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

TATA 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 – Tata 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.

Projektvezető	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 modellezés	Kovács Balázs PhD okl. bányamérnök-hidrogeológus mérnök Mérnöki kamarai nyilvántartási szám: 05-0405 VZ-TEL, VZ-VKG, SZÉM-3, SZÉS8, GT, SZÉM-8	
A jelentést készítette	Kovács Balázs PhD okl. bányamérnök-hidrogeológus mérnök Molnár Mária okl. bányamérnök-hidrogeológus mérnök Gondárné Sőregi Katalin 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	
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), Modrovits Kamilla (okl. geológus), 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 10
2.2.1 Földtani felépítés 10
2.2.2 Természetes megcsapolódások 15
3. A lokális numerikus modellezés bemutatása 18
3.1 A numerikus modell geometriai felépítése, numerikus rétegek 18
3.2 A numerikus modell rácshálójának kialakítása 28
3.3 A numerikus modell hidraulikai paraméterezése 31
3.3.1 Szivárgási tényező értékek a numerikus modellben 31
3.3.2 Fajlagos tározás értékek a numerikus modellben 41
3.3.3 Beszivárgás a numerikus modell felszínén 45
3.3.4 A vetők numerikus modelladaptációja 48
3.3.5 A szerkezeti elemek hatása a numerikus modellben 49
3.4 Peremfeltételek a numerikus modellben 50
3.4.1 1. típusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel 51
3.4.2 3. típusú (Transfer)-Cauchy peremfeltétel 52
3.4.3 4. típusú (Well)-Kút peremfeltétel 52
3.5 A tranziens modellezés 54
3.5.1 A tranziens modellezés kezdeti feltételei 54
3.5.2 A tranziens modell időléptéke 55
3.5.3 A numerikus modell kalibrálása 55
4. A lokális modellezés eredményei 64
4.1 A potenciálszintek alakulása 64
4.2 A 2019-es állapot 67
4.3 A források hozamának alakulása 68
4.4 Prognózis 2030-ra 71
4.5 A lokális modellterület vízmérlege 76
4.6 Veszélyeztetettség 77
4.7 A modellezett veszélyeztetett területek összevetése az állapotértékelés során tapasztaltakkal 87
4.8 Javaslatok 87
5. Felhasznált irodalom 88

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A lokális modellek területei a regionális modellen belül 8
2. ábra: A lokális modell területe topográfiai térképen 13
3. ábra: Fedett földtani térkép a lokális modell területén (Magyarország fedett földtani térképe 1:100 000 Magyar Állami Földtani Intézet 2005 [31] 14
4. ábra: A Tükör-, Fényes- Angyal (Pokol)-források vízhozam idősorai (1910-2019) (Adatforrás: ÉDUVIZIG) 17
5. ábra: A lokális modell területére eső, a modellgeometria megalkotásához felhasznált fúrások és kutak helye 19
6. ábra: A modell geometriai felépítése 20
7. ábra: A numerikus modell rétegeinek 3D képe (3.5x túlmagasítás) 21
8. ábra: A numerikus modell 3D képe a Tatai Kálvária domb területéig húzódó kivágással (3.5x túlmagasítás) 22
9. ábra: A numerikus modell DNy-ÉK-i irányú szelvénye (5x túlmagasítás) 22
10. ábra: A numerikus modell DK-ÉNy-i irányú szelvénye (5x túlmagasítás) 22
11. ábra: Az 1. numerikus modell felszín (Terepszintek) 23
12. ábra: Az 1. numerikus modell réteg vastagsága 24
13. ábra: A 2. numerikus modell felszín 24
14. ábra: A 2. numerikus modell réteg vastagsága 25
15. ábra: A 3. numerikus modell felszín 25
16. ábra: A 3. numerikus modell réteg vastagsága 26
17. ábra: A 4. numerikus modell felszín 26
18. ábra: A 4. numerikus modell réteg vastagsága 27
19. ábra: Az 5. numerikus modell felszín (mészkőfelszín) 27
20. ábra: A FEFLOW szoftverben alkalmazható elemek 28
21. ábra: Pont elemek 29
22. ábra: A pontosított felszíni vízhálózat, vonalelemek a modellben 29
23. ábra: A pontosított vetőhálózat és az elsődleges forrásként használt pre-kainozoos tektonikai térképelemek Folytonos vonalak: a modellbe adaptált vonalelemek, szaggatott vonalak: további feltételezhető vetőelemek 30
24. ábra: A numerikus modell rácshálója 31
25. ábra: Az egyes rétegekben alkalmazott horizontális tengelyirányú (40° csapásirányú) K-tényező eloszlás 33
26. ábra: Az egyes rétegekben alkalmazott horizontális tengelyirányú (40° csapásirányú) K-tényező eloszlás 34
27. ábra: Az egyes rétegekben alkalmazott horizontális tengelyirányra merőleges (40° dőlésirányú) K-tényező eloszlás 35
28. ábra: Az egyes rétegekben alkalmazott horizontális tengelyirányra merőleges (40° dőlésirányú) K-tényező eloszlás 36
29. ábra: Az egyes rétegekben alkalmazott vertikális K-tényező eloszlás 37
30. ábra: Az egyes rétegekben alkalmazott vertikális K-tényező eloszlás 38
31. ábra: A nyitott és zárt vetők esetében alklamazott 40°-os csapásirányú, dőlésirányú és vertikális K-tényező eloszlás 39
32. ábra: A numerikus modell reprezentatív 3D szivárrgási tényező metszetei a sasbércen keresztül (6x túlmagasítás) 41
33. ábra: Az 1-3. rétegekben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 43
34. ábra: A 4-6. rétegekben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 44
35. ábra: A beszivárgási értékek hozzárendelése az egymást követő periódusokhoz 45

36. ábra: A beszivárgási értékek változásának mintázata egy száraz (2008) és egy nedves (2010) évben 46
37. ábra: A beszivárgási értékek korrekciójának mintázata a terepszintek függvényében 47
38. ábra: A numerikus modellbe épített vetőhálózat 49
39. ábra: A numerikus modellben szereplő 1.tipusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel 52
40. ábra: A numerikus modellben szereplő 3.tipusú (Fluid Transfer) Cauchy - peremfeltétel 52
41. ábra: A numerikus modellben szereplő 4.tipusú (Well) peremfeltétel 53
42. ábra: A vízkivételek modellbeli leképezése az 500410 jelű kút (Tat, Dióspuszta, Ménesbirtok II. sz. kútja) példáján 54
43. ábra: A tranziens modell kezdeti vízszint eloszlása 55
44. ábra: A Neszmély-3 karsztvízszint észlelőkútban mért tranziens vízszint-változás [mBf] 2021 után kiegészítve a regionális modellből származó várható trenddel 56
45. ábra: A Tata-Pokol karsztvízszint észlelőkútban mért tranziens vízszint-változás [mBf] 2021 után kiegészítve a regionális modellből származó várható trenddel 57
46. ábra: A Kocs-1 karsztvízszint észlelőkútban mért tranziens vízszint-változás [mBf] 2021 után kiegészítve a regionális modellből származó várható trenddel 57
47. ábra: A Vértesszőlős-1 karsztvízszint észlelőkútban mért tranziens vízszint-változás [mBf] 2021 után kiegészítve a regionális modellből származó várható trenddel 58
48. ábra: A Baj-1 karsztvízszint észlelőkútban mért tranziens vízszint-változás [mBf] 2021 után kiegészítve a 2019-es vízszinttel 58
49. ábra: Az optimista forgatókönyv szerinti (jövőben 2019 évi vízszintek) és pesszimista forgatókönyv szerinti (jövőben a pesszimista forgatókönyv szerint változik a beszivárgás következtében a vízszint) vízszintek feltételezett alakulása a Neszmély-3 kútban 59
50. ábra: A mért és számított vízszintek alakulása a kalibrált modellekben (Tata-Pokol) 60
51. ábra: A mért és számított vízszintek alakulása a kalibrált modellekben (Kocs-1) 61
52. ábra: A mért és számított vízszintek alakulása a kalibrált modellekben (Vértesszőlős-1) 61
53. ábra: A mért és számított vízszintek alakulása a kalibrált modellekben (Neszmély-3) 62
54. ábra: A számított karsztvízszintek alakulása a kalibrált modellben 2019. január 1-jén 64
55. ábra: A számított karsztvízszintek alakulása a kalibrált modellben 2021. január 1-jén 65
56. ábra: A számított karsztvízszintek alakulása a kalibrált modellben 2025. január 1-jén 66
57. ábra: A számított karsztvízszintek alakulása a kalibrált modellben 2030. január 1-jén 67
58. ábra: A számított összes karsztforrás vízhozam alakulása az időben az eltérő scenáriók esetén 69
59. ábra: A számított karsztvízhozamok a forráscsoportokban a pesszimista forgatókönyvnek megfelelő beszivárgási viszonyok esetén 70
60. ábra: A számított karsztvízhozamok a forráscsoportokban az ultra pesszimista forgatókönyvnek megfelelő beszivárgási viszonyok esetén 71
61. ábra: A tatai meteorológiai állomás zónájához tartozó terület HELP szoftverrel számított beszivárgás mennyiségének 10 éves átlagai 72
62. ábra: 2025. évi prognosztizált és a 2019. évi számított karsztvízszintek különbsége pesszimista szcenárió esetén 73
63. ábra: 2030. évi prognosztizált és a 2019. évi számított karsztvízszintek különbsége pesszimista szcenárió esetén 74
64. ábra: 2030. évi prognosztizált és a 2019. évi számított karsztvízszintek különbsége ultrapesszimista szcenárió esetén 75
65. ábra: A karsztvízszintek terep feletti magassága [m] a 2019. évi számított karsztvízszintek esetében 78
66. ábra: A karsztvízszintek terep feletti magassága [m] a 2030. évi prognosztizált karsztvízszintek esetében 79
67. ábra: A karsztos képződmények terepszint alatti mélysége [m] 80

68. ábra: A karsztos képződmények felszínére számított túlnyomás mértéke [bar] ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
69. ábra: A veszélyeztetettségi index értéke [m/bar] ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
70. ábra: A vertikális hidraulikus gradiens elvén értelmezett veszélyeztetettségi index értéke átnézetes térképen 81
71. ábra: A vertikális hidraulikus gradiens elvén értelmezett veszélyeztetettségi index értéke a forrásfakadások környezetében 82
72. ábra: A vertikális hidraulikus gradiens elvén értelmezett veszélyeztetettségi index értéke átnézetes térképen max. 3 m mélységig végzett földmunka figyelembevételével 83
73. ábra: A vertikális hidraulikus gradiens elvén értelmezett veszélyeztetettségi index értéke a forrásfakadások környezetében max. 3 m mélységig végzett földmunka figyelembevételével 84

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat: A nagyobb tatai karsztforrások alapadatai Ballabás [13] szerint Horusitzky (1923) [18] és Tóth et.al. (1999) [25] alapján 15
2. táblázat: Az egyes képződmények K-tényező értéke a numerikus modellben 40
3. táblázat: Az egyes hidrosztratigráfiai egységhez tartozó fajlagos tározás 42
4. táblázat: A vetőelemek hidraulikai paraméterei 48
5. táblázat: A forráshozamok kalibrációja 2019-es állapotra 63
6. táblázat: A regionális modellezés során használt szcenáriók 72

TÉRKÉPMELLÉKLETEK

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

DIGITÁLIS MELLÉKLETEK

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*)[20].

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-

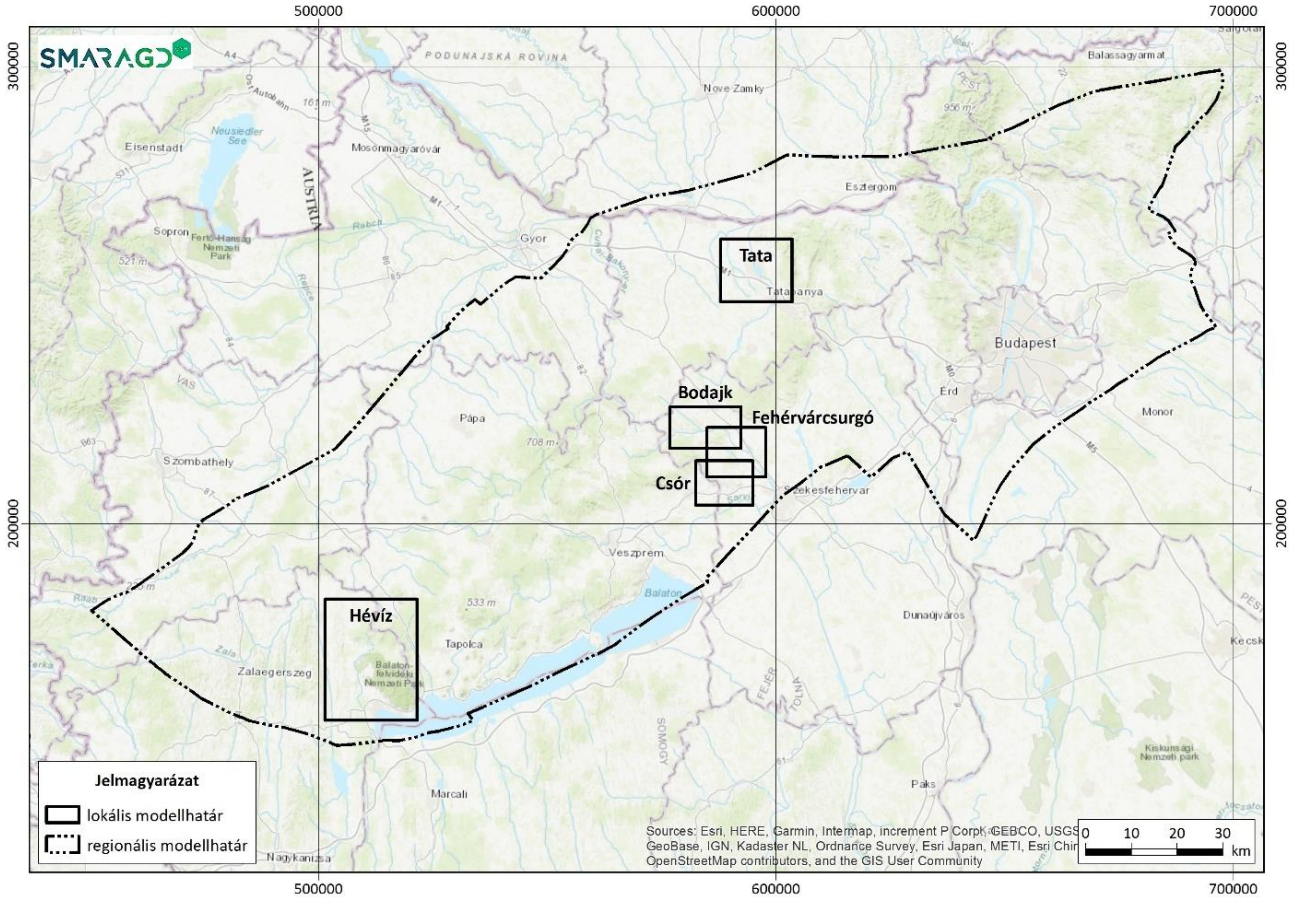
00010. Vízháztartási modellezés és állapotértékelés – III. kötet. *A karsztvíztároló állapotának összefoglaló értékelése*. Jelentés.

[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 Tata területre készült 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 lokális modellterület határát a regionális modell alapján határoztuk meg, figyelembe véve a Tatai-források utánpótlási területét (***2. ábra***). A lokális modell a k.1.2 jelű, Tatai és Fényes-források vízgyűjtője elnevezésű karsztvíztestet érinti.

Földrajzilag a lokális modell a Vértes északi előterét, a Gerecse nyugati részét és előterét érinti.

Határoló koordinátái: EOVy = 587880 – 603500 m és EOVx = 248500 – 262250 m.

Területe: 214,78 km^2

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 területen a prealbai rétegek között egyaránt megjelennek triász és jura képződmények is. A prealbai képződmények felszínének tengerszint feletti magassága -480 és +560 mBf között változik. Legmélyebb helyzetben a terület D-DNy-i, illetve ÉNy-i részén található Környe, Kocs és Naszály térségében, valamint Tatától ÉK-re. A terület középső részén, Tata környezetében nagyjából -150 és 150 mBf közötti, kelet felé haladva fokozatosan egyre magasabb térszínen helyezkedik el. A Tatabánya-Vértesszőlős-Dunaszentmiklós vonaltól K-re gyakran a prealbai képződmények a felszínen vannak, leginkább a triász korú Dachstein Mészkő, illetve ritkábban jura képződmények jelennek meg. A fedett földtani térkép alapján a Dachstein Mészkő Tata DNy-i részén, az Öreg-tótól Ny-ra (Kálvária-domb) is gyakran a felszínen vagy annak közelében található.

A fúrási rétegsorok alapján jura korú kőzeteket Tatán és környékén, illetve a terület déli részén, Kocs-Környe-Tatabánya térségében találhatunk. Kocs környékén az ammonitico rosso típusú mészkő és a gumós, agyag-gumóközös Tűzkövesárki Mészkő, illetve a pados-vékonyréteges, lencsés, krinoideás Kisháti Mészkő jelenik meg, együttes vastagságuk azonban mindössze 25 méter. Környe felé haladva a Dachsteini Mészkő felett néhány méter vastag bioklasztos, többnyire jól rétegzett, pados Pisznicei Mészkő található. Tatabánya környékén a Pisznicei Mészkő vastagabb, nagyjából 20 méter, felette az ammonitico rosso típusú mészkőgumós Kisgerecsi Márga, az ugyancsak ammonitico rosso típusú, agyagos-gumós Tölgyháti Mészkő, illetve a vörös, agyagos-gumós, helyenként tűzköves Pálihálási Mészkő található. Az említett képződmények vastagsága néhány méter. Tatabányától északra a jura képződményekben a Pisznicei és a Pálihálási mészkő között vékony rétegben (1-2 m) a jól rétegzett, tűzköves radiolaritból és kovás mészkőből álló Lókúti Radiolarit is megtalálható. Tatától D-re a Dachstein Mészkő felett a Pisznicei mészkő jelenik meg, vastagsága kb. 30 méter, majd észak felé

haladva a korábban említett jura képződmények mindegyike előfordul. Helyenként megtalálható a vékonypados, vékony réteges, többnyire fehér, rózsaszín, vagy világosvörös calpionellidae-s, tűzköves Szentiványhegyi Mészkő Formáció, melynek kora felső-jura-alsó-kréta. A jura képződmények teljes vastagsága általában 10-60 méter, legvastagabb mindegyik fúrásban a Pisznicei Mészkő. A formációk felszín közelben, illetve sekély mélységben fordulnak elő Tatán, az Öreg-tó és a Kosréti árok között. Tata ÉK-i részén, illetve Tatától D-DK felé haladva egyre mélyebben helyezkednek el, a Kocs-Környe-Tatabánya vonalban gyakran csak 300-400 méter mélyen találhatók. Tata ÉK-i részén is 150-300 méteres mélységben találhatók.

A kréta korú formációk közül a Tatai Mészkő még a prealbai képződményekhez tartozik, elterjedését tekintve a területen Tata DNy-i részén, az Öreg-tótól Ny-ra, illetve Tatától DNy-ra található. A többi kréta korú formáció már a prealbai képződmények fedője. A Tatai Mészkő szürke, helyenként vörös, jelentős extraklaszt és glaukonit tartalmú, szublitorális fáciesű, krinoideás mészkő, néhol krinoideás, meszes, illetve agyagos homokkő közbetelepüléssel. Jellemző makrofosszíliája a brachiopoda, de kagyló is előfordulhat benne. A fúrási rétegsorok szerint felszínen, vagy felszín közeli helyzetben található az Öreg-tó és a Kosréti-árok között, a település DNy-i szélén lévő fúrásokban már 50-100 m mélyen helyezkedik el. A formáció vastagsága Tatán 1-30 méter között változik. Tata és Kocs között két fúrásban található meg. Kocs felé haladva egyre nagyobb mélységben (300-400 m) található, vastagsága lecsökken 3-13 méterre.

A prealbai felszínt fedő képződmények vastagsága 0 és 600 méter között változik, legvastagabb a terület D-DNy-i, illetve ÉNy-i részén, Környe, Kocs és Naszály térségében, valamint Tatától ÉK-re.

Fedő kréta képződményként a területen a világos tónusú organogén Környei Mészkő, a közép-durvaszemű kavicsos, márgás aleurolitos, agyagmárgás, konglomerátumos, homokos mészköves Lábatlani Homokkő, illetve a kissé glaukonitos, agyagmárgás, márgás, ritkábban mészmárgás, mészköves és homokköves Vértessomlói Aleurolit található meg. A fedő kréta képződmények Tatán, Tata és Dunaszentmiklós között, valamint a terület D-i részén, Kocs-Környe és leginkább Tatabánya térségében jelennek meg. Vastagságuk átlagosan 10-80 méter, de néhány fúrásban a 100 métert is meghaladja, sőt egy helyszínen Tatától ÉK-re, Szomód és Baj között vastagságuk eléri a 400 métert. A Környei Mészkő a középhegységi szinklinális tengelyében Pusztavám és Kecskéd között és annak ÉNy-i szárnyán, Kömye és Kocs között maradt meg. A területen két fúrásban azonosítható Kocs és Környe között, vastagsága 25 illetve 145 méter, rétegei 200-400 méter mélyen találhatók. A Lábatlani Homokkő három fúrásban került leírásra a terület ÉK-i szegletében, Dunaszentmiklóstól K-re, Szomód és Baj között, valamint Tatabánya és Vértesszőlős között. Mindhárom fúrásban 50-60 méter vastag, 100-400 méteres mélységben található. A leggyakoribb kréta fedőképződmény a Vértessomlói Aleurolit, mely Tatán és Tatabányán jelenik meg, általában 10-150 méter vastag, de Szomód és Baj között vastagsága meghaladja a 300 m-t is. A képződmény Tata É-i részén, illetve Tatától ÉK-re 10-130 méter mélyen, míg Tata déli részén és Tatabányán 200-300 méter mélyen fordul elő.

