghajlati periódus beszivárgási idősorát ismételtük meg.

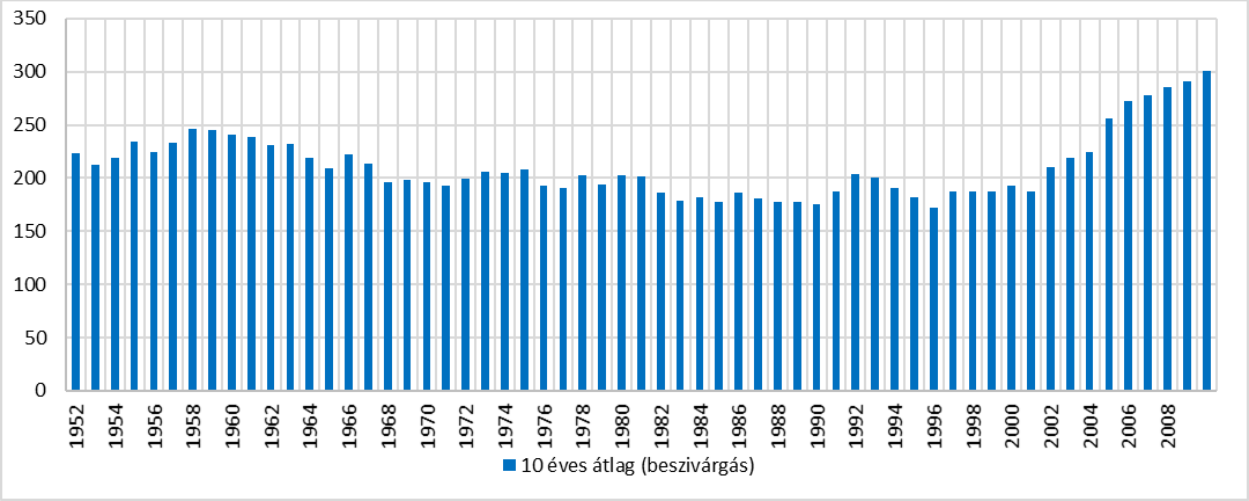
Az éghajlat változásának hosszútávú részletes elemzését, valamint a beszivárgás meghatározásának módszerét „A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése. KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Vízháztartási modellezés és állapotértékelés – I. kötet. A vízháztartási modell alapjául szolgáló földtani modell és a vízmérleg elemeinek bemutatása, valamint a karsztvízszint hosszú távú alakulása" című jelentésben mutattuk be.

A regionális modellezés három szcenáriót vizsgált (***9. táblázat***). A „pesszimista", „optimista" megfogalmazás a potenciális vízkárok szempontjából vizsgálja a karsztvízszint változását. A legmagasabb karsztvízszint a pesszimista változat esetén várható.

9. táblázat: A regionális modellezés során használt szcenáriók

	Pesszimista változat	Átlagos változat	Optimista változat
A változatok meghatározásának módja a módszertan szerint	10 éves legnagyobb beszivárgású időszak: 2009-2018	1980 – 2010 időszak éves átlag beszivárgás	10 éves legkisebb beszivárgású időszak: 1984-1993
A 2019-2030 időszakra ténylegesen modellezett beszivárgás	2007-2018 évek beszivárgásai	minden időlépcsőben a fenti módon számolt éves beszivárgás	1983-1994 évek beszivárgásai
Termelés figyelembe vétele a modellezésben	2018-as év tény vízkivétel	2018-as év tény vízkivétel	engedélyezett vízkivétel

A Fehérvárcsurgó lokális modellterület beszivárgás szempontjából a Sóly és Bakonynána csapadékállomás zónák határán helyezkedik el. Mivel a terület utánpótlódása elsősorban a Tési-fennsík felől történik, így az ***62. ábra*** az ahhoz közelebb eső bakonynánai meteorológiai állomás adatait mutatja.



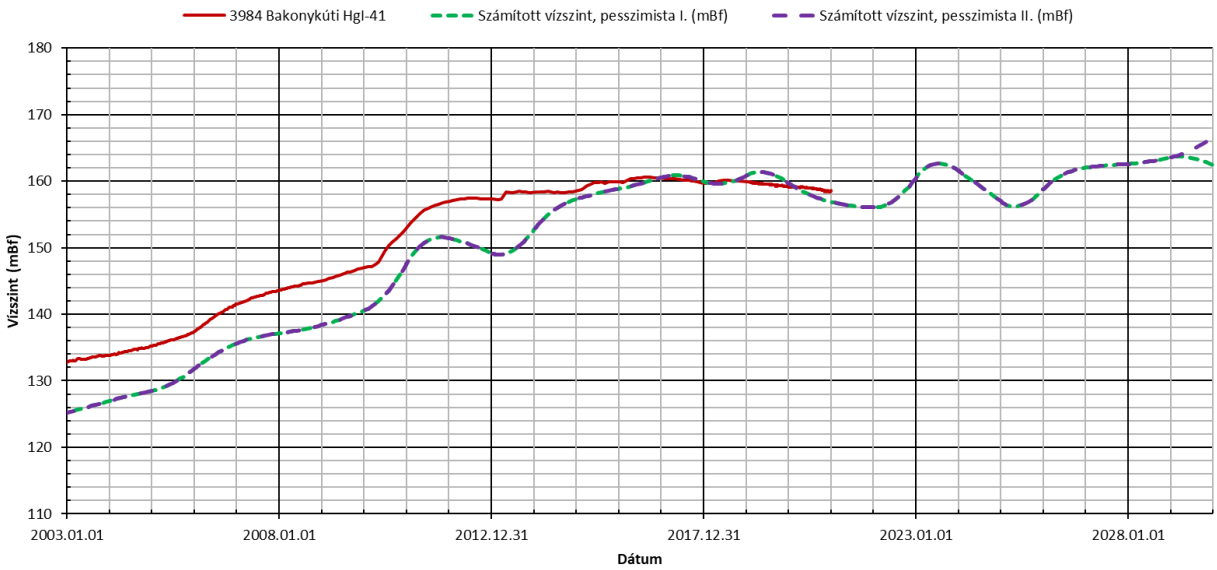
62. ábra: A bakonynánai meteorológiai állomás adatai alapján, HELP szoftverrel számított 10 éves átlagos beszivárgás mennyiségek (mm/év)

Mivel a lokális modellezés elsődleges célja a terület vízföldtani szempontból veszélyeztetettnek tekinthető térségeinek kijelölése, a lokális modellnél a pesszimista szcenárió vizsgálata lett előirányozva. A jövőben várható csapadékadatokra csak becsléseink lehetnek a korábbi évtizedek csapadékciklusainak vizsgálata alapján, így a regionális modellből már ismert „pesszimista" szcenárió mellett egy még pesszimistább szcenárió vizsgálata is indokolt. Ez a modellverzió azzal az eshetőséggel számol, hogy milyen vízszintek várhatók 2030-ra akkor, ha a jövőben egy a 2010-es extrém csapadékos évhez hasonló esemény ismétlődik meg. Fontos azonban kiemelni, hogy a kiválasztott évtizedeken belül alacsony beszivárgású évek is előfordultak, valamint a valóságban sohasem következik be a csapadékeloszlás ugyanúgy, ahogy már egyszer megtörtént.

Ez alapján a tranziens lokális modell előrejelzési időszakára (2019-2030) az alábbi két modellszcenárió készült el:

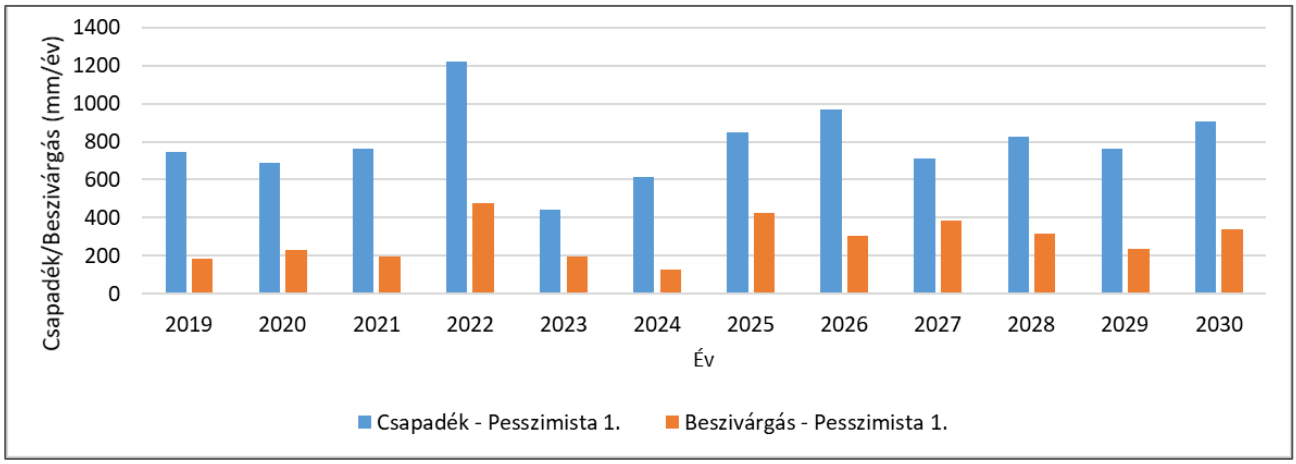
- *Pesszimista 1.*: Ebben a verzióban a regionális modellből már ismert beszivárgásadatokkal dolgoztunk, azaz az előrejelzési időszakban a legnagyobb beszivárgásmennyiséggel jellemzett 10 év (2009-2018) adatait használtuk fel. Továbbá a teljes időszakra 2018. év tény vízkivételei lettek megadva.
- *Pessszimista 2.*: Ez a verzió egy veszélyeztetettségi (lásd ***5. fejezet***) szempontból még pesszimistább csapadékkal számol a 2030-as évre. Ez azt jelenti, hogy a 2020-2029 közötti időszakra a pesszimista 1. verziónak megfelelő beszivárgás értékekkel kalkulál (2009-2017 beszivárgás adatai) a modell, míg a 2030-as évre egy „extrém csapadékos" év, a 2010-es év beszivárgás mennyiségeivel számol. E verzió esetén is a teljes időszakra 2018. év tény vízkivételeivel számoltunk.

A két szcenárió között a különbség gyakorlatilag az utolsó, 2030-as év csapadékadatiban mutatkozik meg, amely a vízszintekben úgy jelentkezik, hogy pesszimista 1. verzió esetén az utolsó modellezett évben a vízszintek csökkennek, míg pesszimista 2. verzió esetén 2030-ban emelkedő vízszinteket láthatunk (***63. ábra***). Ez alapján azt láttuk célszerűnek, ha a pesszimista 2. verzió modellezett vízszintek értékeit tüntetjük fel az ***55-58 ábrasorozatban***.