Eocén képződmények csak kevés helyen, a terület déli részén, Kocs és Környe között, valamint Tatabányán, az Által-értől nyugatra találhatók. Jellemző formációk az aleuritos, tufás, bentonitos Padragi Márga; az agyagmárgás, márgás, nagyforaminiferás Csolnoki Formáció; a márgás, mészmárgás, aleuritos, homokköves Csernyei Formáció; a szenes, tarka és szürke agyagos, bauxitos agyagos, homokos, kavicsos, mészmárgás Dorogi Formáció; valamint a Gánti Bauxit. Az eocén képződmények vastagsága 10 és 70 méter között változik, legvastagabb és egyben a legtöbb fúrásban megjelenő képződmény a Csolnoki Formáció. A Gánti Bauxit, és a Padragi Márga csak egy fúrásban került leírásra Kocs és Környe között. A formációk 200-300 méter mélyen jelennek meg, de Kocs mellett 400 méternél lejjebb is megtalálhatók.

A területen oligocén képződményként az agyag, agyagmárga, homok, homokkő, kavics, konglomerátum váltakozásából álló Csatkai Formáció, valamint a meszes aleurit, agyagos aleurit, homok és homokkő váltakozásából álló, konglomerátumos, kőszénzsinóros Mányi Formáció fordul elő. A formációk a terület egészére jellemzők, kivételt csak a K-i rész képez, ahol a prealbai képződmények már a felszínen vannak. A Csatkai Formáció Kocs és Vértesszőlős környékén, valamint Tata K-i részén önállóan, a többi területen a Mányi Formációval együtt jelenik meg. Mányi Formációt Csatkai Formáció nélkül mindössze három fúrásban írtak le Tata déli részén, illetve Tata és Naszály között. A formációk vastagsága változó, a pár métertől több 100 méterig terjed, legvastagabb Tata DK-i részén, Baj környékén, valamint a Kocs-Környe-Tatabánya vonalban. Környétől D-re az 500 métert is meghaladja. A képződmények sekély mélységben (0-20 méter), gyakran felszín közeli helyzetben találhatók Tatától DK-re, Vértesszőlős, Környe és Tatabánya környezetében. Tatától ÉK-re, Baj, Szomód térségében kissé mélyebben helyezkednek el (10-50 m). A területen Tatától Ny-ÉNy-ra haladva fokozatosan egyre mélyebbre zökkentek, legmélyebb helyzetben (260 m) Naszálynál találhatók.

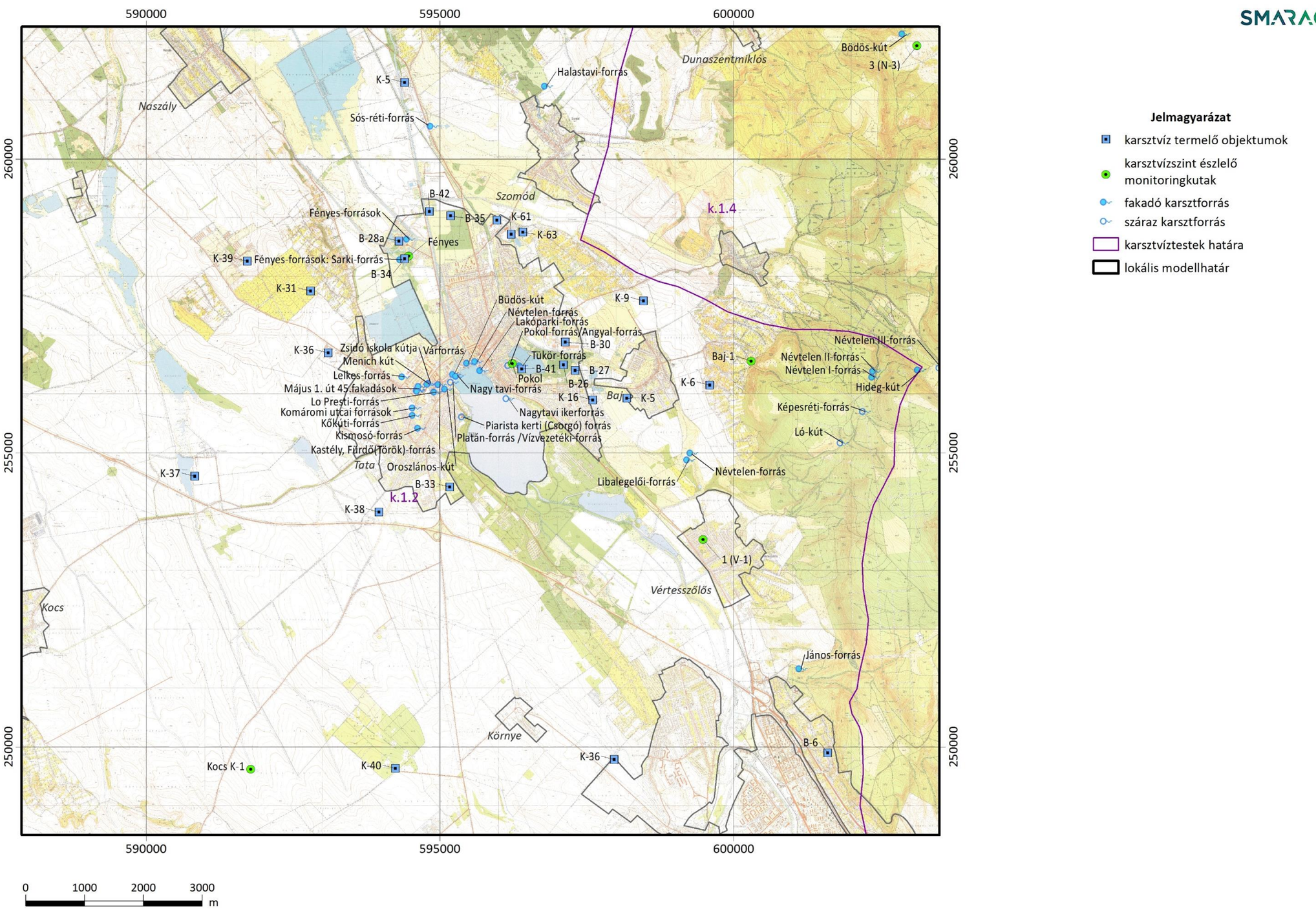
Miocén képződmények a területen nem jellemzők, egyetlen, Kocstól keletre lévő fúrás harántolta 25 méter vastagságban a bentonitos, mészcsomós agyagos, agyagos lignites, homokos, kavicsos homokos és kavicsos Somlóvásárhelyi Formációt, a képződmény 95 méter mélyen jelent meg.

A területen számos pannon képződmény előfordul (Somlói Formáció, Tihanyi Formáció, Száki Agyagmárga, Kisbéri Kavics, Zagyvai Formáció, Újfalui Formáció, Algyői Formáció). Az oligocén összlethez hasonlóan a terület nagy részén megtalálhatók. Kivételt csak a K-i rész képez, ahol a prealbai képződmények már a felszínen vannak, illetve Tatabánya környékén is hiányoznak, ahol az oligocén képződmények felszín közeli helyzetben találhatók. Elterjedésüket tekintve leggyakoribb a Száki Agyagmárga, mely legtöbbször a Kisbéri Kaviccsal együtt jelenik meg, a Kisbéri Kavics önállóan csak néhány fúrásban fordul elő. A Tihanyi és Somlói Formációk a terület Ny-DNy-i részén jellemzők Naszály környezetében és Kocstól DK-re, míg a Zagyvai Formáció kizárólag ÉNy-on, Naszály környékén található. Újfalui és Algyői Formációt mindössze egyetlen fúrásban azonosítottak, mely ugyancsak Naszály mellett található.

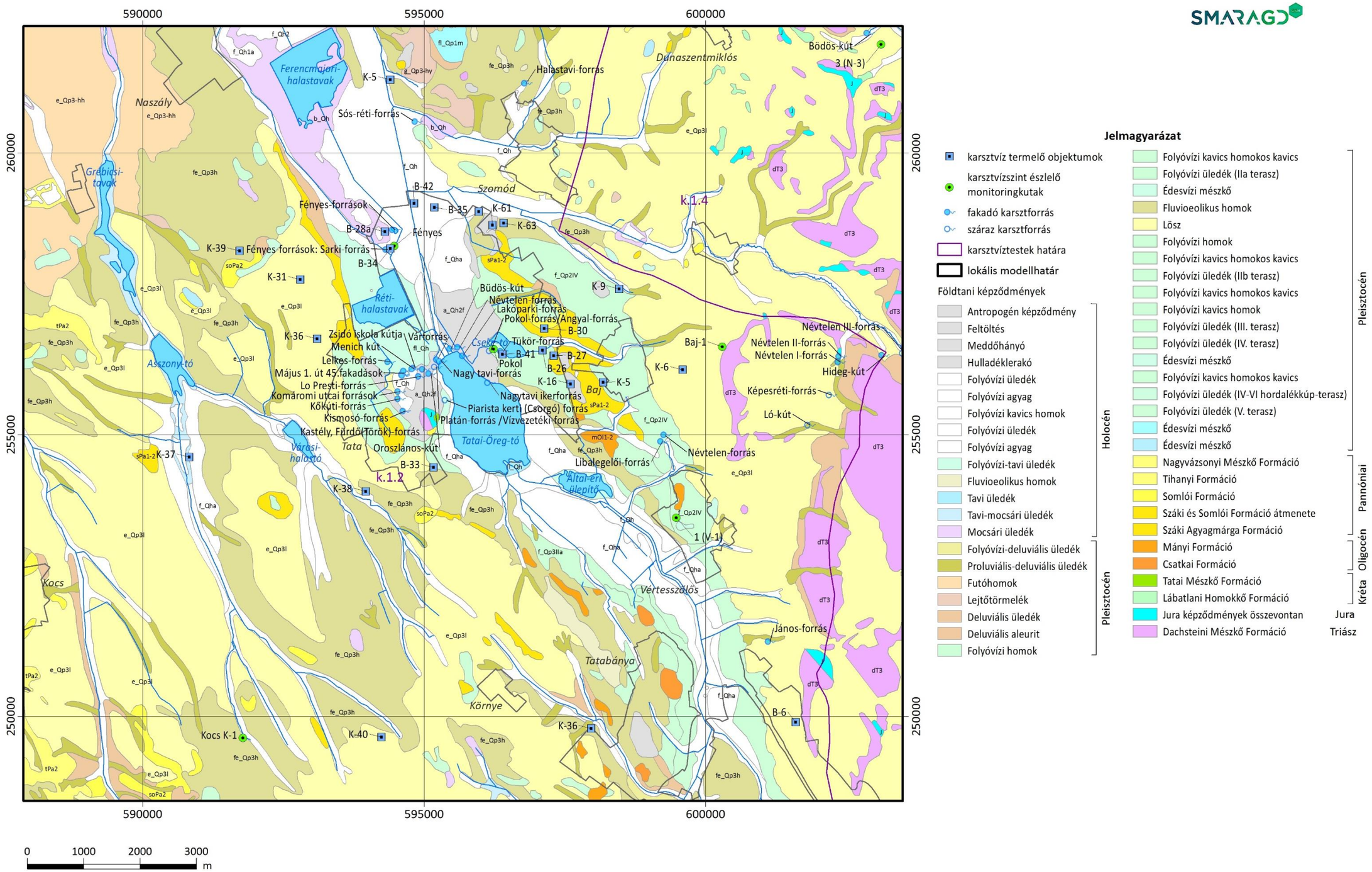
A leggyakrabban előforduló Száki Agyagmárga agyagmárgás aleuritból, ritkán finomszemű homokból áll, aleurit betelepüléseket tartalmaz. A Kisbéri Kavics jellemzően szürke kavicsos homok, homokos gyöngykavics, kevés aleurit, agyagmárgás aleurit betelepüléssel. A Somlói Formáció szürke, molluszkás, agyagmárgás aleurit, lemezes aleurit, és finomhomok váltakozásából, míg a Tihanyi Formáció agyagmárgás aleuritból, aleuritból, finomhomokból, vékony szenes agyagból, tarkaagyagból, lignit és dolomit rétegekből áll. A Zagyvai Formációt homok, homokkő, aleurit, agyag, agyagmárga sűrű váltakozása jellemzi barnakőszén csíkokkal.

A pannon képződmények vastagsága a terület középső részén, Környe, Tata, Szomód, Baj környezetében 5 és 50 méter között változik. Ny-ÉNy felé haladva egyre vastagabbak, Kocs térségében 100-150 m-t, míg Naszály környékén már a 150-250 m-t is elérik. A rétegsorok alapján a pannon képződmények mindenhol felszín közeli helyzetben vannak, a terület nagy részén általában 1-10 méter között megtalálhatók. Tatától ÉK-re Szomód térségében kicsit mélyebben, 10-20 méter között jelennek meg.

A területen a leggyakoribb negyedidőszaki képződmény a késő-pleisztocén lösz, de Kocs és Naszály között holocén folyóvízi üledékek és futóhomok is előfordulnak, valamint Tata környezetében folyóvízi és tavi üledékeket is találunk. A negyedidőszaki képződmények maximális vastagsága általában 15-20 méter.



2. ábra: A lokális modell területe topográfiai térképen



Jelmagyarázat

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

Földtani képződmények

Holocén
- Antropogén képződmény
- Feltöltés
- Meddőhányó
- Hulladéklerakó
- Folyóvízi üledék
- Folyóvízi agyag
- Folyóvízi kavics homok
- Folyóvízi üledék
- Folyóvízi agyag
- Folyóvízi-tavi üledék
- Fluvioeolikus homok
- Tavi üledék
- Tavi-mocsári üledék
- Mocsári üledék

Pleisztocén
- Folyóvízi-deluviális üledék
- Proluviális-deluviális üledék
- Futóhomok
- Lejtőtörmelék
- Deluviális üledék
- Deluviális aleurit
- Folyóvízi homok
- Folyóvízi kavics homokos kavics
- Folyóvízi üledék (IIa terasz)
- Édesvízi mészkő
- Fluvioeolikus homok
- Lösz
- Folyóvízi homok
- Folyóvízi kavics homokos kavics
- Folyóvízi üledék (IIb terasz)
- Folyóvízi kavics homokos kavics
- Folyóvízi kavics homok
- Folyóvízi üledék (III. terasz)
- Folyóvízi üledék (IV. terasz)
- Édesvízi mészkő
- Folyóvízi kavics homokos kavics
- Folyóvízi üledék (IV-VI hordalékkúp-terasz)
- Folyóvízi üledék (V. terasz)
- Édesvízi mészkő
- Édesvízi mészkő

Pleisztocén

Pannóniai
- Nagyvázsonyi Mészkő Formáció
- Tihanyi Formáció
- Somlói Formáció
- Száki és Somlói Formáció átmenete
- Száki Agyagmárga Formáció

Oligocén
- Mányi Formáció
- Csatkai Formáció

Kréta
- Tatai Mészkő Formáció
- Lábatlani Homokkő Formáció

Jura
- Jura képződmények összevontan

Triász
- Dachsteini Mészkő Formáció

3. ábra: Fedett földtani térkép a lokális modell területén
(Magyarország fedett földtani térképe 1:100 000 Magyar Állami Földtani Intézet 2005 [31]

2.2.2 Természetes megcsapolódások

A lokális modell legfontosabb forrásai *Tatán* fakadnak. A modellterületre eső forrásokat a ***2. ábra*** mutatja be.

A legtöbb forrás az egykor Tatai szirtek, ma Kálvária-dombnak nevezett mezozoós mészkőtömb szerkezeti vonalai mellett fakadt. Csoportosításuk Fogarasi (2001) [17] szerint:

- Angolparkban eredő Tükör és Angyal (Pokol)-forrás, melyek az eredeti összesített vízhozam 1/3-át adta.
- Fényes források: legalacsonyabban eredő források, hozamuk az összhozam 45-50%-át tehette ki.
- Nagy (Öreg)-tó forrásai (Vár alatti nagyforrás, part menti kisebb források): Vízhozamuk az előbbieknél jóval kisebb volt. A Nagy-tavi ikerforrás az Öreg-tóban található, az év jelentős részében víz alatt van, amikor a tavat leengedik, csak akkor válik láthatóvá. Fakadására a tó vízszintjének mesterséges mozgatása is hatással van.
- A tatai szirt forrásai: Északkeleti peremén fakadó források: Kastély-, Törökfürdő-, Piaristakerti-, Lo Presti-forrás. Délnyugati perem: Kis-Mosó-, Komárom utcai-források.

A természetes hozamokról és a források elhelyezkedéséről eltérő adataink vannak. Nehezen összehasonlíthatók, mert különböző időszakokban és különböző módszerrel mérték, becsülték őket. A legrégebbi adatsor Horusitzky Ferenc 100 évvel ezelőtt végzett felméréseiből származik. Horusitzky becslését, a VITUKI 1950-ben végzett hozammérésének eredményeit és Ballabás által becsült forrás fakadási szinteket a ***1. táblázat*** foglalja össze.

1. táblázat: A nagyobb tatai karsztforrások alapadatai Ballabás [13] szerint Horusitzky (1923) [18] és Tóth et.al. (1999) [25] alapján

A forrás neve	Fakadási szint [mBf]	Vízhozam [l/perc]		Hőmérséklet [°C]
		Horusitzky H. becsült, 1919	VITUKI mért, 1950	
Fényes-források	118-119	81000	25200	22
Tükör-forrás (Angol-park)	138	33000	17400	20
Pokol-forrás (Angol-park)	140,8	27000	60	20,5
Vár alatti nagyforrás	118	10998	3400	21
Komárom utcai források	130-137	1800	1440	11 – 20
Nagytavi-ikerforrás	127,3	1000	340	19
Lo Presti forrás	139,3	600	340	19
Kis-mosó-forrás	136,5	504	236	18,5
Törökfürdői-forrás	135,3	210	60	20,5
Plébánia-kerti forrás	126,8	180	480	20,5
A Kastély forrásai	135,3	60	180	15
Piaristakerti forrás	128	36	1	15
Kő-kút	133,5	32,4	4	18
Összesen		**156420,4**	**49141**	

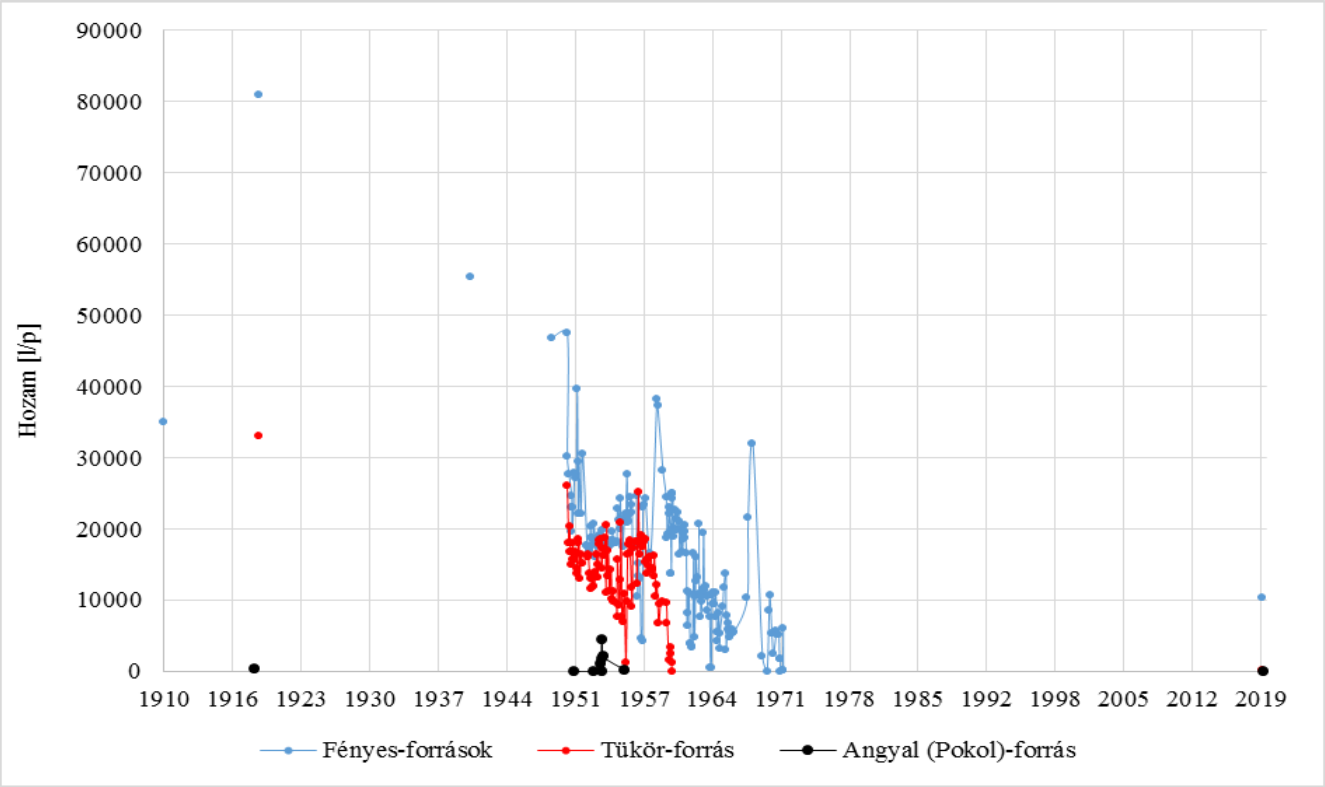
Tatabányán már a XIX. század végén megkezdődött a szénbányászat. A II. világháború után szénigény miatti bányászat már érintette a legmagasabban fekvő (141,6 mBf) angolparki források hozamát. 1953-ban a Síkvölgyi aknában bekövetkezett vízbetörés a 134 mBf szinten fakadó források hozamát lényegesen lecsökkentette, majd az 1962-es XV/b jelű akna vízbetörése elapasztotta az összes 125 mBf szinten fakadó forrás vizét és felére csökkentette a Fényes-forráscsoport hozamát (*Maller M.* 2012) [21]. 1953 és 1962 között a Fényes-források kivételével valamennyi forrás elapadt. A Fényes-források, illetve a XIV/a vízakna egy ÉNy-DK-i vető mellett találhatók. A XIV/a üzembe helyezése 1967-ben történt, a Fényes-források három év múlva, 1972-ben apadtak el. A szerkezeti zóna közvetlenül hatott. A szénbányászat Tatabányán és környékén 1987-ig tartott, azóta az elapadt források jórészt ismét megjelentek.