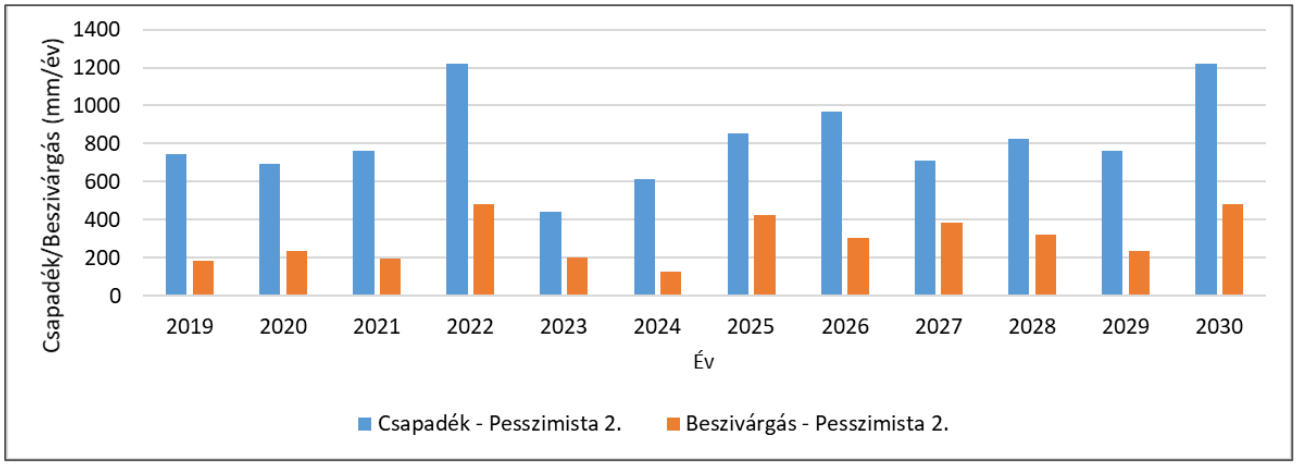


63. ábra: Mért és kétféle modellszcenárióval (pesszimista 1/2.) modellezett karsztvízszintek Bakonykúti HgI-41 kút példáján

A két modellszcenárióra, a bakonynánai meteorológiai állomás adatai alapján számolt beszivárgás- és csapadékmennyiség az ***64-65 ábrán*** látható.



64. ábra: A pesszimista szcenárió esetén figyelembe vett éves csapadékmennyiség és a beszivárgásmennyisége a bakonynánai meteorológiai állomáson mért adatok alapján



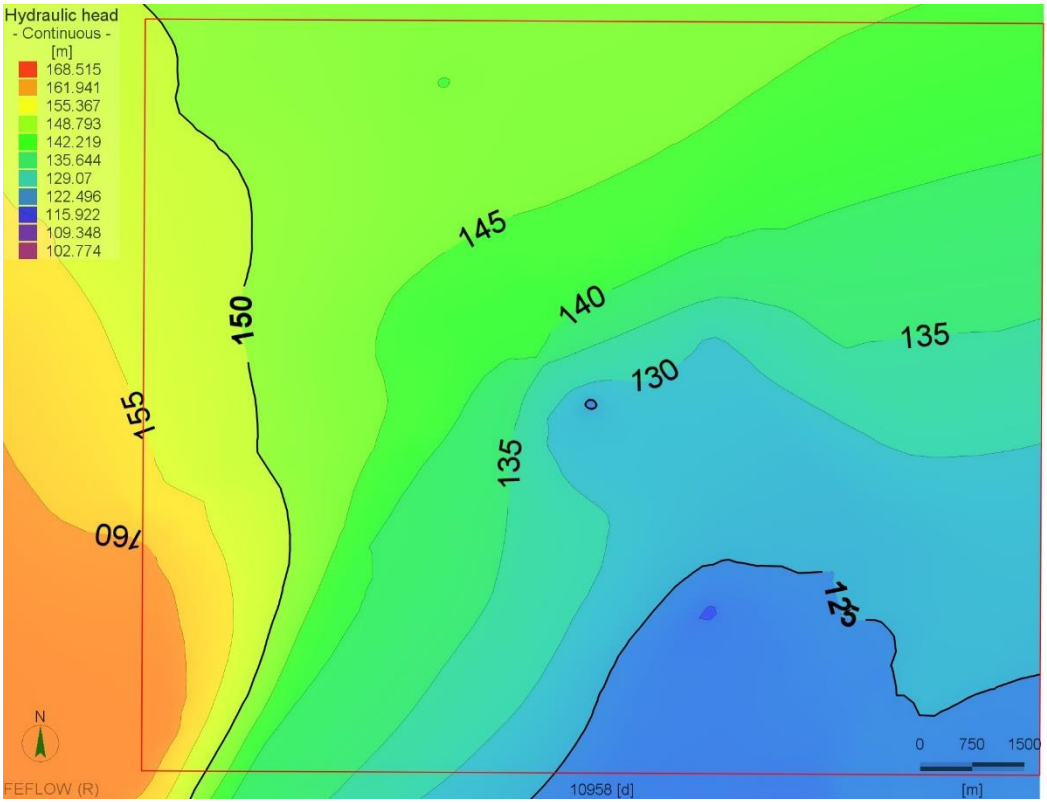
65. ábra: A pesszimista 2. szcenárió esetén figyelembe vett éves csapadék mennyiség és a beszivárgás mennyisége a bakonynánai meteorológiai állomáson mért adatok alapján

A numerikus modellben 2030-ra kétféle szcenárióval prognosztizált vízszinteket az ***66-67. ábra*** mutatja.

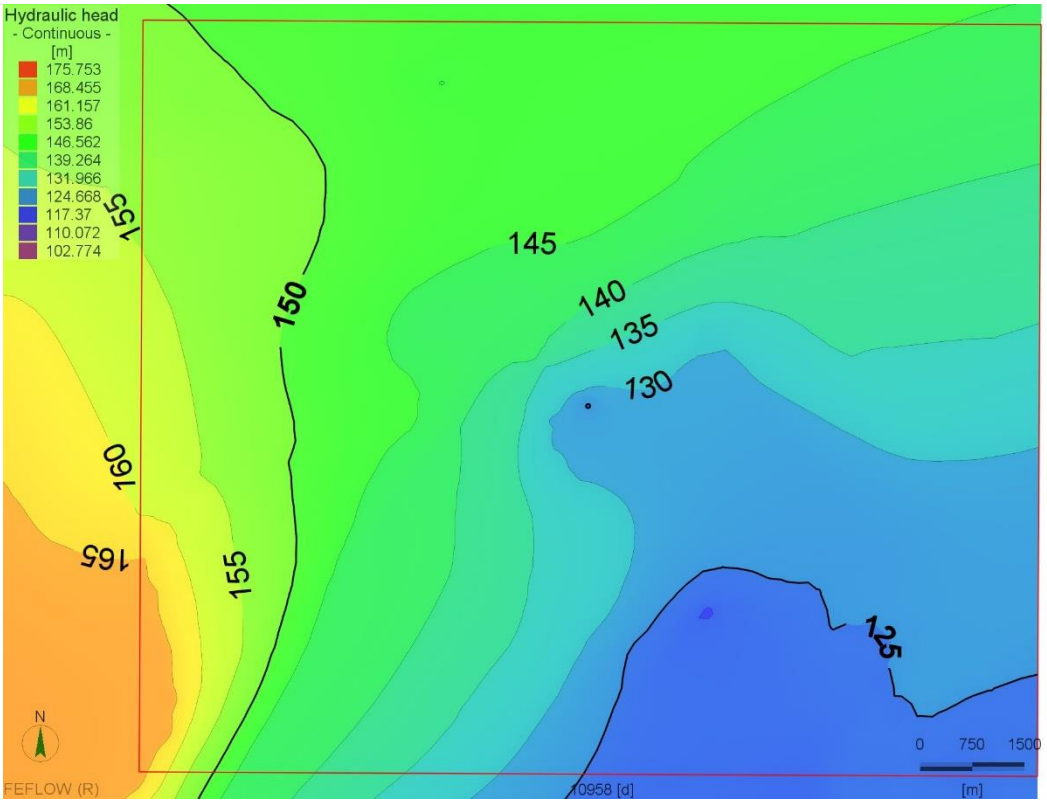
A 2030-ra prognosztizált pesszimista 2. szcenárió korrigált karsztvízszintet a ***2. térképmelléklet*** mutatja be. A változás mértékét 2019-2030 között a ***3. térképmellékleten*** látható különbségtérkép mutatja be.

A vízszintek eloszlása várhatóan nem változik számottevően 2030-ra, egy extrém csapadékesemény hatására azonban a vízszintek tovább nőhetnek. Ez elsősorban a Tési-fennsíkhoz, mint beszivárgási területhez közel eső, a modell nyugati peremi területein lehet jellemző. Itt a vízszint növekedése akár az 5 métert is elérheti a 2019-es évhez képest. Azokon az alacsonyabban fekvő területeken, mint Fehérvárcsurgó környéke a vízszintemelkedés egy extrém csapadékos esemény hatására is csak maximum 1-2 méter körül várható

.



66. ábra: A lokális modellben a pesszimista 1. szcenárió alapján 2030-ra prognosztizált karsztvízszintek (5. réteg) [mBf]



67. ábra: A lokális modellben a pesszimista 2. szcenárió alapján 2030-ra prognosztizált karsztvízszintek (5. réteg) [mBf]

A Fehérvárcsurgó lokális modellben két területen fakadnak jelentősebb források: Bodajkon és Fehérvárcsurgó területén. Mindkét területre jellemző, hogy a karsztvíztároló fedett, a fakadások valószínűleg törésvonalak mentén alakultak ki, vagy olyan kiemelt helyzetű triász sasbércek tetején, amelyek pontos földtani viszonyait, mélységét nem ismerjük. A bányászati vízemelés hatása elsősorban a vetőrendszereken keresztül tudott érvényesülni.

Bodajkon fakad a Tó-forrás és a Nádastavi-forráscsoport. A két modellszcenárió alapján előrevetíthető a várható hozamnövekmény a forrásokban egy csapadékos időszak (pesszimista 1. szcenárió) és egy azt követő extrém csapadékos év (pesszimista 2. szcenárió) bekövetkezése esetén. A két forrás hozamának várható alakulását az ***53. ábra-54. ábra*** mutatja be.

A bodajki Tó-forrás hozama a 2019-ben mért érték alapján 1920 m^3/nap volt. E forrás hozamának alakulására a beszivárgás mennyisége kifejezetten nagy hatással van. A pesszimista 1. szcenárió esetén 2030. januárra a várható hozam a bodajki Tó-forrásban 5541 m3/nap érték körül várható. Egy extrém csapadékos év bekövetkezése esetén azonban ez az érték 8873 m3/nap körül alakul, amely a pesszimista 1. szcenárióhoz képest kb. 60%-kal több vízmennyiség, a mért adathoz viszonyítva pedig a 2019-es vízmennyiség 462%-a várható (10. táblázat).

A Nádastavi-forráscsoport hozama egy ennél stabilabb vízutánpótlódást mutat. A csapadékviszonyok alakulása kisebb mértékben befolyásolja a forrás hozamát. A 2020-ban mért adathoz (11894 m^3/nap) képest a pesszimista 1. szcenárió által prognosztizált 2030-as vízhozam (13 017 m^3/nap) a 2019-es érték kb. 109%-a, míg a pesszimista 2. szcenárió esetén a forrás hozama (14 761 m^3/nap) várhatóan a mért érték kb. 124%-a lesz (***10. táblázat***).