Az Angolkert két forrása a Tükör-forrás és az Angyal-forrás. A két forrás vízhozam idősorát az ***4. ábra*** mutatja.

A *Tükör-forrás* 1919-ben még 33 000 l/p hozammal táplálta a forrástó (Cseke-tó) vizét, 1961-ben apadt el. Hozama a bányászat megszűnése óta emelkedést mutat. Jelenleg a Vizimadár-tavat és azon keresztül a Malom-patakot táplálja. A 2019-es felmérés során a Tükör-forrás hozama 157 l/p volt. A Cseke-tó pótlása jelenleg a Vizimadár-tó mellett található termelőkútból történik.

Az *Angyal-forrás*, vagy más néven Pokol-forrás korábban 4 000 000 millió liter vízzel látta el a várost naponta, 1953 és 1962 között elapadt, jelenleg sem fakad. A forrás mellett található egykori vízmű aknában a vízszint jelenleg pár méterrel a felszín alatt található.

A *Fényes-forrásokról* (***4. ábra***) már 1910-ből is van adat, legnagyobb hozamát 1919-ben mérték, ami akkor több, mint 80 000 l/p volt. Az idősoron jól látszik az említett 1953-ban, és 1962-ben bekövetkezett hozamcsökkenés, a forrás végül 1973-ban elapadt, majd 2000 után jelent meg ismét. A 2019-es kataszterezés során a Katonai-tó kifolyójánál 8515 l/p hozamot mértünk, ami azonban nem a források teljes hozama. Ennél pontosabb adatot adnak Maller 2018-as mérései, a mért vízhozam 10 277 l/p volt (*Maller M. 2018)* [22]. A Fényes-források állandó hőmérsékletűek, egész évben 22- 24 °C körül vannak.



4. ábra: A Tükör-, Fényes- Angyal (Pokol)-források vízhozam idősorai (1910-2019) (Adatforrás: ÉDUVIZIG)

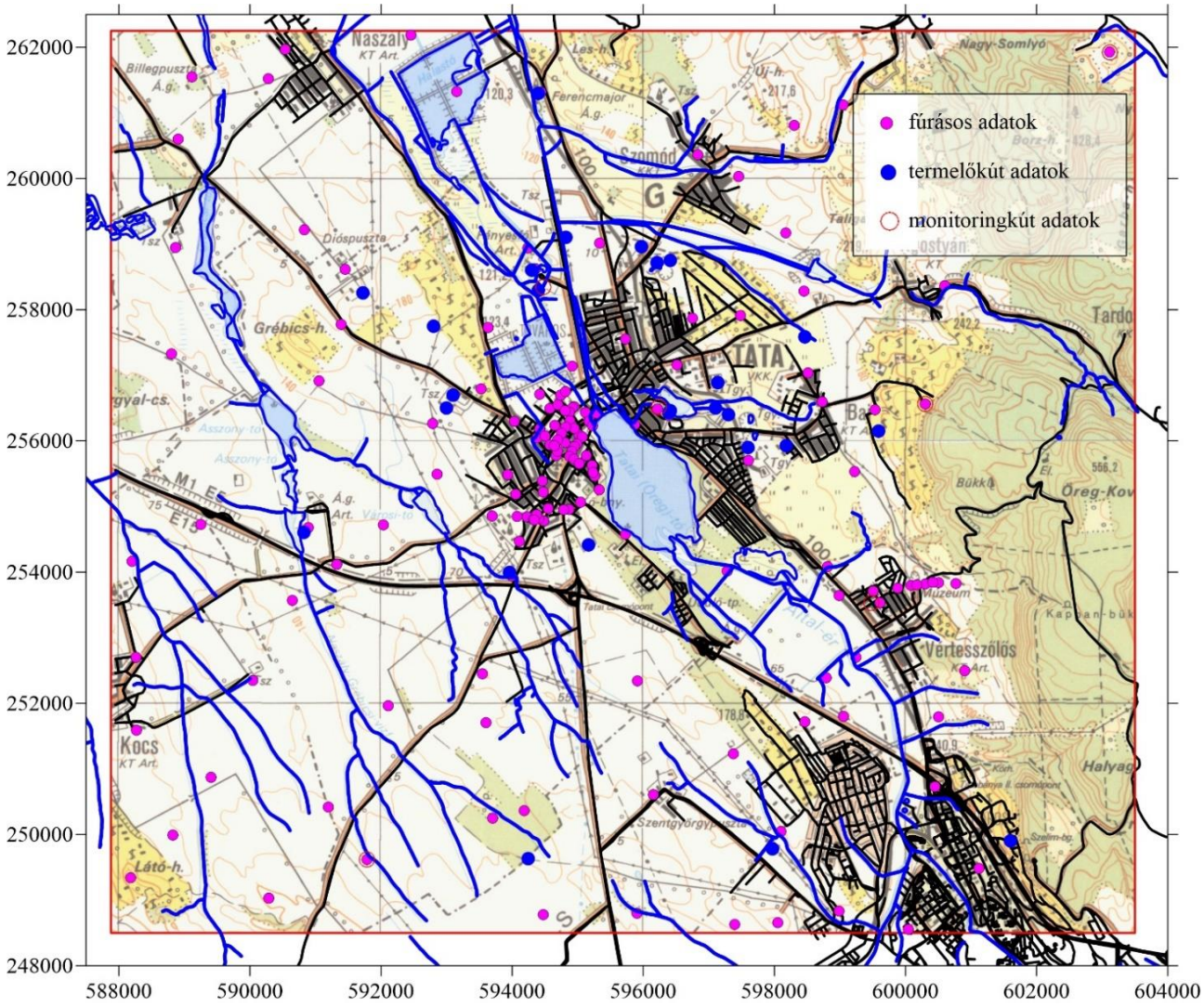
3. A LOKÁLIS NUMERIKUS MODELLEZÉS BEMUTATÁSA

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 regionális vízháztartási modellben, az egész karsztvíztárolóra jellemző, regionális elterjedésű képződményeket vettük alapul. A regionális numerikus modell vezérszintjeit alkotó hidrosztratigráfiai egységek a következők:

- Főkarszt (pre-albai képződmények):
- Függőkarsztos rétegcsoport –vízrekesztő képződmények
- Függőkarsztos rétegcsoport – vízvezető képződmények
- Alsó-pannon – miocén – oligocén dominánsan vízrekesztő 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, az MBFSz adatbázisában található fúrás figyelembevételével történt (***5. ábra)***.



5. ábra: A lokális modell területére eső, a modellgeometria megalkotásához felhasznált fúrások és kutak helye

A hidrosztratigráfiai rétegek felszínéből szerkesztett numerikus rétegeken kívül, a karsztot két rétegre osztottuk, amelyet a karszt mélység felé csökkenő vízvezetőképessége indokolt. A karszt 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 -700 mBf-es feküszinttel vettük figyelembe. A regionális modelltől eltérően a mélykarszt rétegeit nem vettük figyelembe.

Az egyes rétegek felszínét a Surfer for Windows 21.1.158 verziószámú térinformatikai szoftverrel szerkesztettük meg az MBFSZ fúrási adatbázisa és a Geoszféra Kft. Tata területén mélyített geotechnikai fúrásai alapján. A kialakított lokális modellben tehát összesen 6 réteget és ebből következően 7 felszínt határoztunk meg. Ezek felülről lefelé a következők:

- 1. réteg: Kvarter és Felső-pannon képződmények
- 2. réteg: Alsó-pannon főképpen a Száki Agyagmárga formációba sorolt képződmények– miocén – oligocén képződmények
- 3. réteg: Pannon és oligocén részben vízvezető képződmények
- 4. réteg: Pannon és oligocén uralkodóan vízrekesztő képződmények
- 5. réteg: Karszt felső része

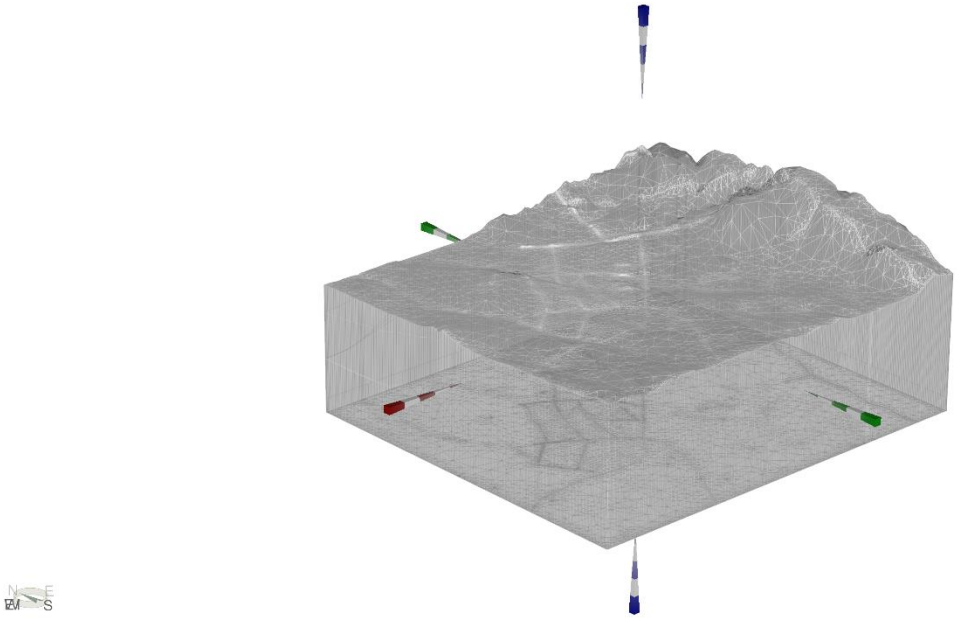
- 6. réteg: Karszt alsó része

A kapott felületek grid állományát (10 · 10 m) ASCII szövegállományként a FEFLOW numerikus modellbe bemenő adatként importáltuk, majd az Inverse Distance interpolációs módszerrel, de valójában 0 hatványkitevővel, ezért alapvetően lineáris interpolációs jelleggel rendeltük a rácsháló csomópontjaihoz.

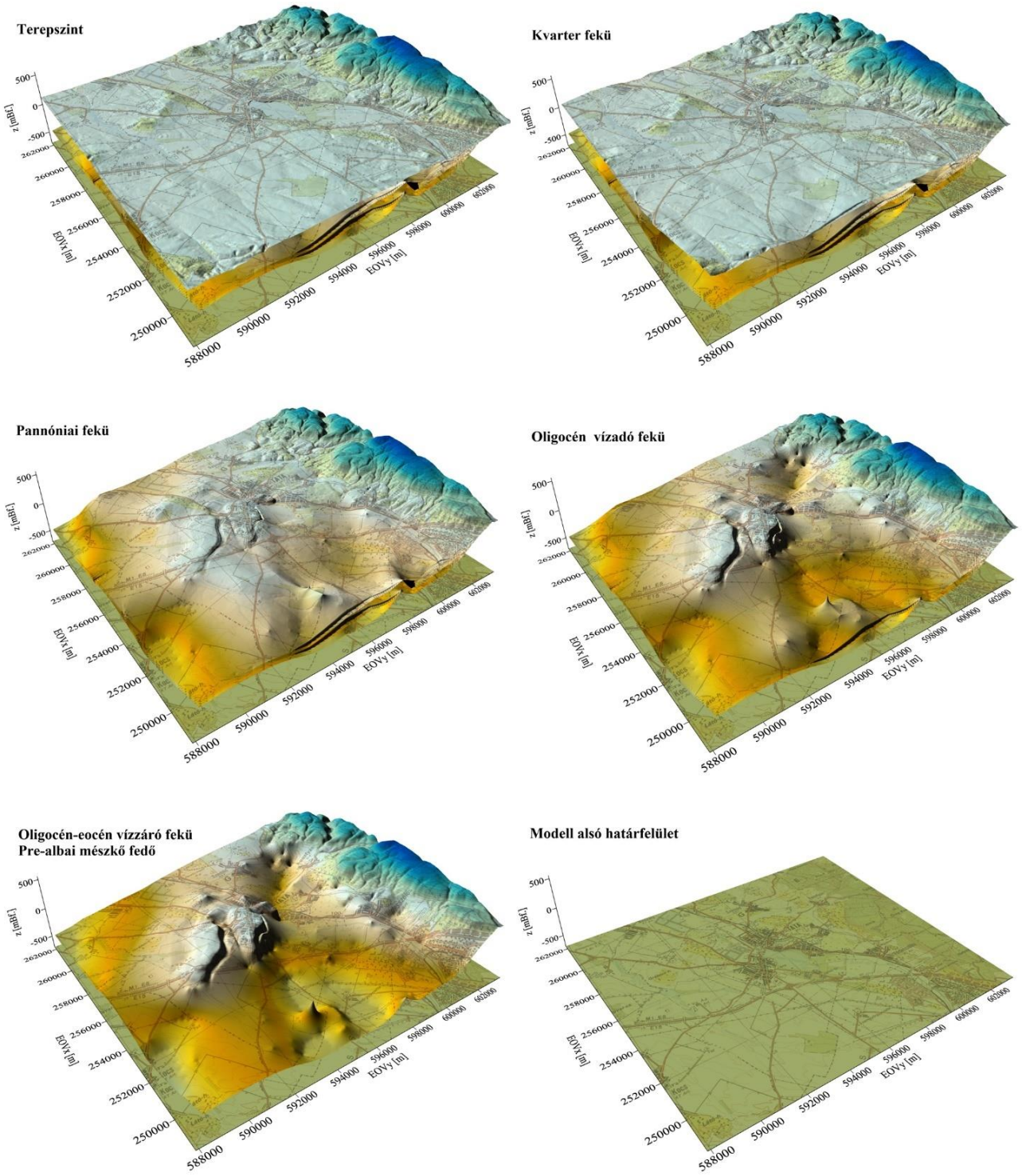
A numerikus modellben a terepszint képezi a felső felületet. A terepszintet a 10 m-es pontosságú digitális terepmodellből szerkesztettük.

Az 5. réteg feküszintje – 700 mBf, a 6. rétegé pedig -800 mBf. A legalsó réteg felvételét kevésbé a vízforgalomban betöltött szerepe, sokkal inkább annak igénye indukálta, hogy a karsztra telepített források modellbeli kilépési pontjai minimálisan a 2. felületen legyenek a modell feküjéhez képest. A modellben tehát az érdemi vízforgalom a karsztban az 5. rétegben történik.

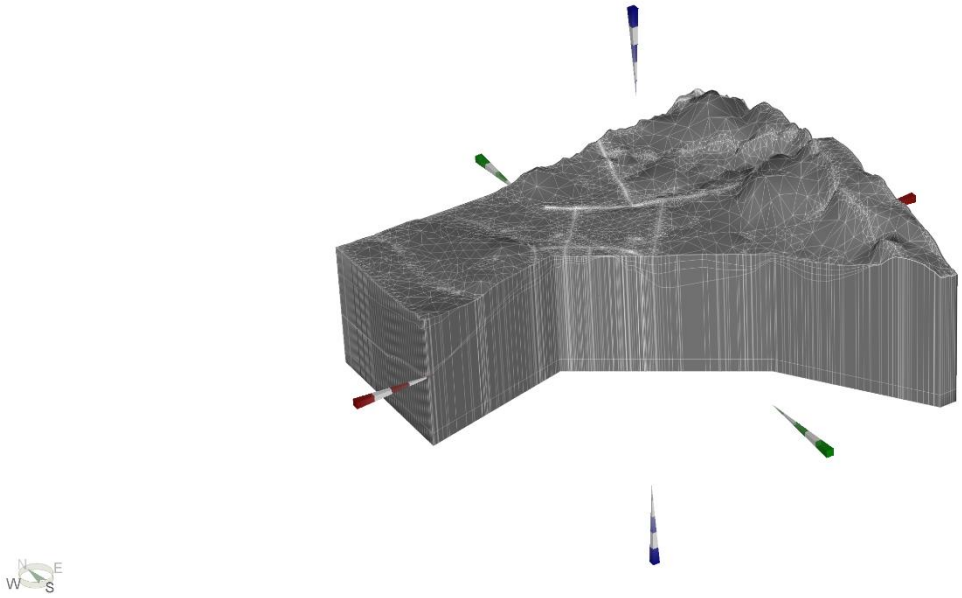
Ilyen módon a legalsó réteg vastagsága a modell eredményei szempontjából tetszőleges, ugyanakkor nagyobb vastagság esetén a peremfeltételekben az ismeretlen mélység felé történő peremi potenciálváltozásokat nagyobb hibával tudtuk volna a modellbe adaptálni, ezért egy optimális, de kellően vékony 6. modellréteg alkalmazása mellett döntöttünk, pusztán modelltechnikai okokból. A modell geometriáját ábrasorozaton (***6. ábra - 8. ábra)*** mutatjuk be. A ***9. ábra*** egy DNy-ÉK-i, míg az ***10. ábra*** egy DK-ÉNy-i irányú, a tatai mezozoos sasbércen átmenő modellszelvényt mutat be.



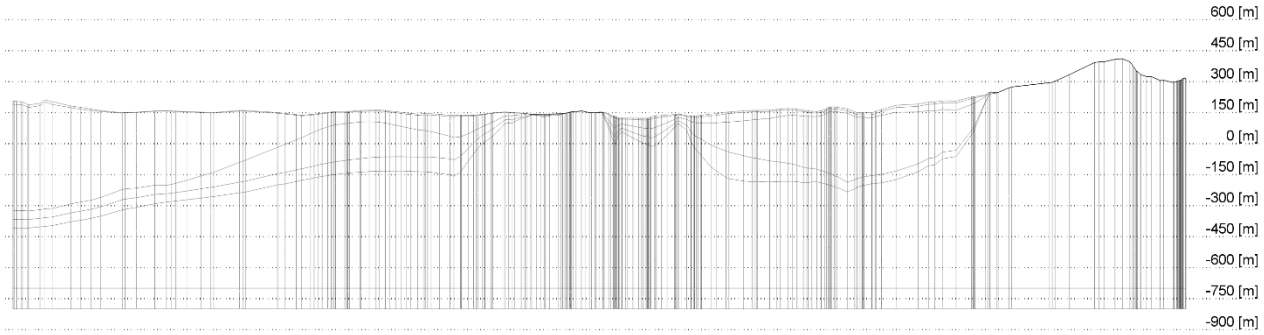
6. ábra: A modell geometriai felépítése



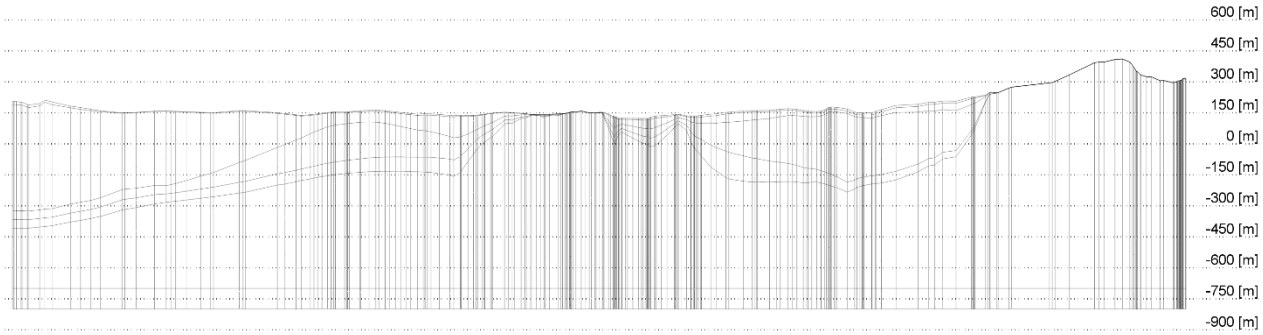
7. ábra: A numerikus modell rétegeinek 3D képe (3.5x túlmagasítás)



8. ábra: A numerikus modell 3D képe a Tatai Kálvária domb területéig húzódó kivágással (3.5x túlmagasítás)



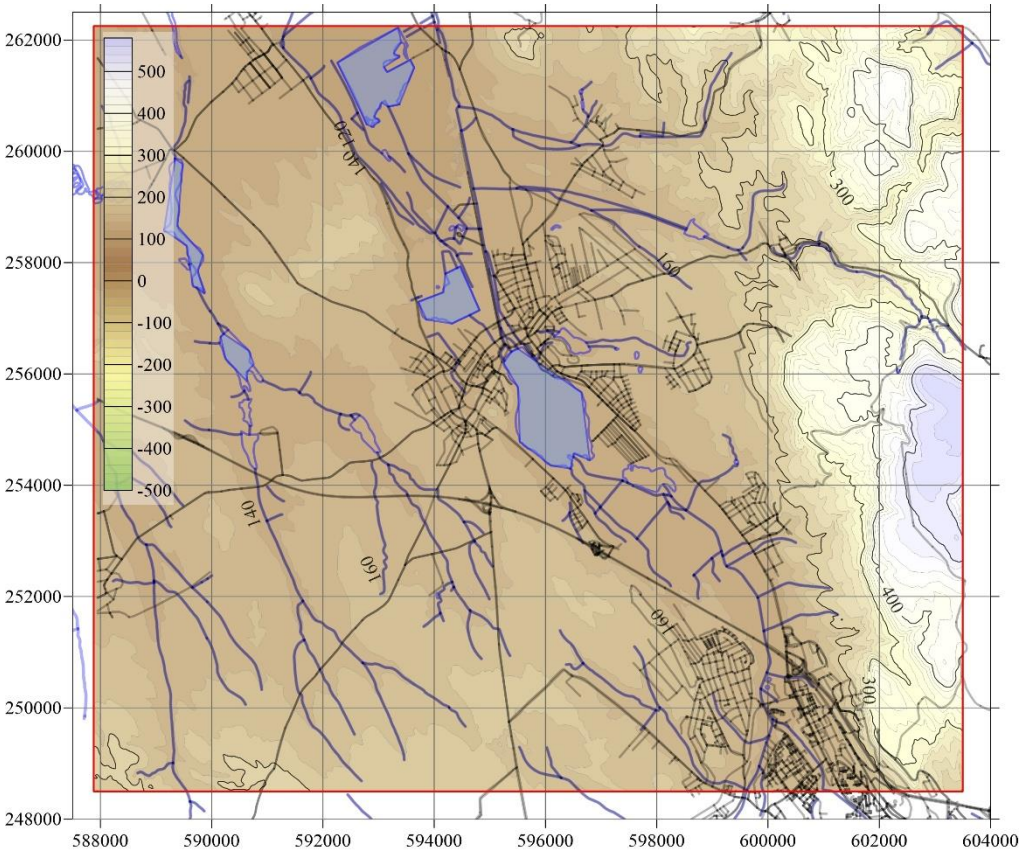
9. ábra: A numerikus modell DNy-ÉK-i irányú szelvénye (5x túlmagasítás)



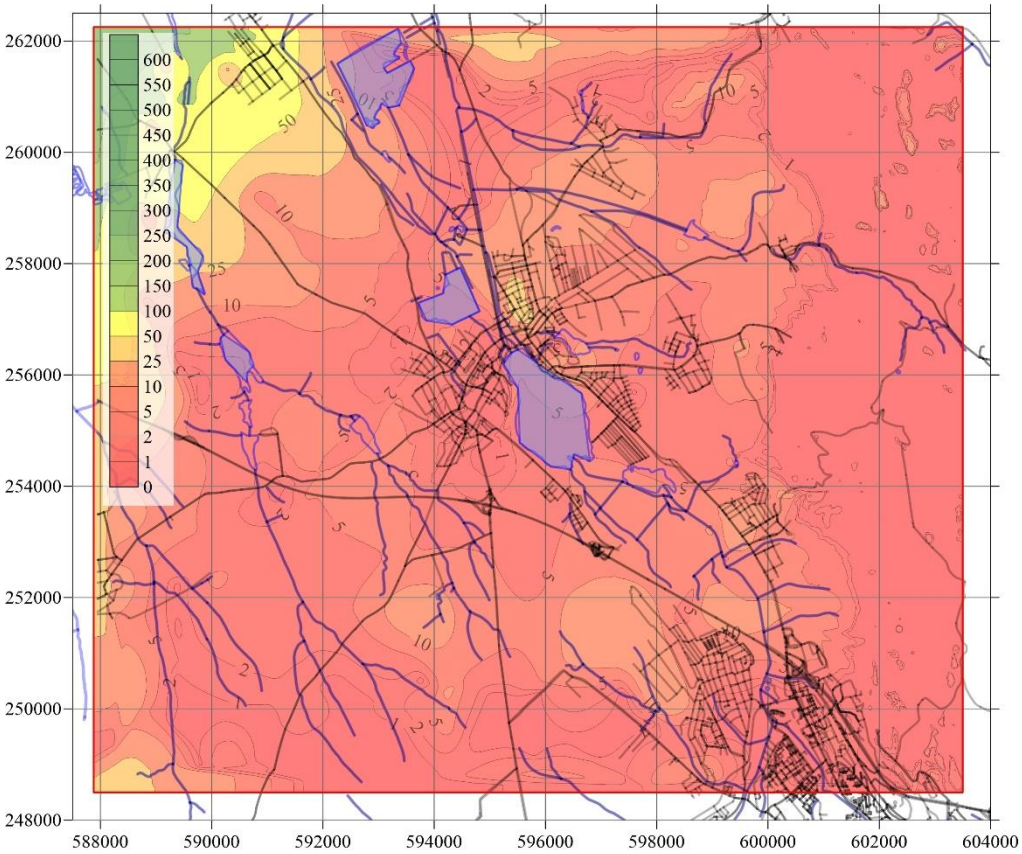
10. ábra: A numerikus modell DK-ÉNy-i irányú szelvénye (5x túlmagasítás)

A modell geometriájának kialakítása során, azokon a területeken, ahol a valóságban a főkarszt a felszínen van, az adott rétegben a vékony rétegvastagságok mellett paraméterváltást alkalmazunk (a mészkő paramétereit másoltuk a megfelelő elemekbe a mészkőtest leképezésére.

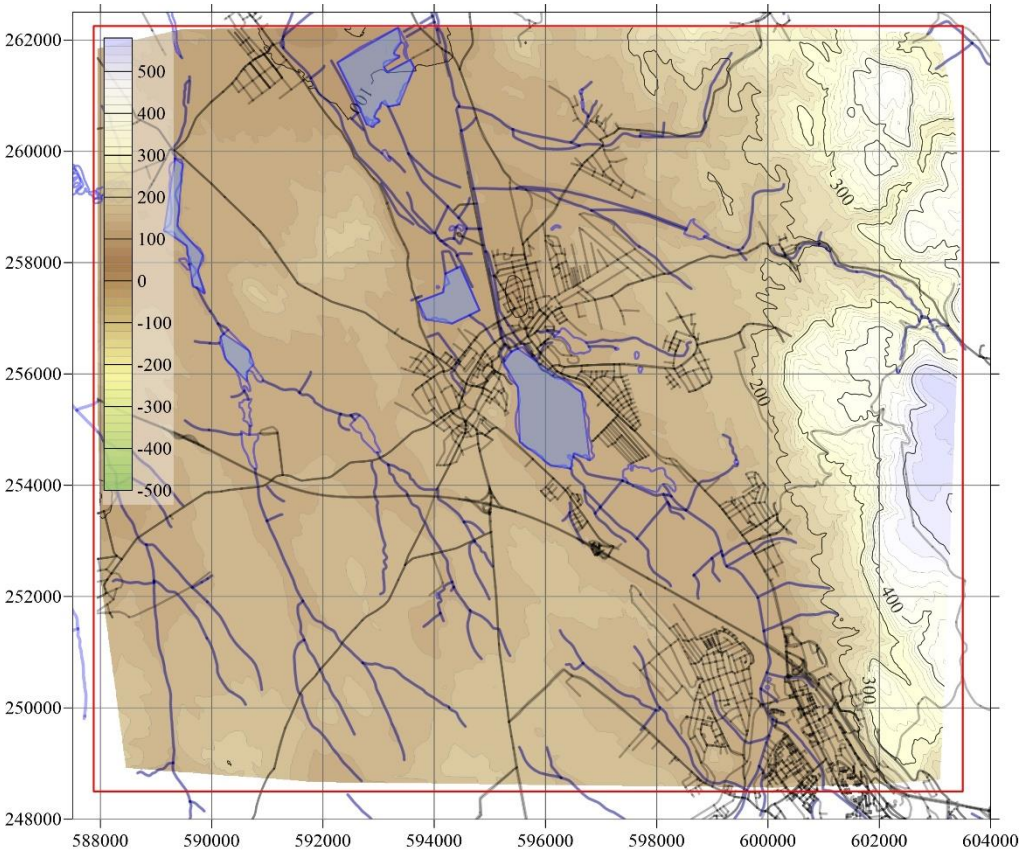
A ***11-19. ábra***sorozat mutatja be a numerikus rétegek egyes felszíneit, illetve réteg vastagságait.



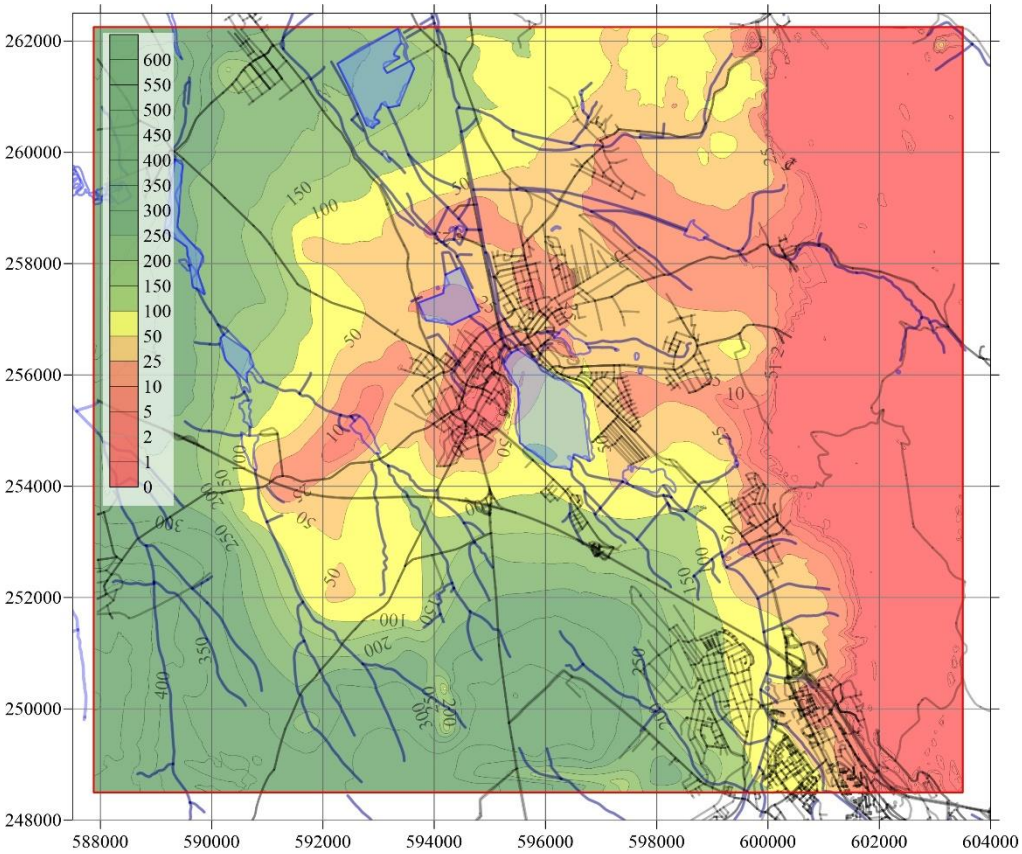
11. ábra: Az 1. numerikus modell felszín (Terepszintek)



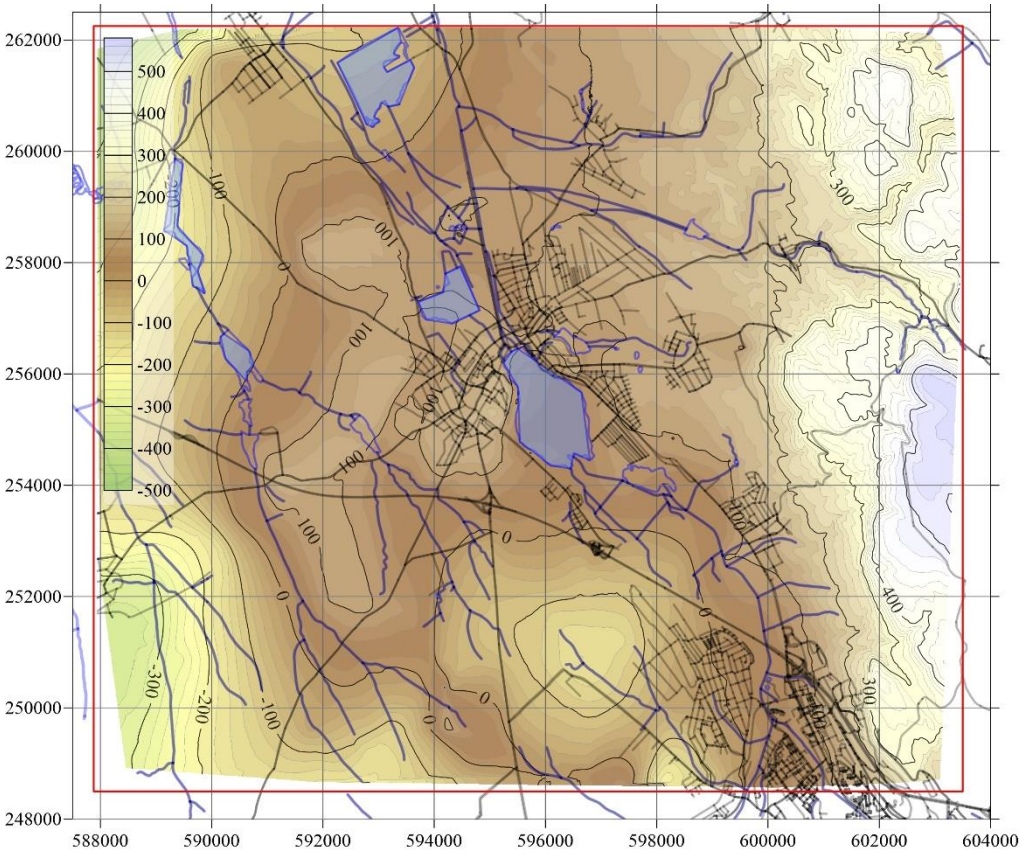
12. ábra: Az 1. numerikus modell réteg vastagsága



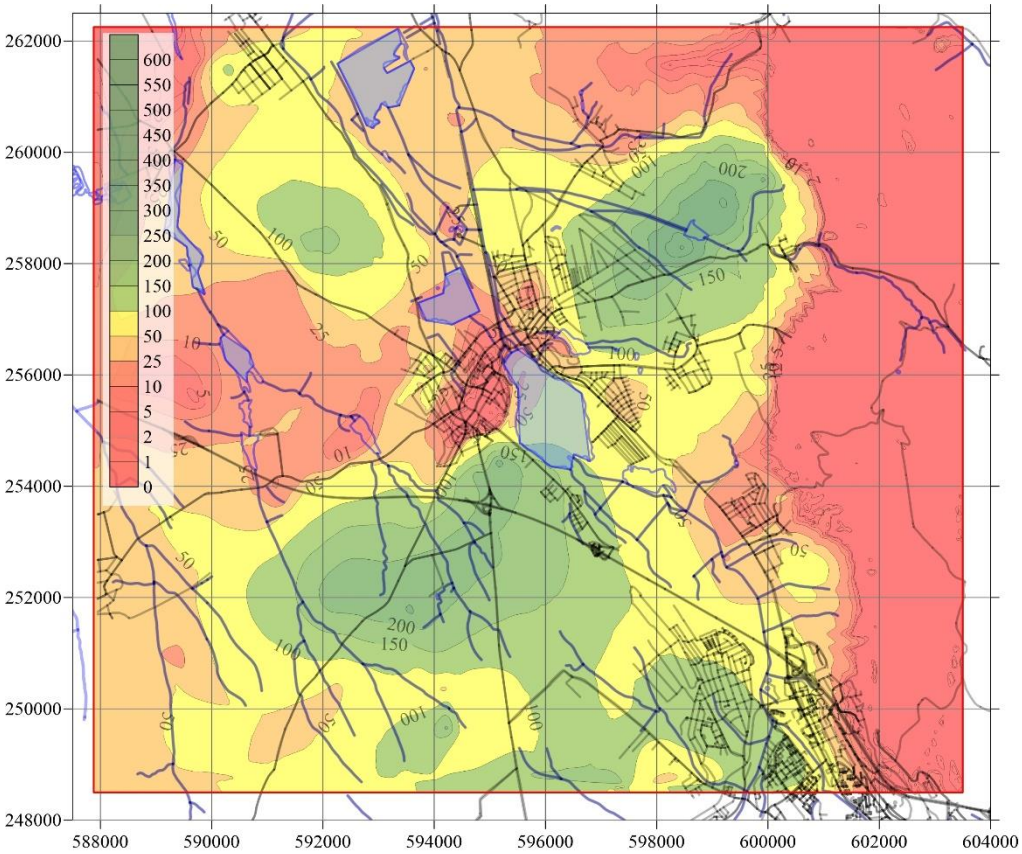
13. ábra: A 2. numerikus modell felszín



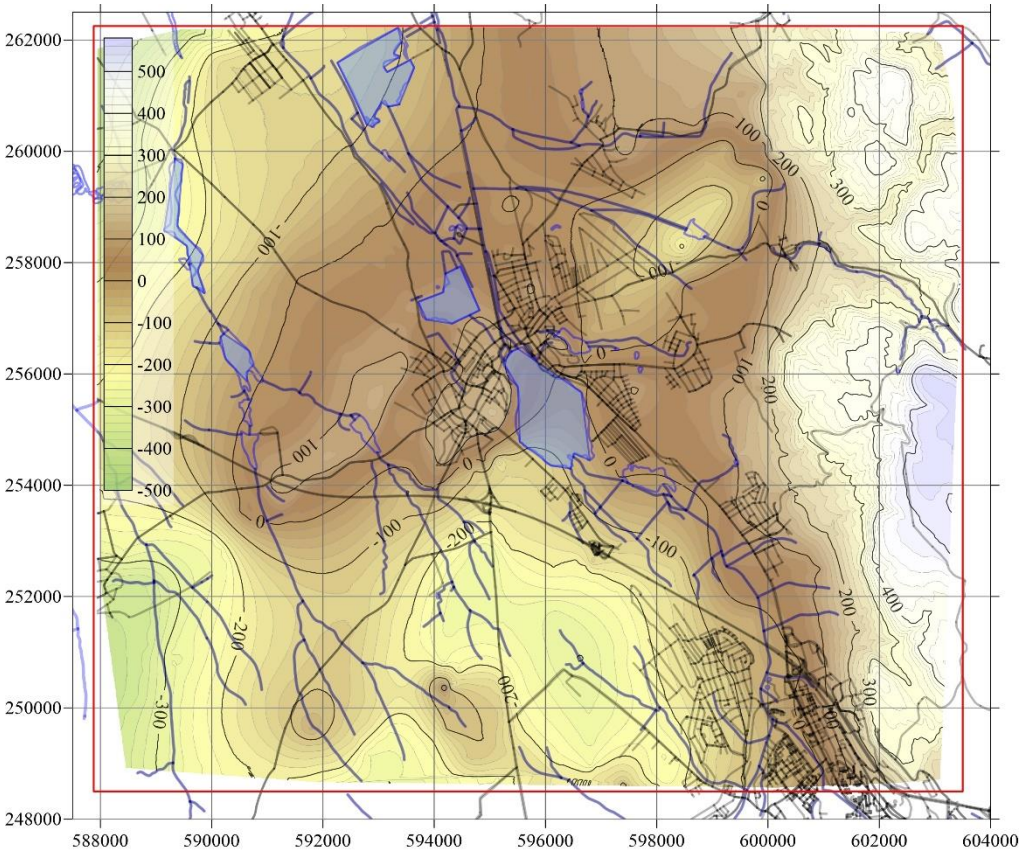
14. ábra: A 2. numerikus modell réteg vastagsága