10. táblázat: A bodajki Tó-forrás és Nádastavi-forráscsoport 2019/2020-ban mért és 2030-ra prognosztizált forráshozam értékei

Forrás	Mért érték (m^3/nap)	Prognosztizált forráshozam érték, pesszimista 1. (m^3/nap)	Prognosztizált forráshozam érték, pesszimista 2. (m^3/nap)
Bodajk, Tó-forrás	1920	5541	8873
Nádastavi-forráscsoport	11894	13017	14761

Fehérvárcsurgó területén a természetes források helyét ma már nem lehet azonosítani. Az egykori hozamukról nincsen adat, hosszabbtávú adatokkal sem rendelkezünk. A vízfakadások, a vizenyős terület ugyan az egykori Zárda-tó környékén jelent meg, de erre a területre folyik a le nem zárt, pozitív nyomásállapotúvá vált törpevízmű kifolyó vize is, így a drénnel levezetett, mérhető vízhozam nem azonos az egykori természetes források vízhozamával. A források kalibrálása így a modellezés során nem volt lehetséges. A modellezésből számított 2019-2030 közötti hozamnövekedés a pesszimista szcenárió esetén azonban reális értéknek 200%-nak adódott. A törpevízmű lezárása után a fakadó hozamokat újból meg kell határozni, és ez alapján kell a felszíni vizek elvezetését méretezni.

A Duzzogó- és Meluzina-források, bár az adott területen akár 1 méteres karsztvízszint emelkedés is előfordulhat, a Rákhegy II. vízakna vízkivétele miatt továbbra sem fognak a felszínre lépni.

5. VESZÉLYEZTETETTSÉG

A főkarsztvíztároló regenerációja a túlzott kitermelés időszaka után önmagában tekintve kívánatos jelenség, ugyanakkor az emelkedési folyamat problémákat is okozott. A karsztvízszint emelkedésével a rétegvizek és talajvizek felé vízátadás történik, így nemcsak a főkarsztvíztároló területén, hanem a szomszédos területeken is jelentkezik a feltöltődés hatása, amely főképpen települési környezetben károkat is okozott.

A projekt 4. részfeladata a veszélyeztetett területek lehatárolása volt a tényleges állapotfelmérés, illetve a regionális hidrodinamikai modell alapján. A terepi bejáráson alapuló állapotfelmérés eredményei nem változtak, azonban a lokális modellezés eredményei alapján felülvizsgáltuk a potenciálisan veszélyeztetett területek lehatárolását.

A veszélyeztetett területek lehatárolásának módszertanát részletesen a ”Smaragd-GSH Kft. 2020: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Veszélyeztetett területek lehatárolása” című jelentés tartalmazza.

Összefoglalva, veszélyeztetett az a terület lehet, ahol a karsztvíz szintje vagy nyomása magasabb, mint a terepfelszín. A fedett karsztok esetében, ha a fedő agyagos porózus, márgás vagy aleuritos kőzet, a rétegek képesek ellenállni a karsztvíz nyomásának, és a karsztvíz nem tud a felszínre lépni. A fedő réteg aljára viszont nyomást fejt ki. Előfordul az is, hogy a fedőréteg vastagsága és minősége megfelelő, de a fedőréteget vetők és törések gyengítik. A fedőréteg védő képességét az emberi beavatkozás is csökkenteni tudja. A fedett területeken a veszélyeztetettség a fajlagos védettség alapján került meghatározásra.

A veszélyeztetett területek kijelölése során le lettek határolva azok a térrészek, ahol a fedő vastagsága kisebb vagy egyenlő, mint 50 méter, és a karsztvíztároló felszínén jelentkező nyomás (méterben kifejezve) meghaladja a fedő vastagságát, ezzel megadva azokat a területeket, ahol a fedő minőségétől függetlenül egyáltalán a felszínre jöhet a karsztvíz. Az így lehatárolt területeken megadásra került a teljes fedőre számolt fajlagos védettség érték. A fedővastagság értéke [m] el lett osztva a fedő alján jelentkező, bar-ba átszámolt nyomással. Ezzel tehát azt a kvázi ideális fajlagos védettség értéket adtuk meg, amit akkor kapnánk, ha a teljes fedő agyagos képződmény lenne. Ez alapján elkülönítettük azokat a területeket:

1. Ahol az így kapott érték ≤ 2m/bar, tehát a fedő anyagi minőségétől függetlenül mindenképp veszélyeztetettnek tekinthető;
2. Azokat a területeket, ahol a teljes fedőre számolt fajlagos védettség érték > 2 m/bar. Ezek tehát azok a területek, ahol a fedő agyagtartalmának függvényében lehet veszélyeztetettnek nevezni egy adott területet.

A veszélyeztetett területeket című ***4. térképmellékleten*** az alábbiakat ábrázoltuk.

- Területek, ahol „a karsztvíztároló felszínén számított hidraulikus emelkedési magasság érték nagyobb, mint a fedővastagság”: Azokat a területeket jelöli ki, ahol függetlenül a fedő vastagságától adott (kalkulált) hidraulikus emelkedési magasság mellett a relatív karsztvízszint nagyobb, mint a fedő, tehát a vízszint egyáltalán a felszín fölé jöhet.
- Veszélyeztetett területek, ahol a fedővastagság ≤ 50 m és fajlagos védettség >2 m/bar. Ezeken a területeken a víz megjelenését a felszínen elsősorban a fedőképződmények anyagi minősége befolyásolja, azok agyagtartalmának pontos meghatározása alapján lehet a veszélyeztetettség tényét egyértelműen meghatározni.

- Veszélyeztetett területek, ahol a fedővastagság ≤ 50 m és fajlagos védettség ≤ 2m/bar. Ezek a területek a fedő anyagi minőségétől függetlenül veszélyeztetettnek tekinthetők, mivel a fajlagos védettség értéke abban az esetben sem haladja meg a 2 m/bar értéket, ha a teljes fedővastagságot agyagos képződmények alkotják.
- Veszélyeztetett területek, ahol a nyílt karsztos felszínen a jelenlegi forrásokon kívül új források jelenhetnek meg.