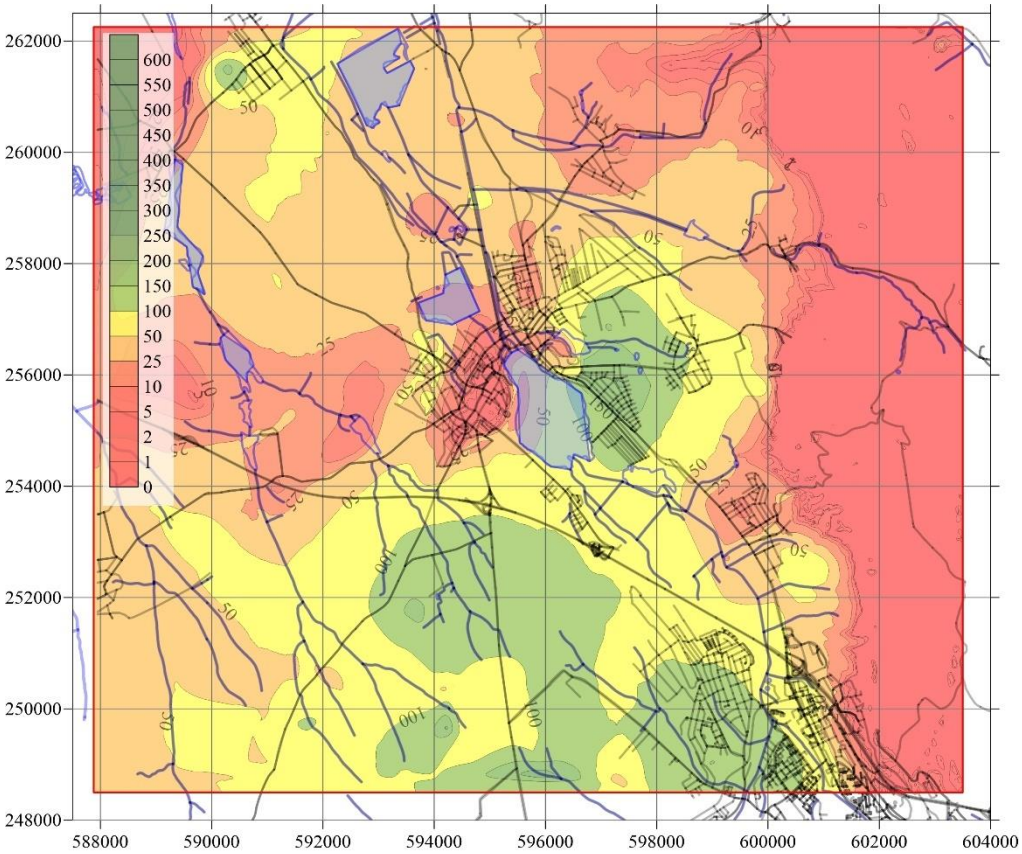
15. ábra: A 3. numerikus modell felszín



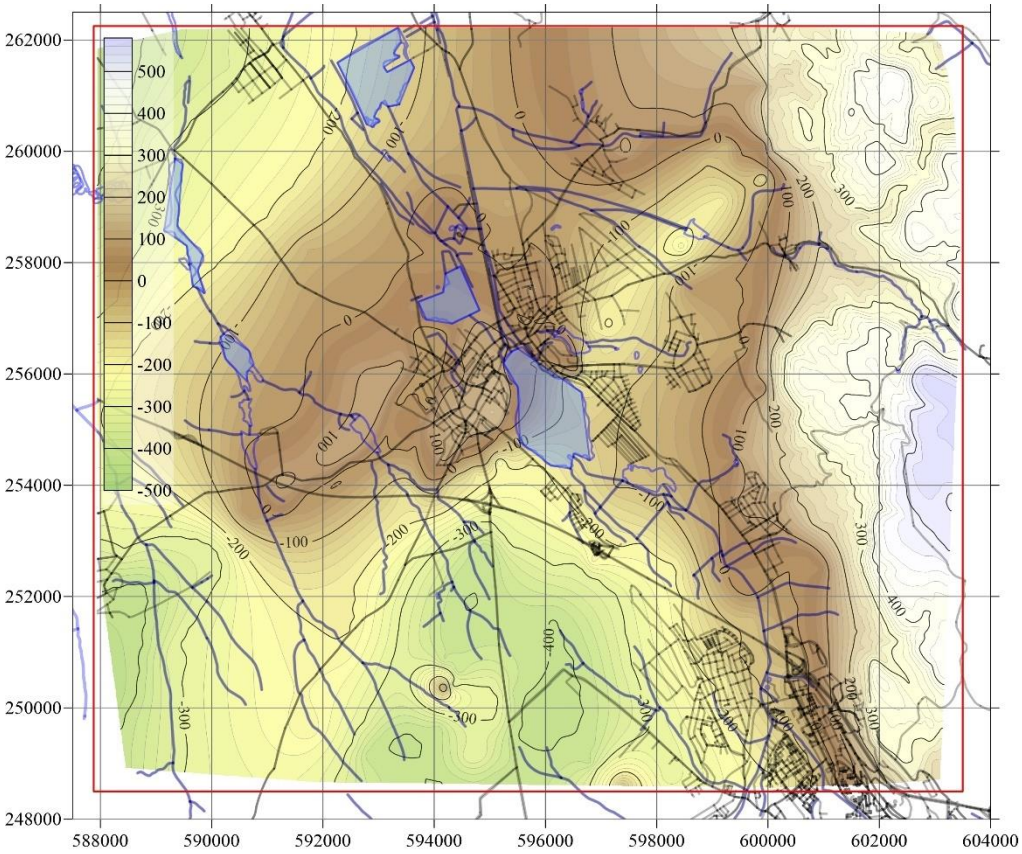
16. ábra: A 3. numerikus modell réteg vastagsága



17. ábra: A 4. numerikus modell felszín



18. ábra: A 4. numerikus modell réteg vastagsága

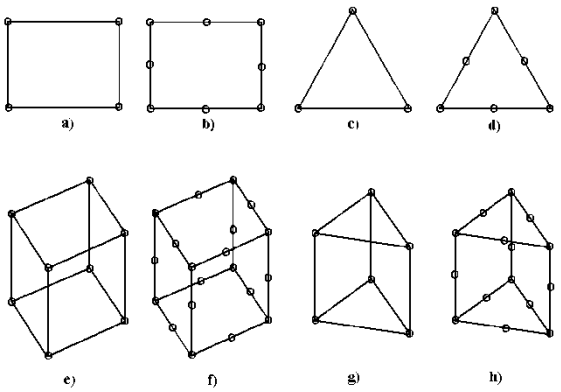


19. ábra: Az 5. numerikus modell felszín (mészkőfelszín)

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 Dunántúli-középhegység 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 (***20. 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.



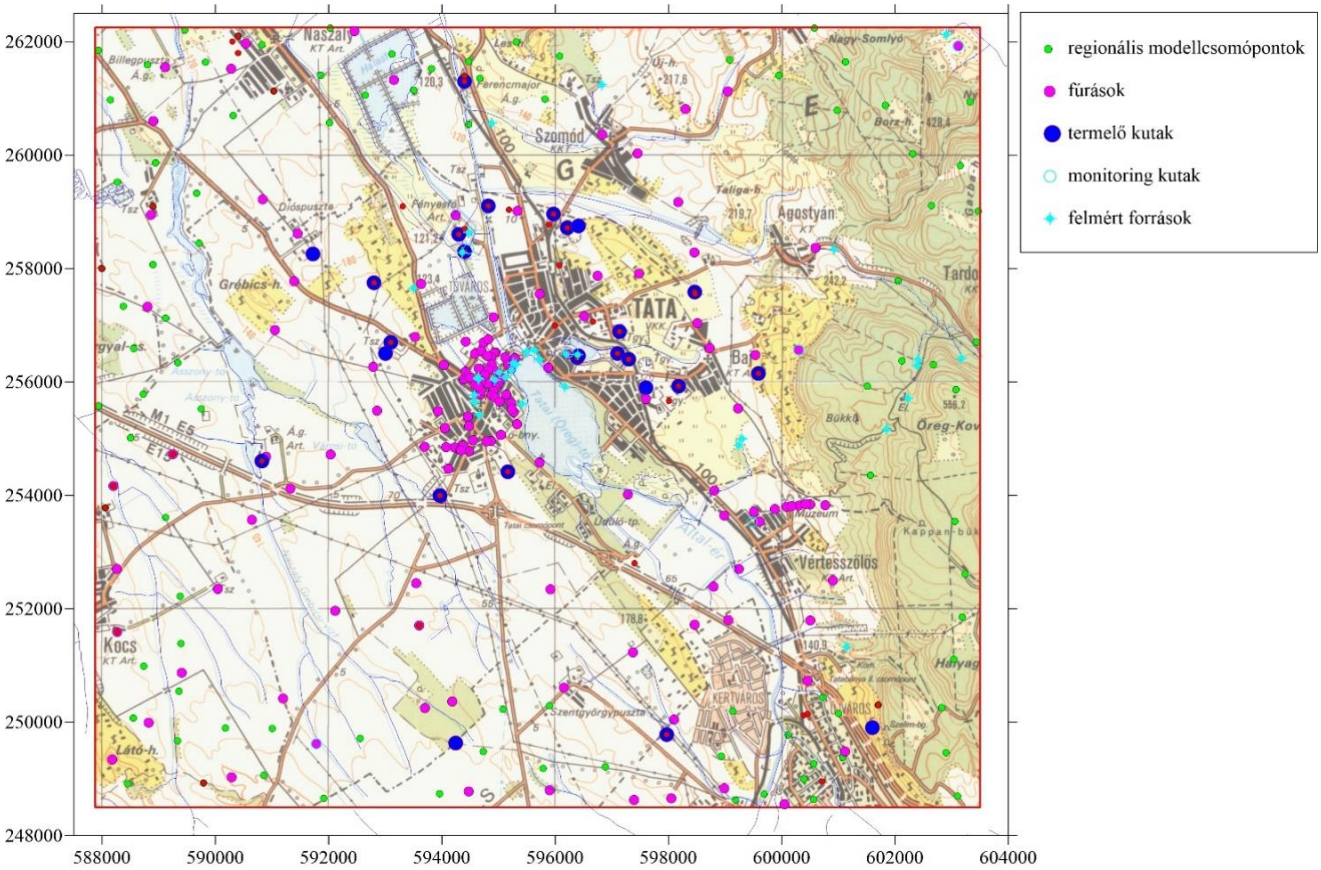
2D modul:
a) 4-csomópontos
b) 8-csomópontos négyoldalú elemek,
c) 3-csomópontos
d) 6-csomópontos háromoldalú elemek
3D modul:
e) 8-csomópontos
f) 20-csomópontos négyoldalú prizmák
g) 6-csomópontos
h) 15-csomópontos háromoldalú prizmák

20. ábra: A FEFLOW szoftverben alkalmazható elemek

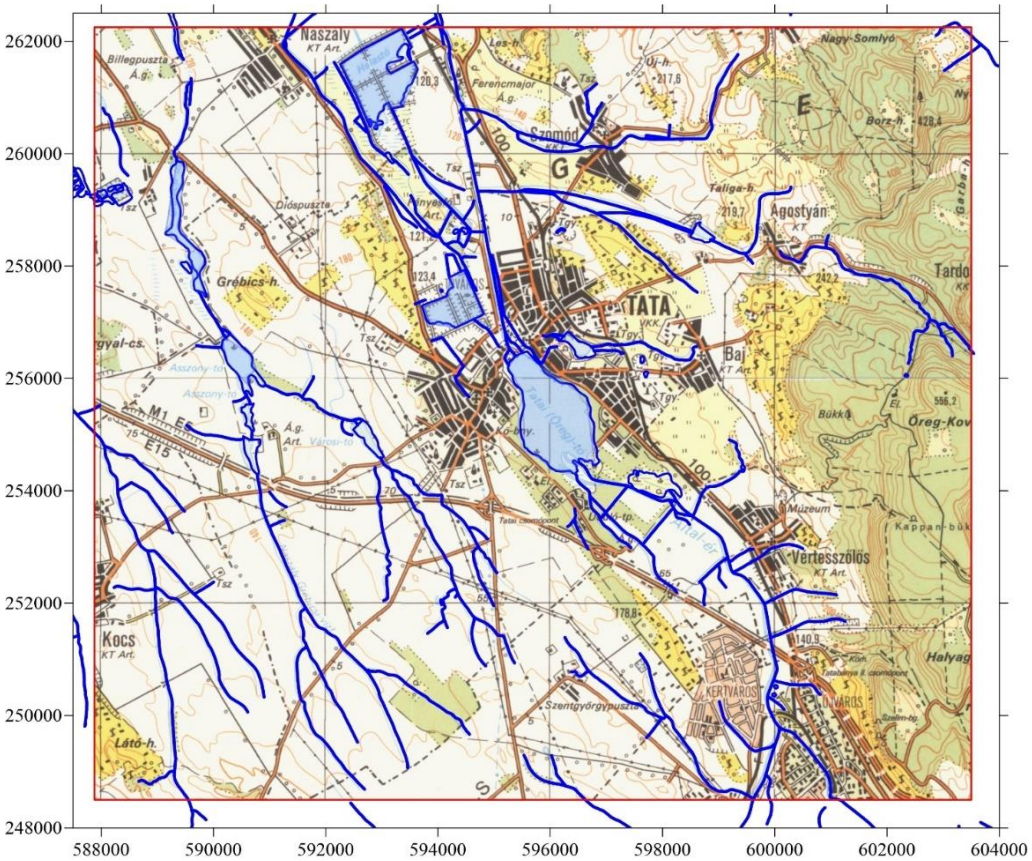
A hálókiosztás során a modellezett térrészt háromszög alapú prizmákkal definiáltuk (6-csomópontos háromoldalú lineáris prizmák). A rácsháló kialakításánál a következő elemekhez rendeltünk csomópontot:

- Pont elemek (***21. ábra***):
  - hideg karsztvíztest területén a karsztot, illetve a fedőt megcsapoló termelő objektumok, amelyekből van termelési adat
  - a termál karsztvíztest területén a karsztot megcsapoló termelő objektumok, amelyekből van termelési adat
  - minden karsztforrás a Smaragd-GSH Kft. által a projekt keretében 2019-ben végzett forrásfelmérés alapján
  - törzshálózati karsztvízszint észlelő monitoring kutak
  - a lokális modellel való jobb koherencia érdekében a modell peremétől számított 1500 m-es körzeten belül eső regionális modell csomópontok (modellezés technikai jellegű megkötés)
- Vonal elemek (***22. ábra***):
  - pontosított vetőhálózat (kiszélesített vonalelemekként)
  - részletes folyó, tó és kisvízfolyások hálózata
  - a modell peremén egy 50 m széles modellezés technikai réteg, amivel a regionális modellből származó peremfeltételek okozta potenciál-ugrásokat tompítjuk le.

A vízfolyásokat, illetve a tavak, tározók partélének vonalát vonal elemekkel követtük definiáltuk (***22. ábra***), hogy elkerüljük a felesleges pontokon való sűrítést. A vízfolyások hálózatát az OVF vízrajzi állományából szűrtük le.

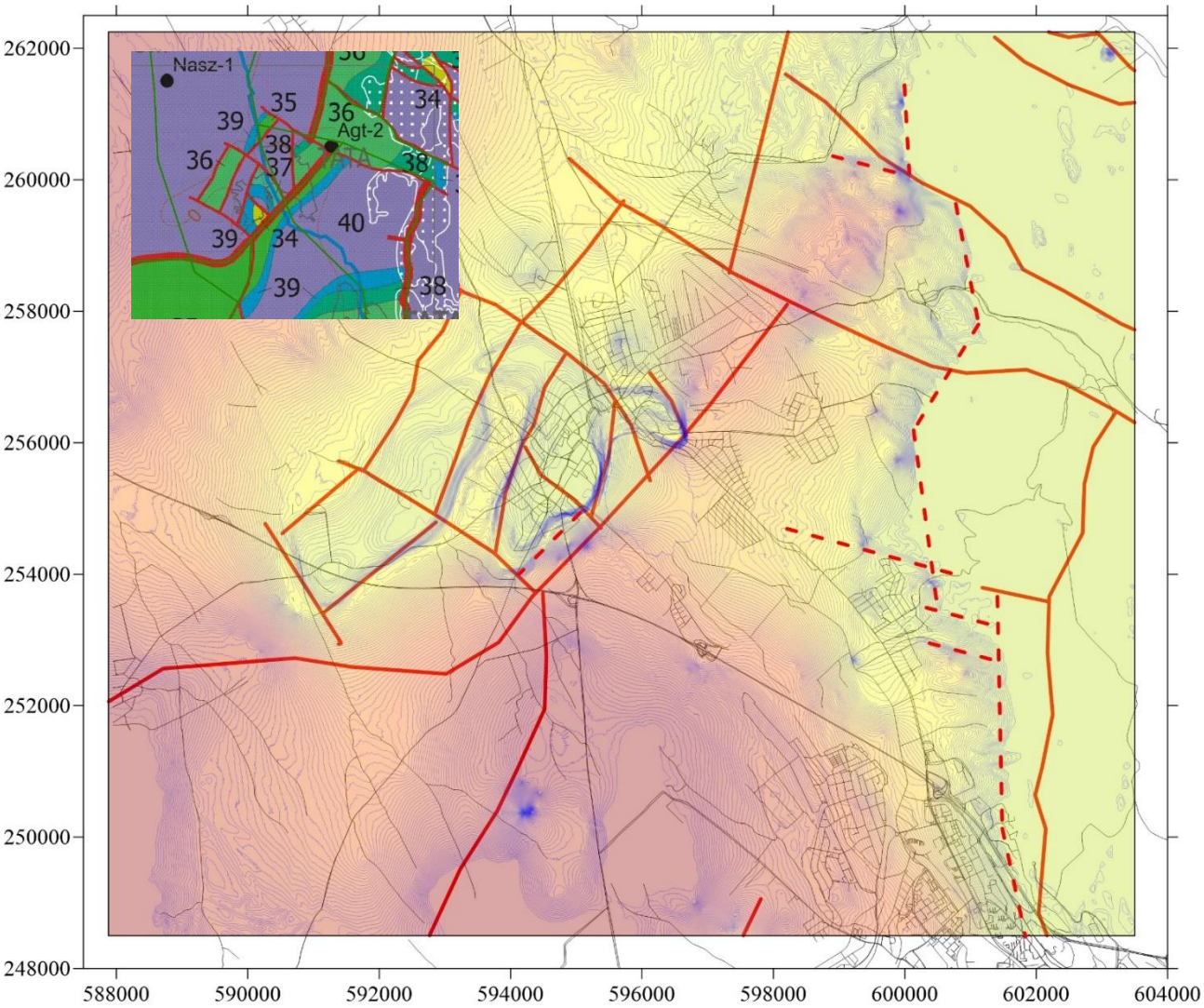


21. ábra: Pont elemek



22. ábra: A pontosított felszíni vízhálózat, vonalelemek a modellben

A vetőket az M= 1:500 000 pre-kainozoos földtani térkép [30] alapján vettük figyelembe, amit ezt követően a kiszerkesztett mészkőfelszín alapján pontosítottunk (***23. ábra***).

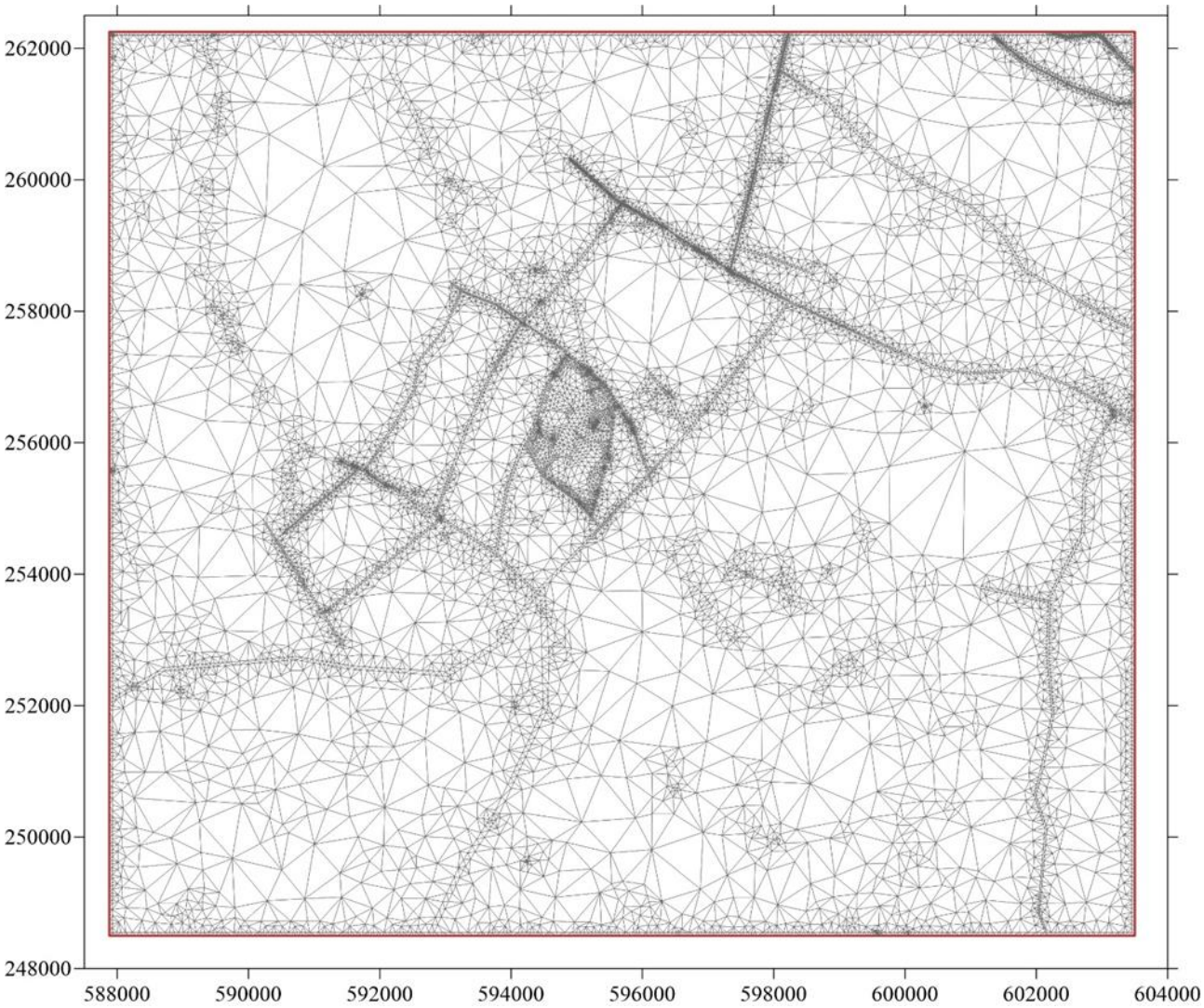


23. ábra: A pontosított vetőhálózat és az elsődleges forrásként használt pre-kainozoos tektonikai térképelemek Folytonos vonalak: a modellbe adaptált vonalelemek, szaggatott vonalak: további feltételezhető vetőelemek

A rácsháló kialakítása során a vetőket vonalelemek helyett 5 méter széles törtvonal alakú elemekkel, azaz kiszélesített vonalelemekkel közelítettük, annak érdekében, hogy a vetőket mind 2D, mind 3D elemekkel a modellbe lehessen illeszteni. A vízfolyások is ESRI „shape file”-ba kerültek, amiből a generáláshoz ú.n. supermesh állomány készült, aminek felhasználásával rácsháló generálást a Triangle Mesh Generátorral végeztük el.

A rácsháló egy felületen 13 291 db csomópontot és 25 794 db elemet tartalmaz. A 6 rétegű numerikus modell, így összesen 93 037 db csomópontból és 154 764 db véges elemből áll (***24. ábra***)

.



24. ábra: A numerikus modell rácshálója

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.

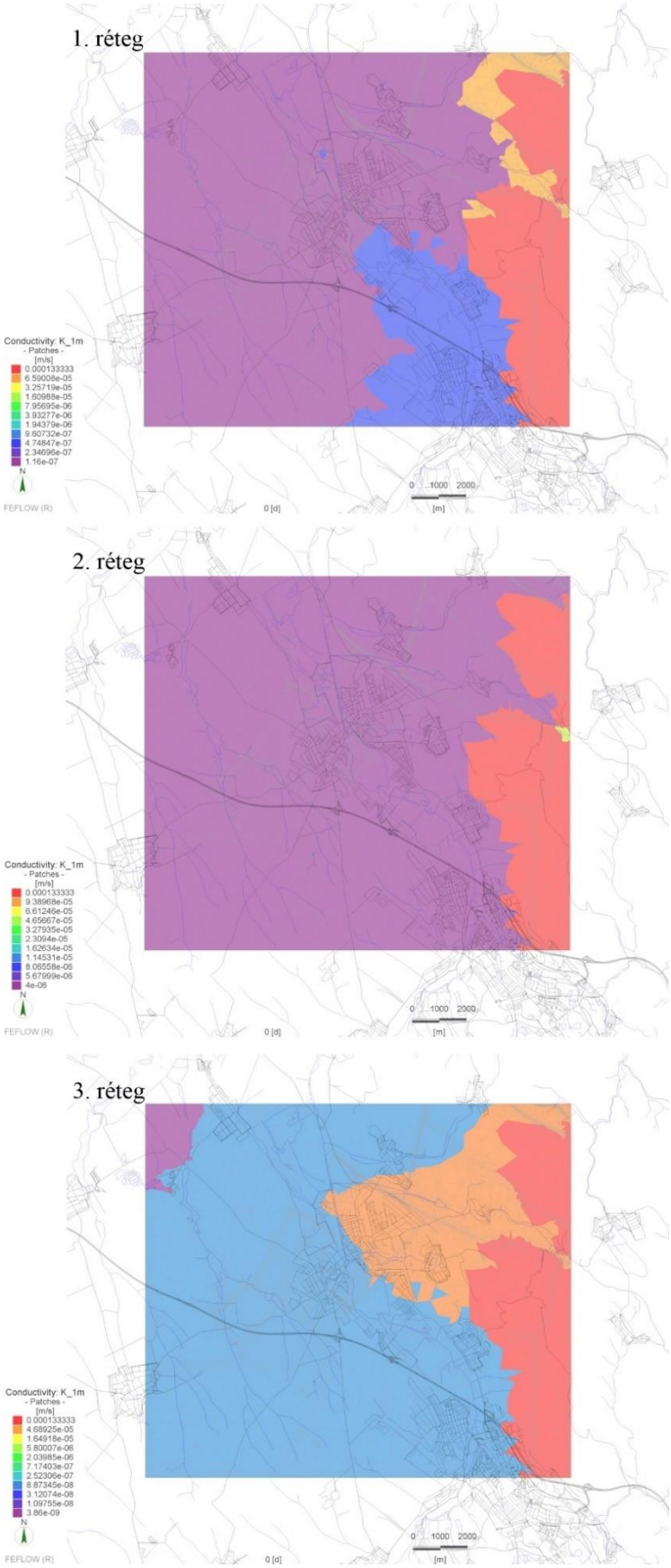
A modellezés területén előforduló kb. több száz különböző kőzettest hidraulikai paraméterezésénél nagyfokú egyszerűsítést kell alkalmazni, így az ***1. fejezetben*** bemutatott öt hidrosztratigráfiai egység adta az alapját a parametrizálásnak. Ezeket a hidrosztratigráfiai egységeket különböző K-tényező értékkel jellemezhetjük. A termál karsztvíztest területén az előzőekben bemutatott hidrosztratigráfiai egységek alapján végeztük el a parametrizálást. A hideg karsztvíztest területén, néhány a karsztnál fiatalabb, de regionálisan előforduló képződményt különítettünk el az öt hidrosztratigráfiai egységen kívül.

A szivárgási paraméterek meghatározásakor az alapkoncepció az volt, hogy a felszínen megtalálható, jobban karsztosodott, repedezett, mállott képződmények nagyobb értékkel rendelkeznek, mint ugyanezen képződmények fedett helyzetbe. A főkarszt felszíni kibúvásainál, a bányászati víztelenítés során számolt és mért transzmisszivitás értékekből becsültük a szivárgási tényező értékeket (*Schmieder A- Szilágyi* 1988) [24]. A modellezés kezdeti szakaszában ugyanezt a területi elkülönítést alkalmaztuk a parametrizálás során. A későbbi futtatások azonban azt mutatták, hogy az egyes területeken belül szükség van további, képződmény szintű változatosság figyelembevételére. Az egyéb kőzetekre jellemző K-tényező értékeket a T-JAM projekt eredményei [16] szerint vettük figyelembe.

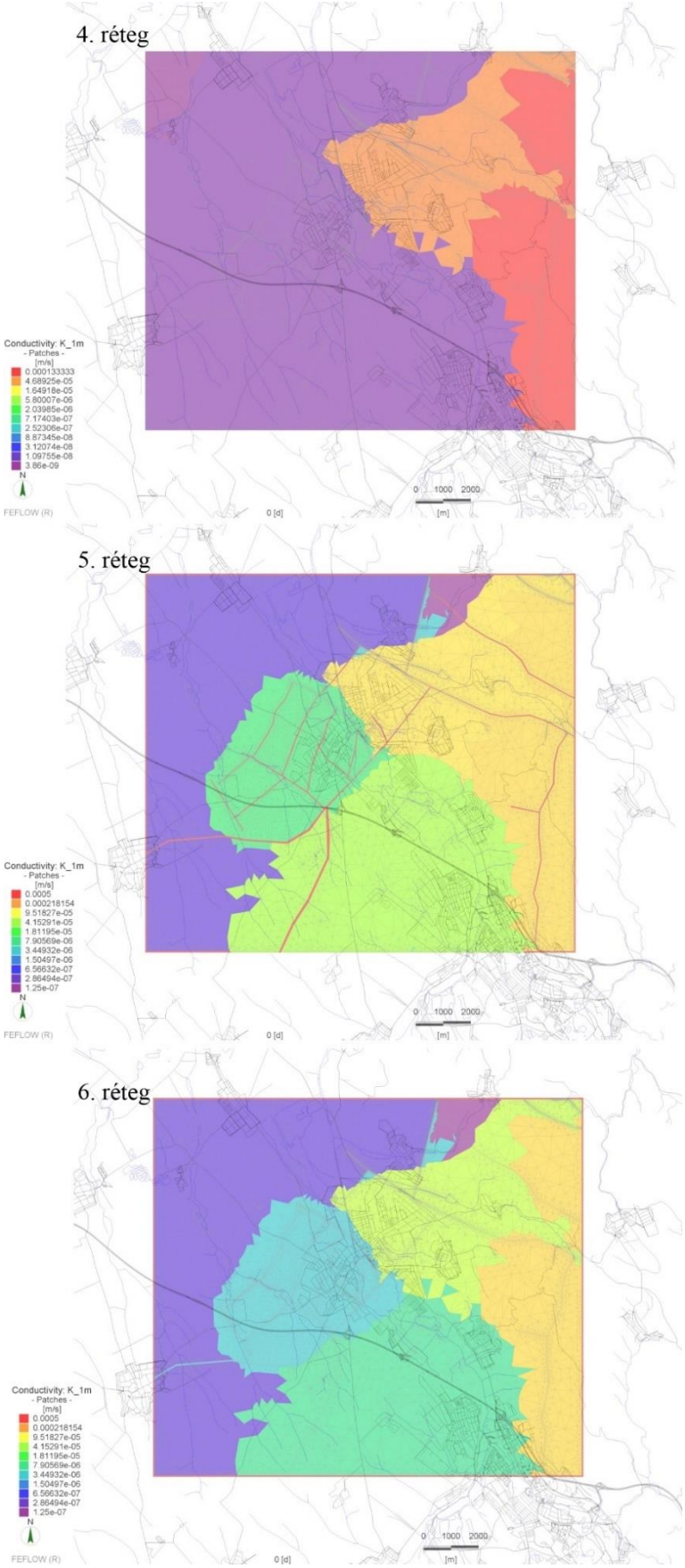
A szivárgási tényezők primer (kalibrálás előtti) eloszlását a regionális modellből importáltuk be, amit a későbbiekben csak minimális mértékben változtattunk meg, elsősorban a két modell eltérő rétegrendjének megfelelő módon.

A numerikus rétegekben, a kalibrálás után elfogadott K-tényező eloszlást a ***25-32. ábrák*** mutatják, a különböző hidrosztratigráfiai egységek, illetve kőzettestek szivárgási tényező értékeit a ***2. táblázat*** szemlélteti. A táblázatban bemutatott szivárgási tényezők nem a teljes rétegre, csak az adott formáció valós elterjedési területeire vonatkoznak.

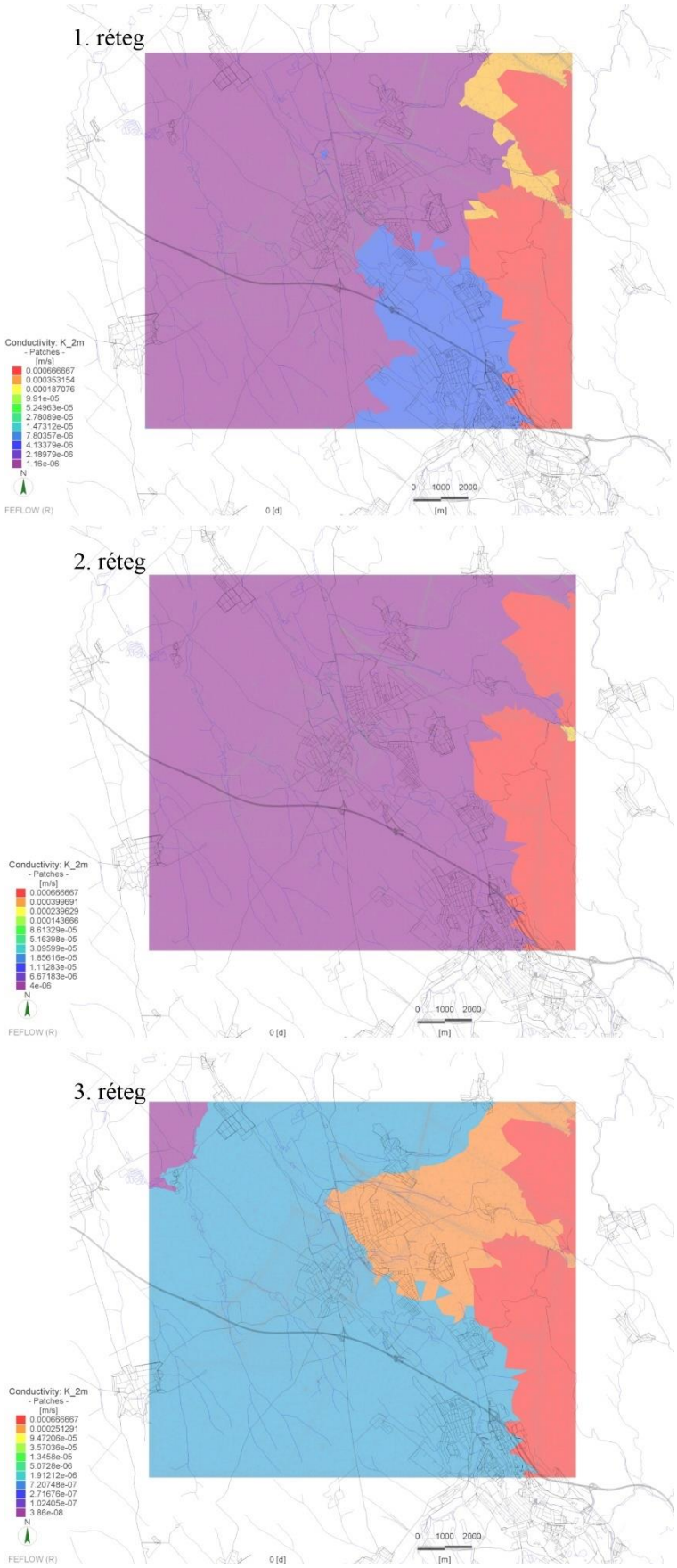
A modellben a konduktivitási mező rétegenként inhomogén és anizotróp. Ez azt jelenti, hogy a vertikális szivárgási tényező meghatározásánál, minden képződménynél feltételeztünk anizotrópiát, ez képződményenként eltérő mértékű. A horizontális szivárgási tényezőknél csak a karsztban definiáltunk anizotrópiát, ebben az esetben a felére csökkentettük y irányban az értékeket.



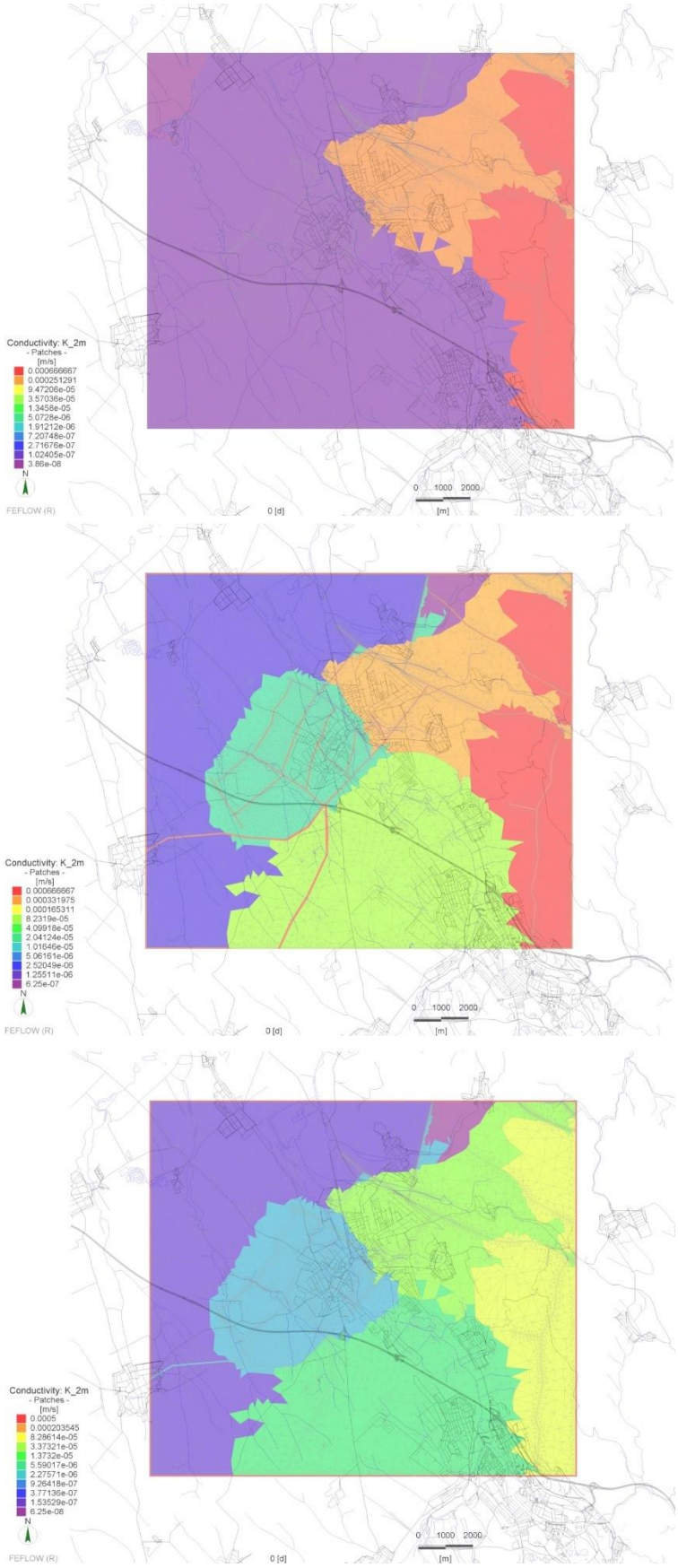
25. ábra: Az egyes rétegekben alkalmazott horizontális tengelyirányú (40° csapásirányú) K-tényező eloszlás



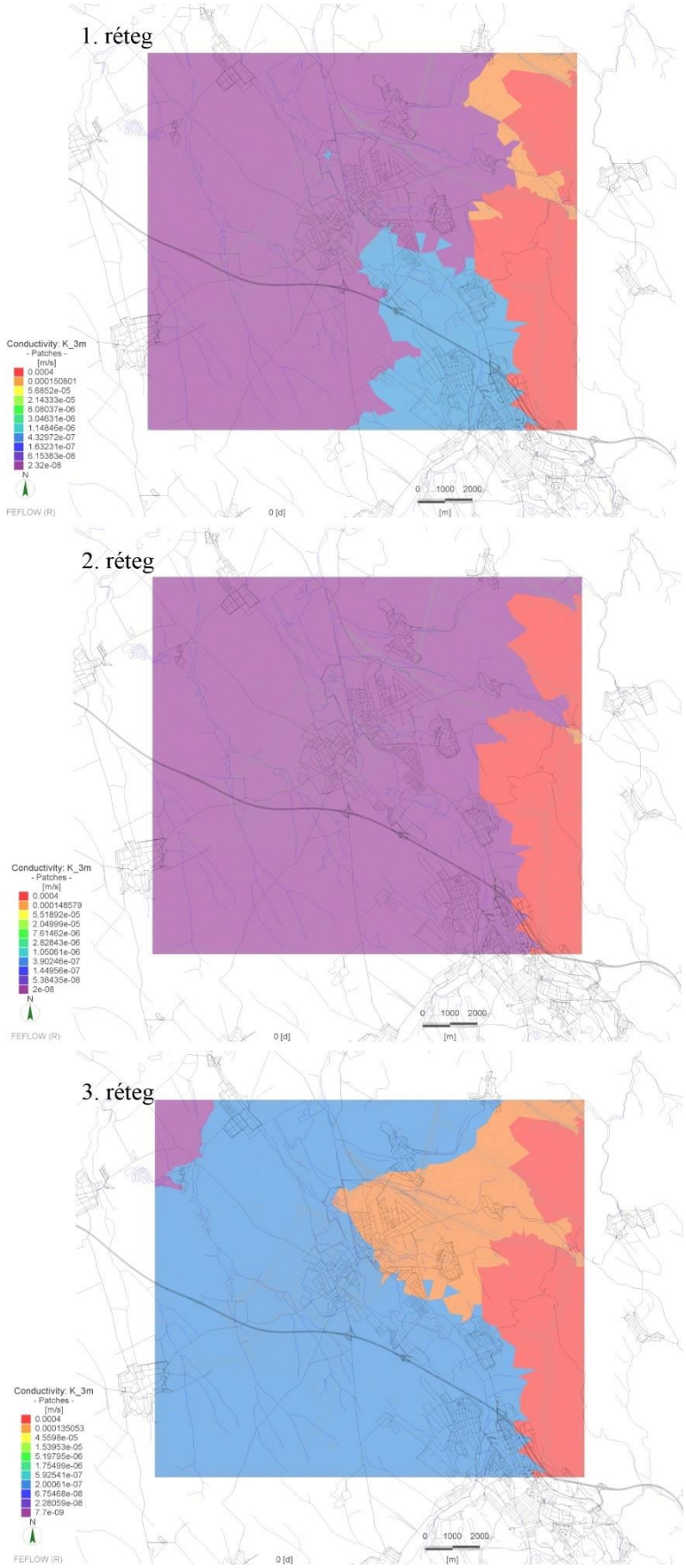
26. ábra: Az egyes rétegekben alkalmazott horizontális tengelyirányú (40° csapásirányú) K-tényező eloszlás



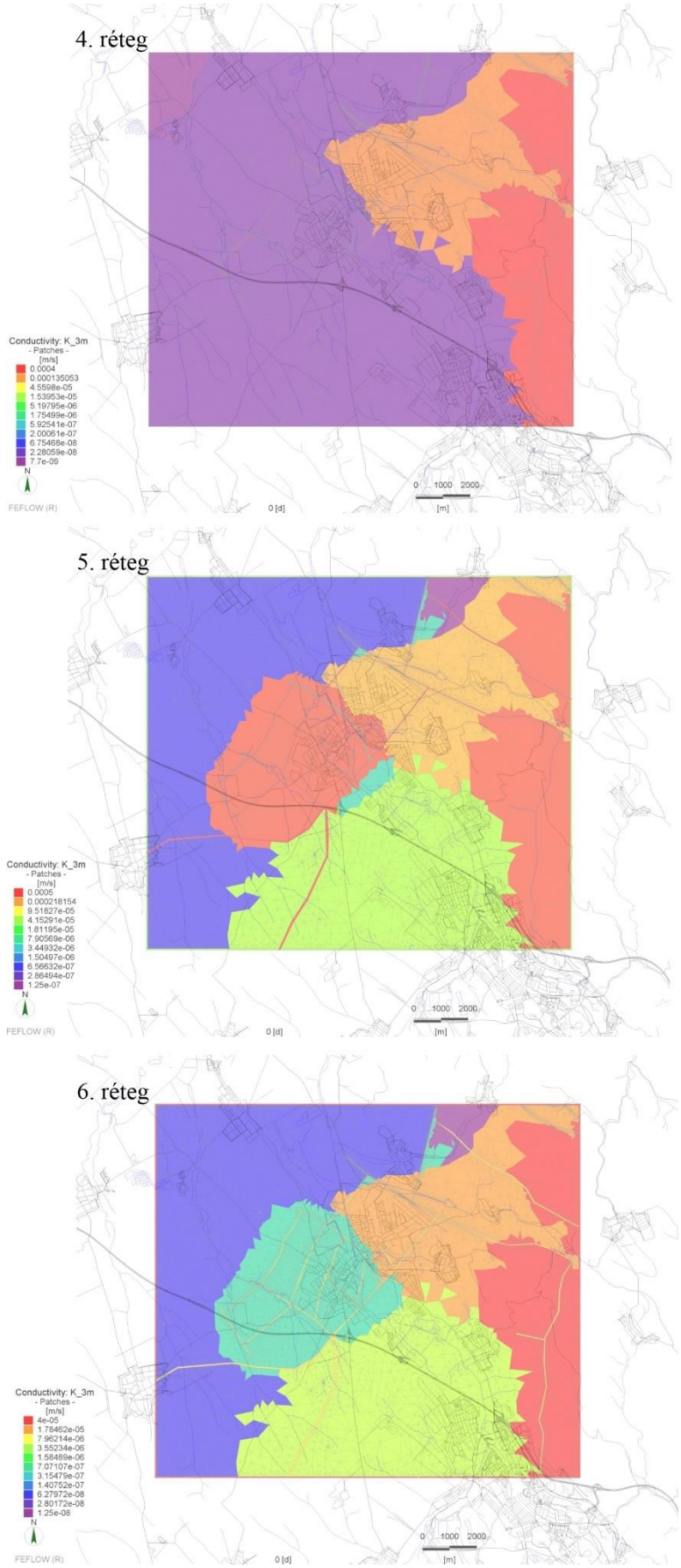
27. ábra: Az egyes rétegekben alkalmazott horizontális tengelyirányra merőleges (40° dőlésirányú) K-tényező eloszlás