A veszélyeztetett területeken a karsztvíztároló fedőjének pontos földtani felépítését nem ismerjük, általában mindenhol agyagos-homokos képződmények fordulnak elő, de ezek aránya a rétegsoron belül nem ismert. Ezért az eredmények tájékoztató jellegűek, a tervezések előtti részletes, konkrét műszaki, geotechnikai felmérést nem helyettesítik. Fontos kiemelnünk, hogy az 1-2) kategóriába eső területeken is megjelenhetnek vizesedéssel kapcsolatos problémák, de ez elsősorban a fedő összetételének és állapotának függvénye. Ezeken a területeken emberi beavatkozás előtt a fedőrétegek további részletesebb feltárását szükséges elvégezni. Amennyiben a fedő megfelelő minőségű, de azt valamilyen okból (pl.: építkezés) megbolygatják, szintén megjelenhet lokálisan vizesedés. Bár a területen található, prealbait elérő fúrások feldolgozása megtörtént, a potenciálisan veszélyeztetett területeken egy esetleges műszaki beavatkozást megelőzően szükséges lehet a fedő anyagi minőségének további vizsgálata.

Az alábbiakban a lokális modellterületen található veszélyeztetett területeket mutatjuk be.

5.1. A karsztvíztároló fedőjének földtani értékelése a veszélyeztetett területeken

Fehérvárcsurgó térsége

Az egész térségben uralkodóan holocén folyóvízi üledékek (és jellemzően Fehérvárcsurgótól D-re) a pleisztocén lösz az uralkodó felszíni képződmény. Mivel a térségben jelentős bányászati tevékenység zajlott, nagy területeken találunk feltöltést. Ezek mellett a kvartert kisebb foltokban tavi-mocsári, illetve deluviális üledékek alkotják. A kvarter üledékek alól kisebb foltokban a Kállai Kavics és a Tihanyi Tagozat képződményei is előbukkannak. Ezek mellett Fehérvárcsurgó környékén több kisebb foltban a miocén Gyulafirátóti Formáció és nagyobb területi elterjedésben a Szőci Mészkő is a felszínre bukkan. Bodajk környékén több kisebb foltban is megjelenik a felszínen az É felé vastagodó kifejlődésű Csatkai Formáció. Bodajktól Ny-ra a triász Fődolomit közé ékelődve az Óbaroki Bauxit Formáció is megjelenik a felszínen. A triász alaphegység képződményei közül a késő-triász Fődolomit jelenik meg a felszínen, de nagyobb egybefüggő felszíni kiterjedésben csak Bodajktól Ny-ra.

A Fehérvárcsurgótól D-re levő két veszélyeztett terület mellett (D-re illetve Ny-ra) egy nagyobb területen a földtani térképek triász képződményeket jelölnek, a területen mélyült bauxitkutató fúrások (R-48, R-79) fúrási adatai azonban ezt nem igazolják, itt a vékony kvarter üledékek alatt a Szőci Mészkő települt.

Bodajktól-Fehérvárcsurgóig

A Bodajk területét is érintő veszélyeztetettnek jelzett terület mellett mélyült a B-14 kataszteri számú kút. A kút fúrásakor már 18 m-es mélységben elérték a triász Fődolomitot, fedőjében kvarter homokos, kavicsos képződményekkel. A területtől Ny-i irányban található B-11 kataszteri számú kút rétegsorában a Fődolomit felszíne már 52 m mélységben jelenik meg, mintegy 400 m-rel északabbra a Ba-101 fúrásban pedig már 92,5 m mélységben. Itt a Fődolomit felett a Csatkai Formáció agyagos, kavicsos üledékei települtek. Bodajktól K-re és ÉK-re a triász felszíne mélyre kerül, 250-300 m-es mélységben jelenik meg, fedőjében itt is a Csatkai Formáció települt nagy vastagságban.

A Nádas-tavi forrásoktól DK-re a vasútállomás közelében mélyült a Ba-142 fúrás, amely környékét szintén veszélyeztetettnek mutatta a modellezés. Itt a Fődolomit felszíne mindössze 28,5 m mélységben van a felszín alatt, felette azonban a vízrekesztőnek tekinthető Gyulafirátóti Formáció települt.

A Bodajk-Fehérvárcsurgó közötti veszélyeztetett területen nincs olyan fúrás, amelynek felső 50 méterében a karsztvíztároló valamely képződménye feltárulna, ilyet a területektől ÉÉNY-ra találunk (Fcs-114 és Fcs-118). Ebben a fúrásban a késő-triász Fődolomit 37,5 illetve 42,8 m-es felszín alatti mélységben jelenik meg. A közelben még a terület D-i szélétől Ny-ra kb. 500 m-re mélyült Fcs-213 fúrásban emelkedik 50 m-nél közelebb a felszínhez a triász felszíne. Itt mindössze 13,0 m mélységben található a Fődolomit. 50 m-nél kicsivel mélyebb felszín alatti mélységben (54-60 m között) jelenik meg a Fődolomit az Fcs-112, -114, -115 jelű fúrásokban a területtől É-ra. Ha DK illetve K felé távolodunk a területtől, a triász felszíne már egyre mélyebbre kerül (Fcs-12 fúrásban 81 m, Fcs-108 fúrásban 157 m, Fcs-2 fúrásban 164,5 m). Ezen a területen a Ba-142 és Fcs-118 fúrások vonalától D-i irányban mindenütt a vízrekesztő Gyulafirátóti Formáció települt a késő-triász Fődolomitra.

Fehérvárcsurgó belterület

A lokális modellezés alapján a karsztvíz nyomásszintje ezen a területen a felszín felé emelkedik, ugyanakkor az ismeretek alapján 50 m-nél vastagabb fedővel fedett. Ugyan a múltban itt létezett egy tó, de a jelenlegi helyzetben (lezáratlan kút, 50 m-nél vastagabb, de fúrással bolygatott fedő) nem teljesen egyértelmű, hogy megfelelően elcementezett kút esetén is kialakulna-e a vizesedés.

Fehérvárcsurgónál a törpevízműtől Ny-ra az Fcs174 jelű fúrás a triász Fődolomitot 231,m –es felszín alatti mélységben érte el, felette széles (18,5 m) tektonikai zóna volt a rétegsorban.

Fehérvárcsurgótól-Kincsesbányáig

A Fehérvárcsurgó és Kincsesbánya közötti veszélyeztetettnek jelzett területeken nincs olyan fúrás, amelynek felső 50 méterében a karsztvíztároló valamely képződménye feltárulna, ilyet a területektől ÉNy-ra találunk (Rp-399). Ebben a fúrásban a késő-triász Fődolomit 43,4 m-es felszín alatti mélységben jelenik meg. A veszélyeztetett területhez ennél közelebb levő Rp-397 jelű fúrásban a triászt csak 77,0 m-es felszín alatti mélységben írták le, miközben a fúrásnál a terepszint mindössze 6,5 m-rel alacsonyabb, mit az Rp-399-nél. Mindkét fúrásnál a Fődolomitra Szőci Mészkő települt. A területtől Ny-ra mintegy 450 m-re mélyült Rp-395 jelű fúrásban a triász felszíne csak 16,5 m mélységben van, amelyet lösz fed.

A veszélyeztetett területtől K-re az Rp-240 jelű fúrásban a triász Fődolomitot 55,0 m mélységtől írták le. Itt a Fődolomit felett az eocén Fornai Formáció és a Szőci Mészkő települt, melyek fedőjében a miocén Gyulafirátóti Formáció rétegeit találjuk vékony negyedkori fedőréteg alatt.

A veszélyeztetett területhez közeli bauxitkutató fúrások rétegsora alapján a triász uralkodóan 106-140 m-es felszín alatti mélységben jelentkezett (R-45, -49, -54, Rp-28, -48), de a délebbre eső veszélyeztetett terület mellett mélyült Rp-67 jelű fúrásban már 257,2 m-es mélységből írták le. Ezekben a fúrásokban a triász fölött jellemzően kora-eocén agyagos, aleuritos illetve márgás, mészköves képződményeket találunk a fedő negyedkori üledékek alatt.

5.2 A modellezett veszélyeztetett területek összevetése az állapotértékelés során tapasztaltakkal

A modellezés és az állapotfelmérés a veszélyeztetettség megállapítására kétféle megközelítést alkalmaz. Az egyik egy számított érték, a másik a tényleges állapoton alapul. A modellezéssel jelzett területeken nem mindenhol van tényleges probléma. Ugyanis a fedő kőzetek jelenleg védelmet

nyújthatnak, sok esetben valamilyen emberi beavatkozás eredményezte a veszélyeztetett állapotot. A karsztvíz csak akkor okoz tényleges problémát, ha a fedő sérül. Ilyen beavatkozás lehet a nem szakszerűen kivitelezett vagy le nem zárt pozitív kút, külszíni bányászati tevékenység, rézsűk megbontása, megváltoztatása, épület alapozás, stb.

A fehérvárcsurgói lokális modellterületen a regionális modell alapján nem volt kijelölhető potenciálisan veszélyeztetett terület. A lokális modellezés azonban négy nagyobb és egy nagyon kicsi területet is potenciálisan veszélyeztetettnek jelzett. Ezek egyrészt Fehérvárcsurgó és Kincsesbánya között az Ős-Gaja Ny-i oldalánál találhatók (két nagyobb terület), másrészt Bodajkon a Tó-forrástól a Nádastavi-forrásokig tartó terület, a Bodajk és Fehérvárcsurgó között egy keskeny sávban a Bodajk-Fehérvárcsurgói vízfolyástól Ny-ra, valamint a Ba-142 fúrás körül (vasútállomás környéke) mutatkozó egészen kis területet.

Bodajk környékén a lokális modellezés alapján veszélyeztetett a település egy része, ami belefoglalja magába Tó-forrást, a Nádastavi-forrásokat. Erre a területre esik a vízmű jelenleg nem használt, nem megfelelően lezárt pozitív nyomásszintű kútja is. A terepi felmérések során is ugyanezeket tapasztaltuk. Ugyan az állandóan vizet adó vízműkút illetve a Tó-forrás felől a vízelvezetést igyekeztek megoldani, mégis a település Tópart utcai házait (és magát az aszfaltozott utat is) folyamatosan fenyegeti a vizesedés. Itt a vízelvezető árkok megfelelő karbantartása mellett mindenképpen fontos lenne a kút állapotának felmérése, javítása, megfelelő lezárása, esetleges elcementezése, hiszen folyamatos problémát okoz. Mivel az egész terület egybefüggő, a vizek csak a Nádastavi-forrásokon keresztül vezetődhetnek el, ezért fontos a kivezető vízfolyás és a Nádastavi-források melletti Móri-víz jó állapotának fenntartása, a vízfolyásban a vízi növényzet gyérítése a megfelelő elvezetési vízhozam fenntartása érdekében.

A vasútállomás környékén illetve Bodajk és Fehérvárcsurgó közötti területen a felmérés során nem tapasztaltunk problémát (és azt korábban sem jelezte senki). Egyelőre különösebb beavatkozást nem tartunk indokoltnak, legfeljebb a vasútállomás térségéből a vízelvezetés kialakítását a Móri-víz irányába.

A lokális modellezés alapján Fehérvárcsurgó és Kincsesbánya közötti területen az 50 m-nél kisebb fedővel rendelkező területek közül csak a Rákhegy DNy-i oldalán az Ős-Gaja-patak jobb oldalán jelent meg potenciálisan veszélyeztetett terület. Ugyanakkor ezt a regionális modell nem jelezte, de erről a területrészről korábban sem volt információ ilyen jellegű problémáról. Ezek a területek a Kurucz János utcánál kezdődnek és egy keskeny sávban a DMRV telepén is túlnyúlnak DK felé. Ezeken a területeken egyelőre probléma nem jelentkezett, legfeljebb monitoring kút létesítését javasoljuk.