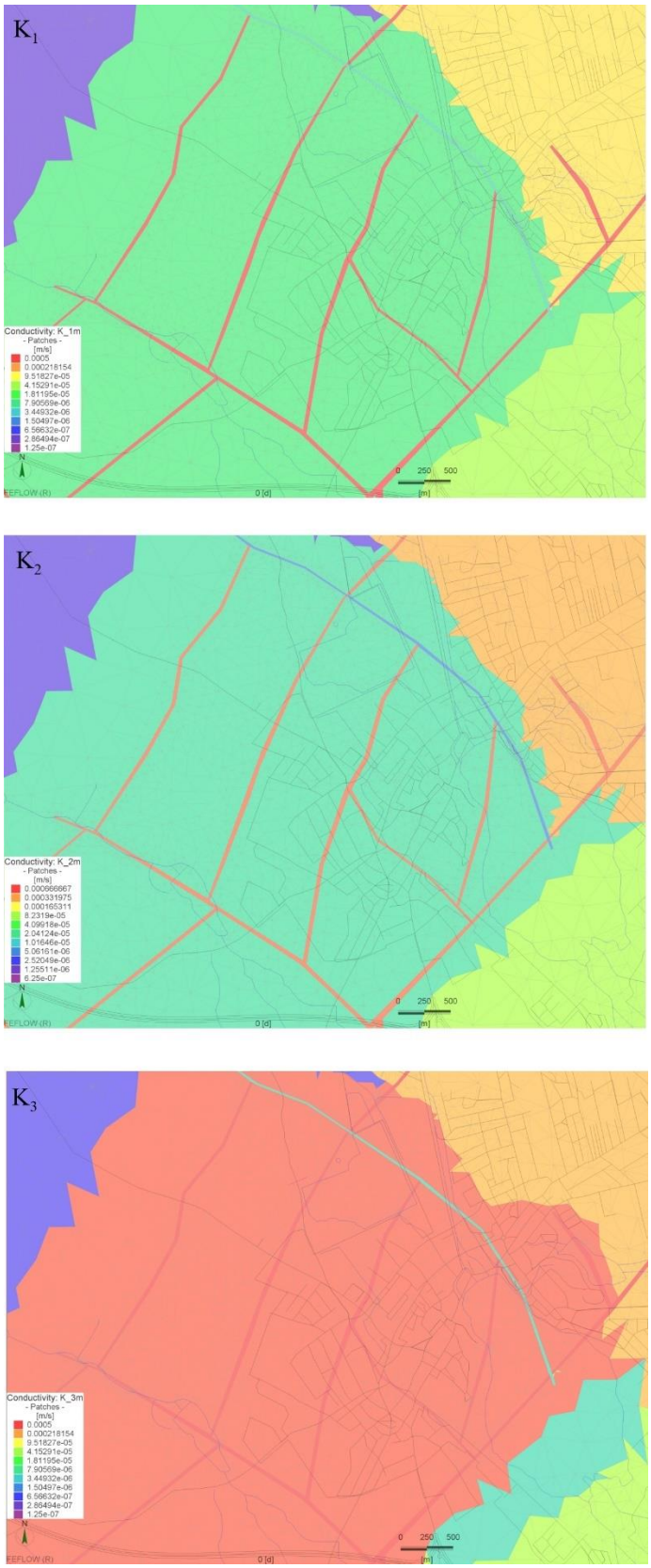
28. ábra: Az egyes rétegekben alkalmazott horizontális tengelyirányra merőleges (40° dőlésirányú) K-tényező eloszlás



29. ábra: Az egyes rétegekben alkalmazott vertikális K-tényező eloszlás



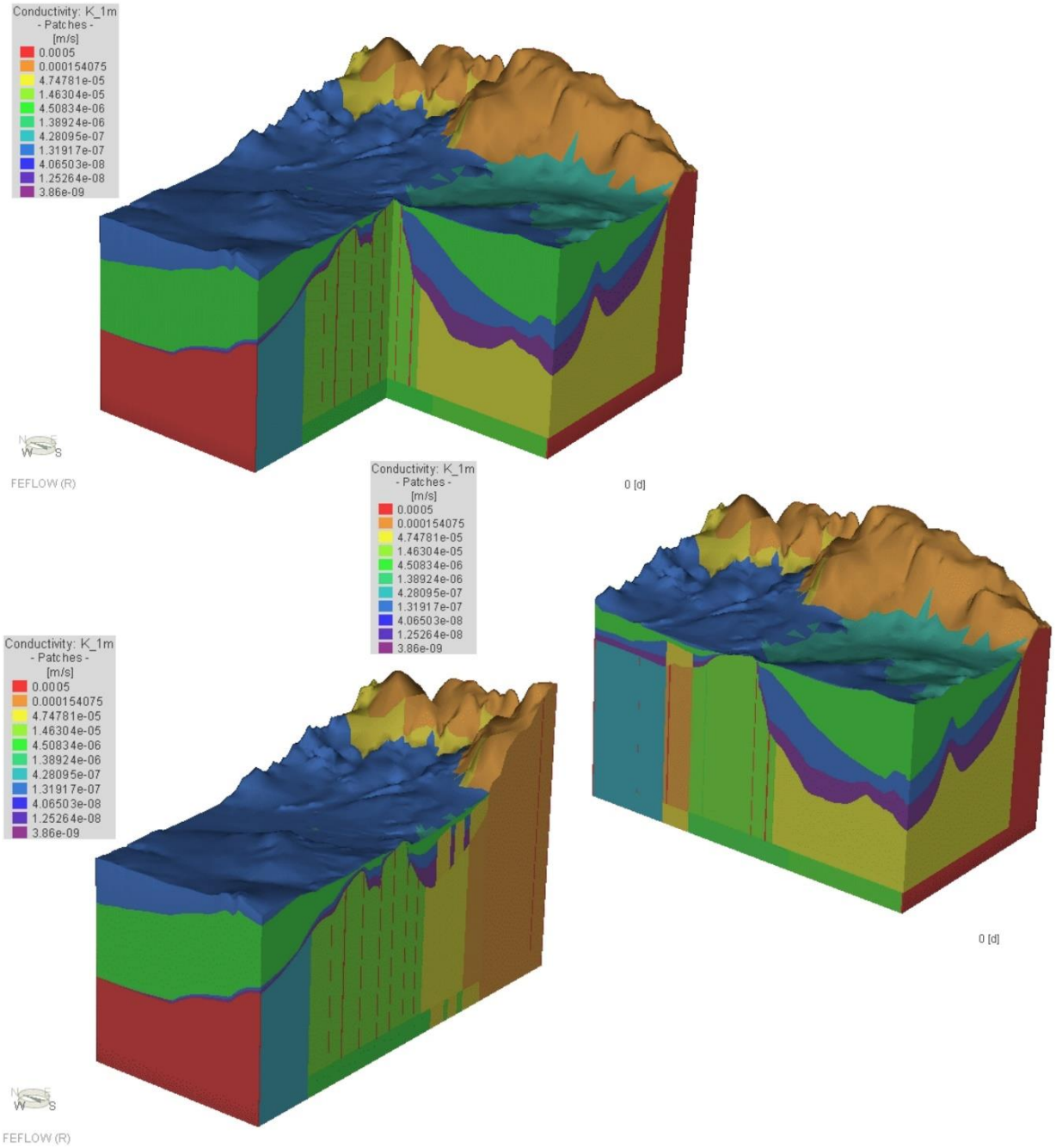
30. ábra: Az egyes rétegekben alkalmazott vertikális K-tényező eloszlás



31. ábra: A nyitott és zárt vetők esetében alklamazott 40°-os csapásirányú, dőlésirányú és vertikális K-tényező eloszlás

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

Sor-szám	Képződmény	Réteg	K_1 [m/s]	K_2 [m/s]	$K_3=K_z$ [m/s]	Anizotrópia-tengely
1.	mészkő	1-5	$5{,}8\cdot10^{-7} \div 1{,}3\cdot10^{-4}$	$2{,}9\cdot10^{-4} \div 6{,}6\cdot10^{-4}$	$1{,}75\cdot10^{-4} \div 4\cdot10^{-4}$	40
2.	mészkő	6	$1{,}2\cdot10^{-7} \div 1{,}3\cdot10^{-4}$	$6{,}2\cdot10^{-8} \div 6{,}6\cdot10^{-5}$	$1{,}25\cdot10^{-8} \div 4\cdot10^{-5}$	
3.	mészkő a sasbérc töredezett zónájában		$1{,}0\cdot10^{-5}$	$1{,}6\cdot10^{-5}$	$4\cdot10^{-4}$	
4.	tercier agyagmárga, agyag, vízrekesztő	4	$4\cdot10^{-8} \div 5{,}8\cdot10^{-8}$	$4\cdot10^{-8} \div 5{,}8\cdot10^{-8}$	$5{,}8\cdot10^{-9} \div 8\cdot10^{-9}$	
5.	tercier vízadó	3	$1{,}2\cdot10^{-6}$	$1{,}2\cdot10^{-6}$	$1{,}2\cdot10^{-7}$	
6.	alsópannóniai agyagmárga, aleurolit és agyag	2	$4\cdot10^{-6}$	$4\cdot10^{-6}$	$2\cdot10^{-8}$	
7.	felsőpannóniai, pleisztocén és holocén homokos-kavicsos képződmények	1	$1{,}2\cdot10^{-6} \div 5{,}8\cdot10^{-7}$	$1{,}2\cdot10^{-6} \div 5{,}8\cdot10^{-7}$	$5{,}8\cdot10^{-7} \div 3{,}3\cdot10^{-8}$	
8.	Nyitott vetők	5	$5\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{-4}$	
9.	Zárt vetők	5	$5\cdot10^{-6}$	$5\cdot10^{-6}$	$5\cdot10^{-6}$	



32. ábra: A numerikus modell reprezentatív 3D szivárrgási tényező metszetei a sasbércen keresztül (6x túlmagasítás)

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:

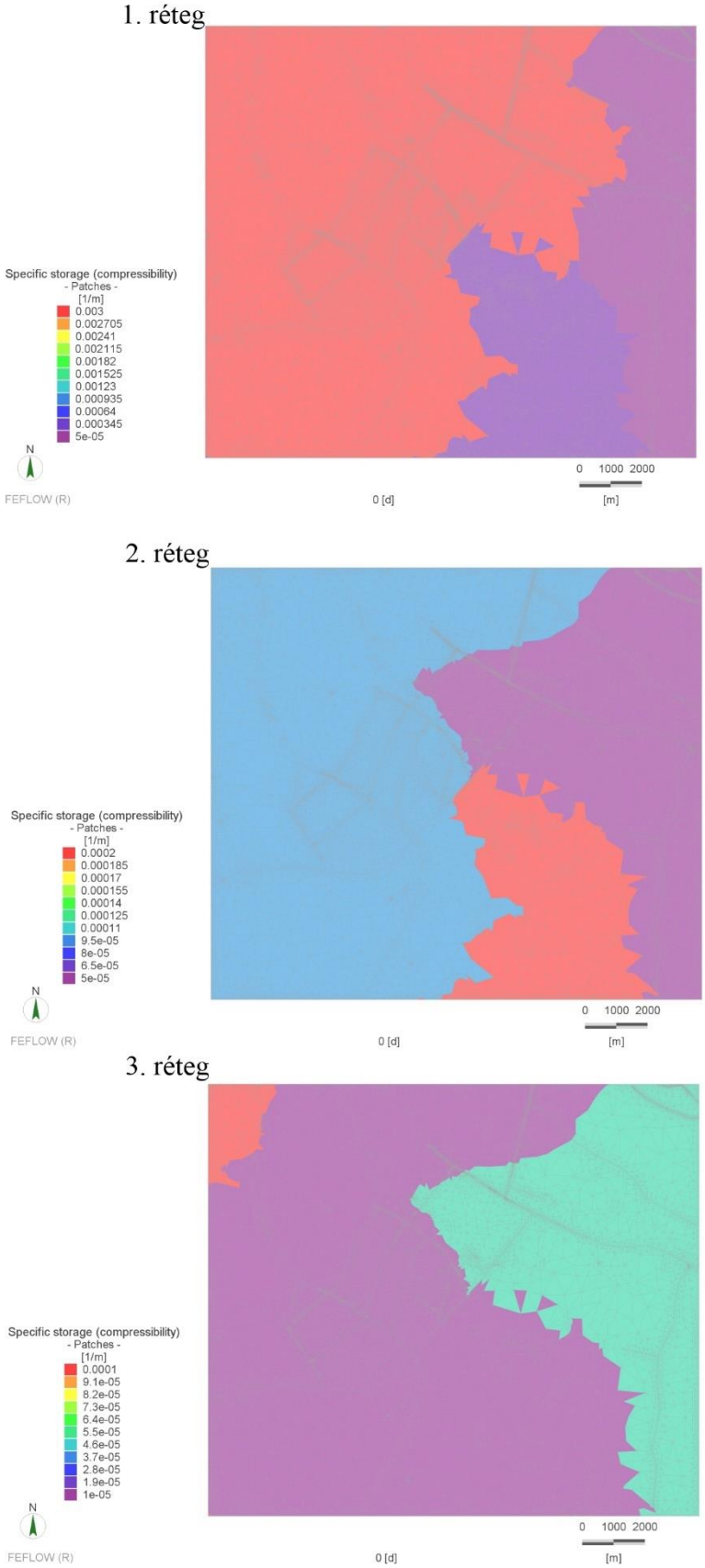
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T}\frac{dh}{dt}$$

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

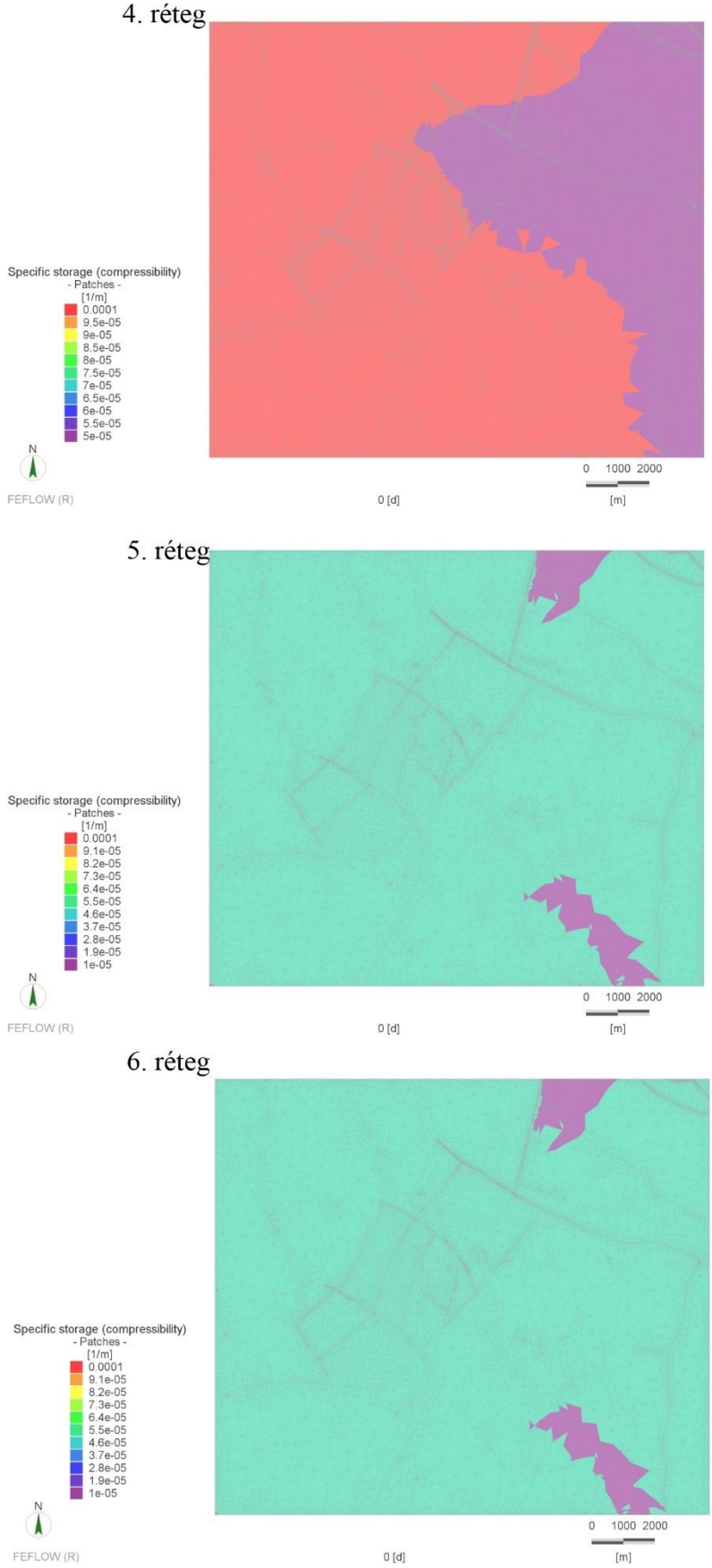
A numerikus modellezéshez számolt fajlagos tározás értékeit a ***3. táblázat*** mutatja be, míg eloszlását a ***33-34. ábrák*** szemléltetik. A fajlagos tározás számításához szükséges, kőzetre jellemző teljes porozitást a T-JAM projekt alapján [16], míg a közeg kompresszibilitását (α) az Domenico & Schwartz, 1990 [15] szerint határoztuk meg.

3. táblázat: Az egyes hidrosztratigráfiai egységhez tartozó fajlagos tározás

Numerikus réteg		n [-]	α [Pa^{-1}]	β [Pa^{-1}]	Ss [m^{-1}]
1	Q-Pa_2	0.35	$3\cdot10^{-7}$	$4.4\cdot10^{-9}$	$3\cdot10^{-3}$
2	Pa_1-M-Ol – vízrekesztő	0.4	$1\cdot10^{-8}$		$1\cdot10^{-4}$
3	Tercier rétegcsoport – vízadó	0.03	$1\cdot10^{-9}$		$1\cdot10^{-5}$
4	Tercier rétegcsoport - vízrekesztő	0.02	$1\cdot10^{-8}$		$1\cdot10^{-4}$
5	Pre-albai	0.02	$5\cdot10^{-9}$		$5\cdot10^{-5}$
6	Pre-albai segédréteg	0.02	$3\cdot10^{-9}$		$3\cdot10^{-5}$



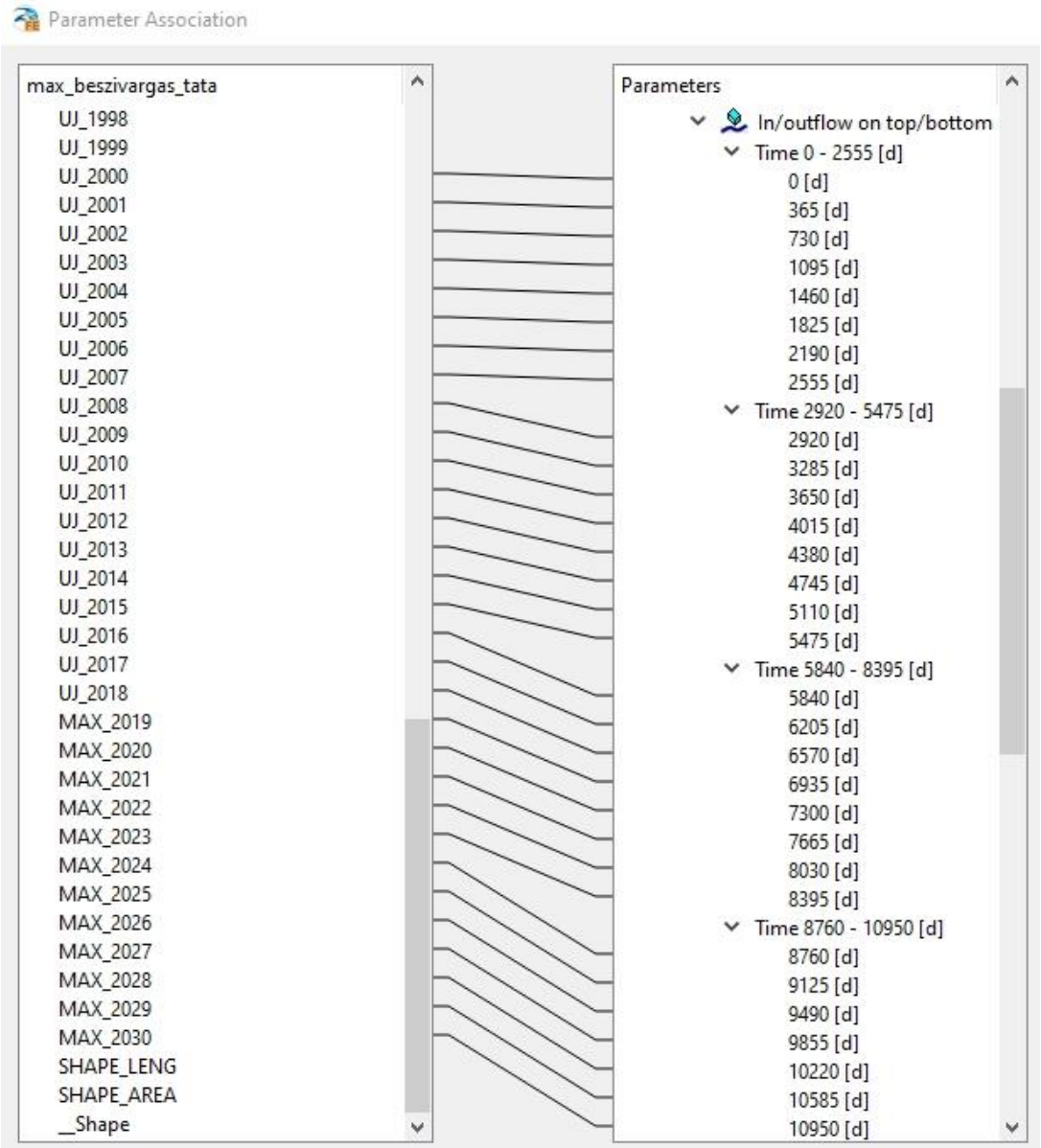
33. ábra: Az 1-3. rétegekben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