Fehérvárcsurgó településen belül a korábbiakban vízfakadások voltak (a volt Zárda-tó környékén), amely területeket aládrénezték és a vízelvezetést megoldották. A felmérés során azt tapasztaltuk, hogy a Zárda-tó helyén létesített játszótér oldalfala vizesedik. A tó fölötti dombon volt egy törpevízmű, aminek kútja nem lett lezárva, abból a víz kis hozammal ugyan, de folyt ki. A törpevízmű alatti telken pedig kis területen vízfakadás jelentkezett. A lokális modellezés alapján a karsztvíz nyomásszintje ezen a területen a felszín felé emelkedik, ugyanakkor az ismeretek alapján 50 m-nél vastagabb fedővel fedett. Ugyan a múltban itt létezett egy tó, de a jelenlegi helyzetben (lezáratlan kút, 50 m-nél vastagabb, de fúrással bolygatott fedő) nem teljesen egyértelmű, hogy megfelelően elcementezett kút esetén is kialakulna-e a vizesedés. Mindenképpen figyelemmel kell kísérni a történéseket, a kút elcementezését mindenképpen javasoljuk.

5.3 Javaslatok

A tényleges intézkedések kidolgozásánál elsősorban az állapotfelmérés eredményeit kell figyelembe venni. Ezeket tételesen megadtuk a „*Smaragd-GSH Kft. 2021: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Veszélyeztetett területek lehatárolása*.” című jelentésben.

A modellezéssel meghatározott potenciális veszélyeztetett területeket a helyi építési szabályozásban kell jelölni és egy esetleges új beruházás esetén a potenciálisan megjelenő karsztvízre, vizesedés lehetőségére a figyelmet fel kell hívni.

Ezeken a területeken érdemes az építkezéseket megelőzően geotechnikai szakvéleményt kérni, ugyanis a fedő porózus közegben megemelkedő karsztvízszint hatására megnő a pórusnyomás, amely a szemcsék közötti összetartó erő lecsökkenését és az összlet állékonyságának csökkenését eredményezi, amely akár építésföldtani problémákhoz is vezethet. Tehát a karsztvíz nemcsak vízszigetelési, hanem statikai problémákat is okozhat.

Már meglévő épületek fenntartása és új létesítmények tervezése esetén e megváltozott körülményeket is figyelembe kell venni.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

A projekt előző jelentései

[1] Smaragd-GSH Kft. 2019: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Források felmérése, forráskataszter készítése záródokumentáció. Jelentés.

[2] Smaragd-GSH Kft. 2020: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése. KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Vízháztartási modellezés és állapotértékelés – I. kötet. A vízháztartási modell alapjául szolgáló földtani modell és a vízmérleg elemeinek bemutatása, valamint a karsztvízszint hosszú távú alakulása. Jelentés.

[3] Smaragd-GSH Kft. 2020: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Vízháztartási modellezés és állapotértékelés – II. kötet. A regionális numerikus hidrodinamikai modellezés menetének és eredményeinek bemutatása. Jelentés.

[4] Smaragd-GSH Kft. 2020: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Vízháztartási modellezés és állapotértékelés – III. kötet. A karsztvíztároló állapotának összefoglaló értékelése. Jelentés.

[5] Smaragd-GSH Kft. 2021: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Veszélyeztetett területek lehatárolása. Jelentés.

Felhasznált irodalom

[6] Domenico, P.A. and F.W. Schwartz, 1990. Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley & Sons, New York, 824 p.

[7] Erdős A. 2000: A Rákhegyi Regionális Vízmű rövid bemutatása. – Jelentés. DRV Zrt.

[8] Jocháné Edelényi E., Gondárné Sőregi K., dr. Budai T., dr. Csillag G. 1995: A Dunántúli-középhegységi depressziók feltöltődésének geológiai meghatározottsága. – Jelentés. Orsz. Földt. és Geof. Adattár. Budapest

[9] HYDROSYS Kft.- Smaragd-GSH Kft. 2015: A Dunántúli-középhegység karsztos víztestjei. Vízgyűjtő-Gazdálkodási Terv. Felszín alatti vizek mennyiségi állapotának meghatározása. 6-4-5 háttéranyag. Jelentés. OVF adattár

[10] Nád B. 2012: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés hatásai. – MTA VEAB Vízgazdálkodási Munkabizottság ülése.

[11] Szolga F. 2012. Visszatérő karsztvizek a Keleti-Bakony peremén

[12] Schmieder A., Szilágyi G.: 1988: Dunántúli-középhegység főkarsztrendszerének terhelése és terhelhetősége. Bányászati és Kohászati Lapok 121. évf. 2. különszám. pp. 72-89

[13] Fodor, L., Uhrin, A., Palotás, K., Selmeczi, I., Nádor, A., Tóth-Makk, A., Scharek, P., Rižnar, I., Trajanova, M., Rifelj, H., Jelen, B., Lapanje, A., Mozetič, S., Muráti, J., Budai, T. & Tullner, T. 2011: Geological conceptual model in the framework of the project T-JAM. (Budapest, MAFI / Ljubljana, GeoZS), https://t-jam.eu/

Felhasznált térképek

[14] Budai T., Chikán G., Ivancsics J., Kaiser M., Koroknai B., Kovács S., Maigut V., Pelikán P., Síkhegyi F., Turczi G. 2005: Magyarország fedett földtani térképe 1:100 000 Magyar Állami Földtani Intézet 2005

[15] Haas J., Budai T., Csontos L., Fodor L., Konrád Gy. (2010): Magyarország pre-kainozoos1:500 000 méretarányú földtani térképe. Magyar Állami Földtani Intézet 2010.

[16] Jocháné Edelényi E. 2009: A pre-albai képződmények felszínének szintvonalas térképe a Dunántúli-középhegység területén