34. ábra: A 4-6. rétegekben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás

3.3.3 Beszivárgás a numerikus modell felszínén

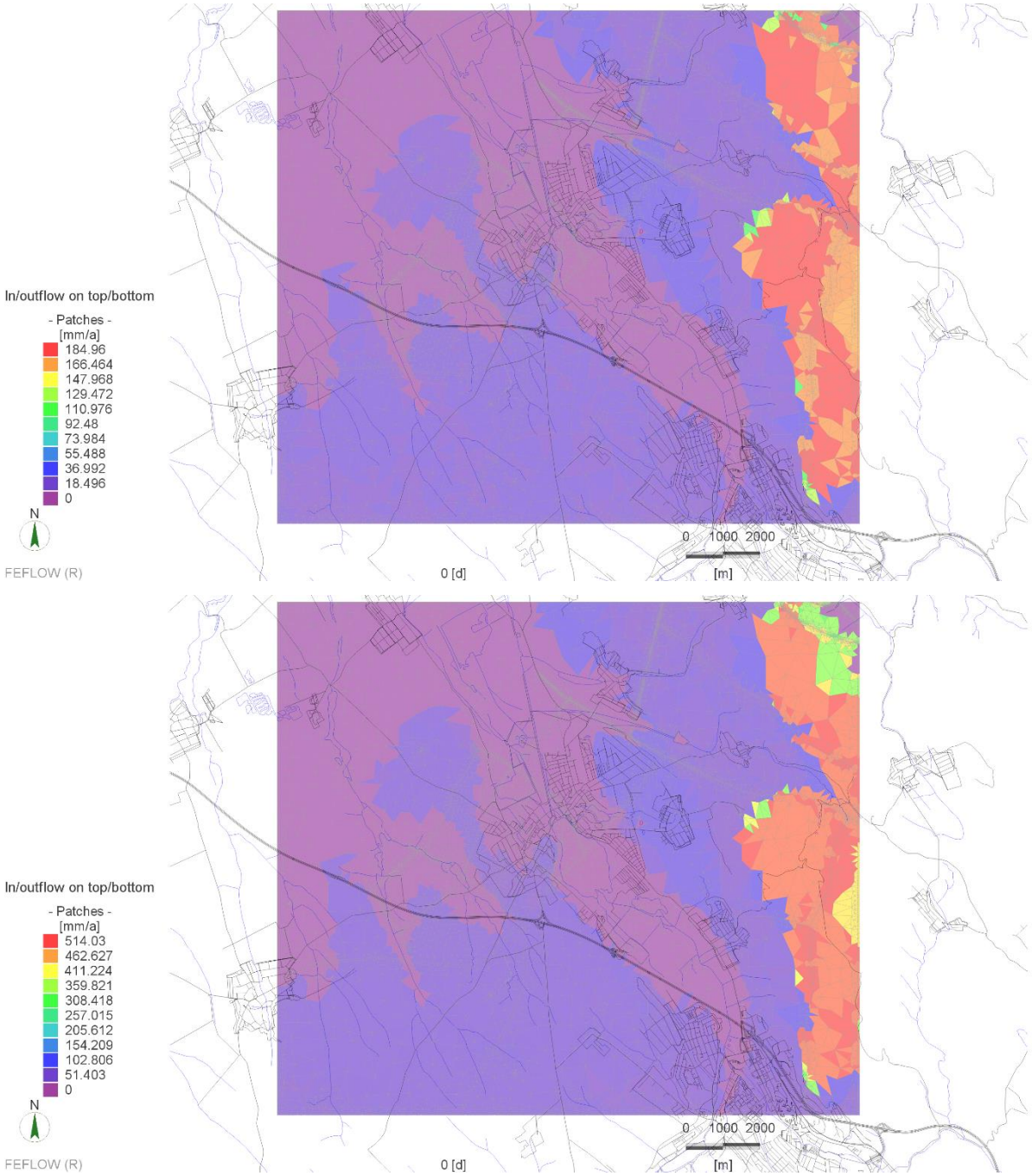
A beszivárgást az 1. numerikus felszínre adtuk meg, a cellák teljes területére, „inflow on top” paranccsal (***35. ábra***) A beszivárgás alapértékét HELP programmal számítottuk, amit később korrekciós tényezőkkel módosítottunk.



35. ábra: A beszivárgási értékek hozzárendelése az egymást követő periódusokhoz

A beszivárgást a WHI UnSat Suite szoftvercsomag HELP moduljának felhasználásával számítottuk. Ennek módszertanát és eredményeit részletesen a regionális vízháztartási modellezést bemutató jelentés I. kötet/3.1. fejezetben [8] mutattuk be. A beszivárgás számítást a teljes 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.

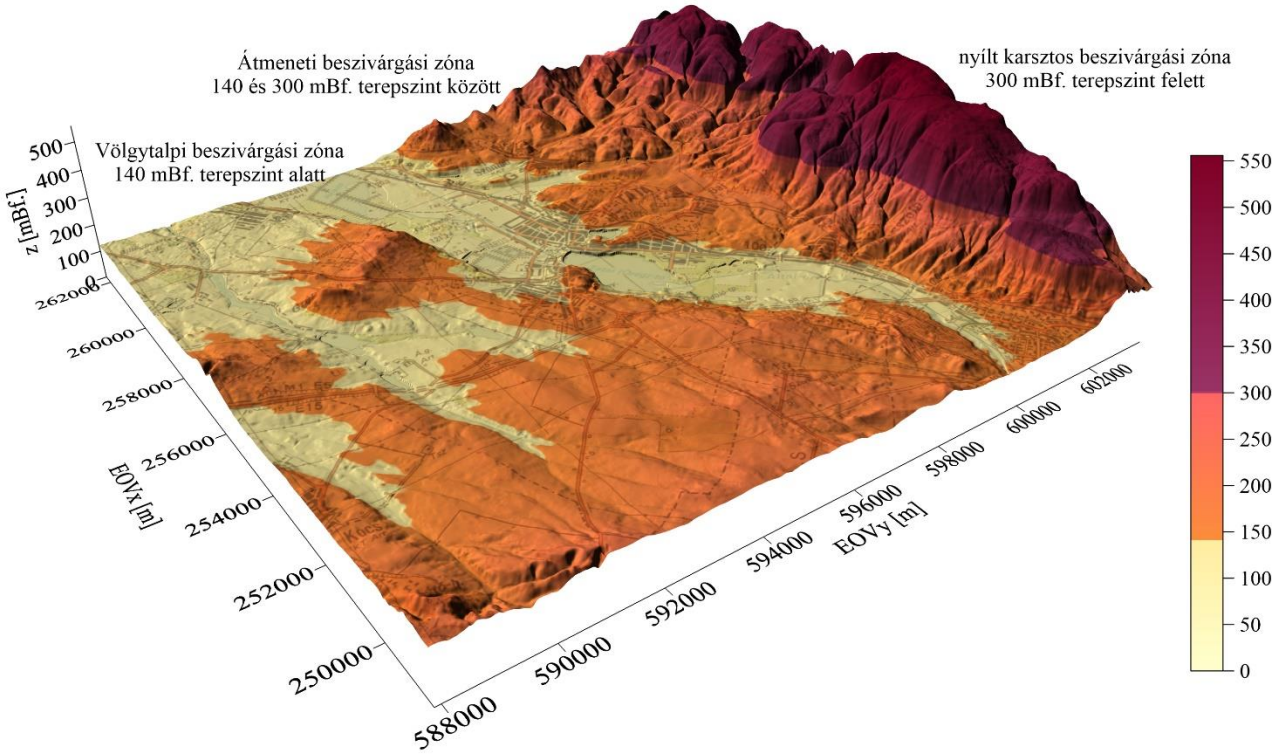
A hideg karsztvíztestek területén a nyílt karsztos területeken a felszíni beszivárgás megegyezik a karsztvíztárolóba történő beszivárgással. A fedett területeken csak a felszínen beszivárgó csapadék egy hányada jut el a karsztvíztárolóba. Ennek mennyisége eltérő a természetes áramlási rendszerben, és 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. A HELP szoftver által kapott értékeket a numerikus modellben a hideg karsztvíztestek területén arányosan csökkenteni kellett, ha a modellezett karsztvízszintek nem adták ki a területre jellemző mért értékeket (***36. ábra***).



36. ábra: A beszivárgási értékek változásának mintázata egy száraz (2008) és egy nedves (2010) évben

A tatai lokális modellterület annyiban különleges, hogy a kiemelkedett nyílt karsztos területek, a völgytalpi kiáramlási területek és a köztes zóna az egész területen kiválóan elkülöníthető a terepszintek alapján. Éppen ezért a beszivárgás korrekcióját a terepszintek magasságához kötöttük, olyan módon hogy a 140 mBf alatti zónát a völgytalphoz, a 300 mBf zónát a nyílt karszthoz és a köztes magasságtartományt az átmeneti részben völgytalpi üledékekkel fedett zónához soroltuk.

A völgytalpon a maradó beszivárgás minimális, esetünkben a HELP modellel számított értékek 1-2%-ára becsültük, ami mindenhol 10 mm/év alatti maradó beszivárgást jelentett. A köztes zónában a HELP modellel számított értékek 15%-át tételeztük fel, míg a nyílt karsztos részeken a HELP modellel számított értékeket alkalmaztuk. A beszivárgási korrekció arányszámát kalibrációs paraméternek tekintettük (***37. ábra***). A számítások során így a HELP által számított mintázat megmaradt, annak csak az egyes zónákon belüli arányos csökkentése maradt meg.



37. ábra: A beszivárgási értékek korrekciójának mintázata a terepszintek függvényében

A HELP szoftverrel napi beszivárgást számítottunk, így tetszőlegesen számítható havi, illetve éves mennyiség. A tranziens modellben a beszivárgást éves időlépcsővel adtuk meg a 2003 és 2030 évek között.

A ***35. 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.

3.3.4 A vetők numerikus modelladaptációja

A tatai lokális modellbeli áramlások szimulációja nem készíthető el a térségre jellemző vetőrendszerek leképezése nélkül. A szerkezeti felépítéshez a MÁFI M=1:500 000 méretarányú Magyarország pre-kainoozos földtani térképét [30] használtuk.

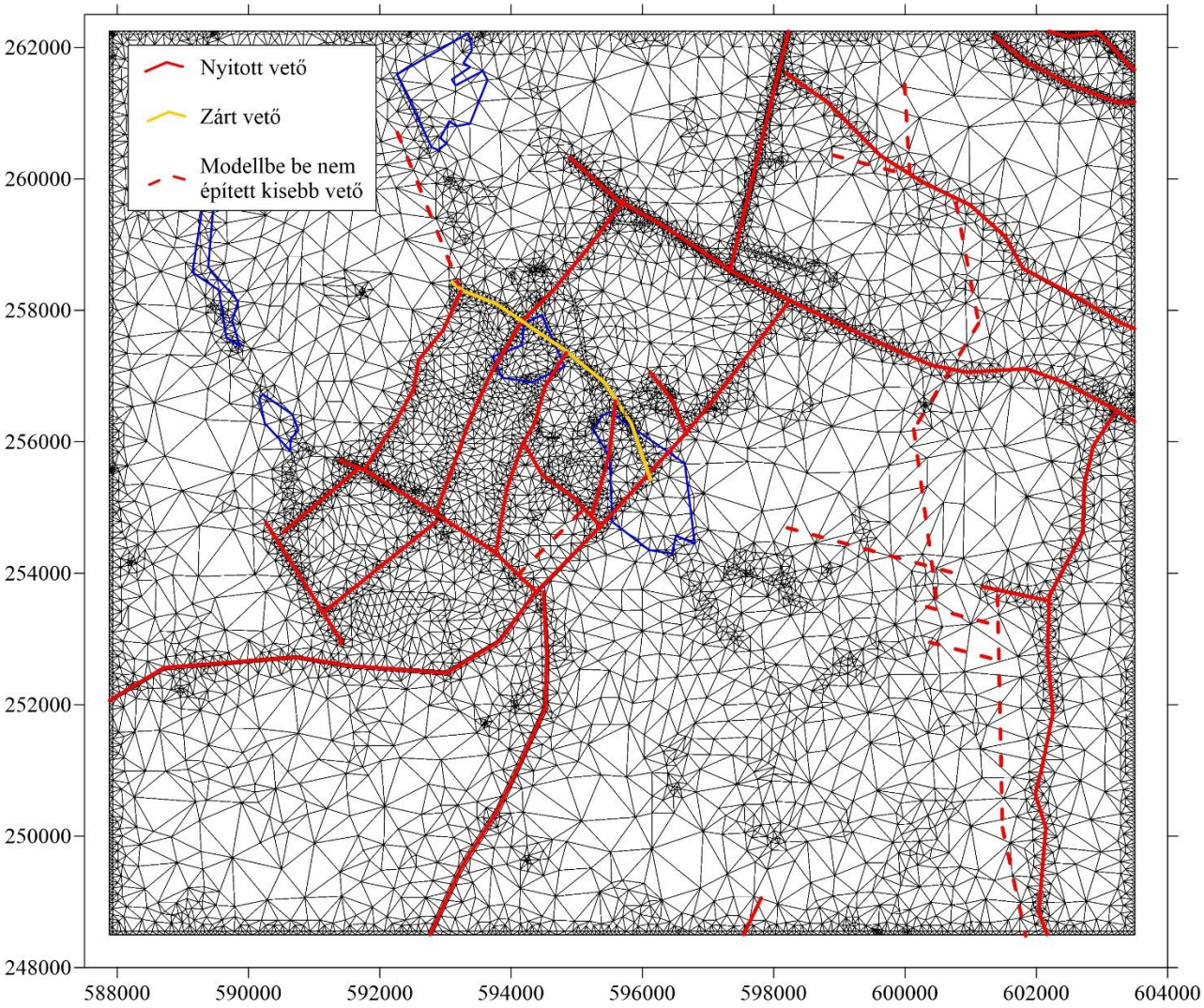
A modellben alkalmazott vetőhálózat a ***38. ábrán*** látható, a paraméterezést pedig az ***4. táblázat*** foglalja össze. A vetőket a rendszerben lehetőségként meglévő két opció közül egy vetőmenti elemsor alkalmazásával (***31. ábra***) és nem a teljes modellt átszelő 2D-s vertikális elemekkel adtuk meg. Mindezt tettük azért, mert a térségben egyes szinguláris vetők helyett inkább 5-10 m széles vetőzónák megjelenésével számoltunk, illetve azért is, mert ez a megoldás a vízszintekben és vízhozamokban időben kevésbé oszcilláló fluxusokat eredményez, ilyen módon reméltük a hozamok kiegyensúlyozottabb időbeli változását és ezáltal reprezentatívabb modellezési eredmények eredményeket számítását.

4. táblázat: A vetőelemek hidraulikai paraméterei

Paraméter	Érték
Vető szélesség (2 D)	5 m
Nyitott vető izotróp szivárgási tényezője	0,0005 m/s
Zárt vető izoptróp szivárgási tényezője	0,000005 m/s

A vetőket alapvetően nyitottnak, a felszín alatti vizek szivárgását elősegítőnek tételeztük fel, amit alátámaszt a források elhelyezkedésének mintázata és a töredezett zónák térségében megnövekedett gyakorisága is. A modell kalibrálása során ugyanakkor abba a problémába ütköztünk, hogy a magasabb szinten fakadó Cseke-tó környéki Pokol és Tükör források térségében a potenciálszintek túlságosan alacsonyak maradtak a visszatöltődés során, amiért egyértelműen az Öreg-tó környéki és a Kálvária domb területén található, alacsonyabb szinteken fakadó források vízszintcsökkentő hatása felelt. Mindemellett teljesen nyitott vetőrendszerek esetén a Tata belvárosi források és a Fényes fürdő hozama a tapasztaltakat jelentősen meghaladó nagyságú volt. Ilyen módon a vetők közül az utánpótlódási irányba eső, a felszín alatti vizek szivárgására merőlegesen futó, a Cseke és Öreg tavak között futó vetőt a környezeténél egy nagyságrenddel alacsonyabb vízvezetőképességgel felvértezve mind a potenciálszintek, mind a hozamok kedvező irányú alakulását értük el, ilyen módon a megfelelő hozamok a reális tartományokba kerültek és a Tükör forrás fakadási időszakai is a tapasztaltakhoz hasonlóan alakultak. Ilyen módon úgy gondoljuk, hogy a hidraulikai adatok alapján a vetőrendszernek a sasbérc ÉK-oldalán futó vetőjének vízrekesztő vagy részben vízrekesztő szerepűnek kell lennie.

A vetőket kizárólag az 5. rétegben vettük figyelembe tekintettel arra, hogy mélyebben már feltételezhető a vetők gyengülése és a vetőzónáknak a mészkőtestekhez képest hasonló vezetőképességének a kialakulása. A tatai lokális modellben alkalmazott megoldás, ami csak a nyílt karsztos területen alkalmazta a felszíntől a mészkőképződményeket, egyéb területeken a tapasztalt, sokszor igen kis vastagságú összletben a fiatalabb képződményeket mindenhol a modellbe adaptálta, nem tette életszerűvé, hogy a vetőket a fiatalabb agyag, agyagmárga vagy akár a vízadó szintekben tovább vigyük.



38. ábra: A numerikus modellbe épített vetőhálózat

A többi lokális modellben a mészkőösszlet feküje eltérő általában 20 m-t meghaladó mélységben volt a felszín alatt, ezért az 1. numerikus felszínre definiált források (***3.4.1. fejezet***) és a fő karsztot képviselő 5. réteg között a közvetlen kapcsolatot a numerikus modellben - modellezés technikai megoldásképpen - 1D-s elemek használatával teremtettük meg. A tatai lokális modellben a geometria pontos követésére törekedtünk, ilyen módon a karsztos felszín a karsztforrások térségében 0,8-1 m körüli mélységben volt, így az 1D elemek alkalmazásától eltekintettünk annak érdekében, hogy a korábban is említett hozamingadozásokra való hajlamot minél erősebben elkerüljük.

A tatai lokális modellben éppen ezért a forrásokat jelképező potenciál peremfeltételeket (Head BC) a gyakorlatilag a felszínen található 5. rétegbe helyeztük el, aminek a peremszintje a valós fakadási pontban volt.

3.3.5 A szerkezeti elemek hatása a numerikus modellben

A tranziens modelleknél a mátrix/repedés kommunikáció alapvetően befolyásolja az áramlási rendszer időbeli változását. Az áramlások döntő többsége a repedésrendszerben zajlik, addig a tárolás túlnyomóan a mátrixban történik, ez a vízmérleg számításnál is jól látszik (***4.5. fejezet***).

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.

Ahogyan azt korábban is leírtuk a rendszerben a vetőket a sasbérc környezetében ennek ellentmondó adatok hiányában nyitottnak tételeztük fel, míg a sasbércet ÉK-i irányból határoló vetőt a rendelkezésre álló hidraulikai adatok, illetve a modell működésének megfigyelését követő kalibrációs eredmények miatt zártnak tételeztük fel.

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 potenciálú.

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.

A lokális modellben az alábbi típusú peremfeltételeket használtuk:

- Head BC (1. típusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel) - Időben változóan előírt potenciálszint – hozamkorlátozással
  - a modell peremi celláiban a regionális modellből számított vízszintváltozást írtunk elő, amit azonban a peremi kiegyenlítő sáv miatt hozamkorlátozással kellett ellátnunk, hogy a peremeken minél egyenletesebb legyen a beáramlás és ne csak a magas potenciálú részek tápláljanak be.
  - a modell belső pontjaiban a források fakadási helyeit állandó nyomású peremekkel illesztettük a modellbe, ebben az esetben a hozamkorlátozásokat arra használtuk, hogy részben azt biztosítsuk, hogy a források csak kiáramlási helyek legyenek, másfelől, hogy az egymáshoz közeli forráskilépési helyek pl. Tatai-Vár és Kálváriadomb térsége hozama egymás között jobban megoszoljék.
  - Ugyancsak potenciálszint peremfeltételt alkalmaztunk a nagyterületű felszíni vizek esetén (tavak és tározók, de ebben az esetben időben állandó nyomásszinteket használtunk.
- Fluid-Transfer BC (3. típusú (Transfer)-Cauchy peremfeltétel)
  - A 3. típusú peremfeltételt alkalmaztunk az első réteget átszelő szelvényben a felszíni vízfolyások szimulációjára. Ebben az esetben a kivett hozam arányos a környező potenciálszintek és a vízfolyás vízszintje miatt kialakuló hidraulikus gradiens nagyságával.
- Well BC (4. típusú (Well)-Kút peremfeltétel)
  - a térség kútjait a megfelelő rétegekre szűrőzött kutakkal, az ismert módon időben változó hozamsorozatokkal szimuláltuk.

3.4.1 1. típusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel

A modell terület felmért forrásait fakadási szintjeikkel határoztuk meg az 5. numerikus felszínre, azzal a kitétellel, hogy mindenképp kifolyóként kell viselkedniük.

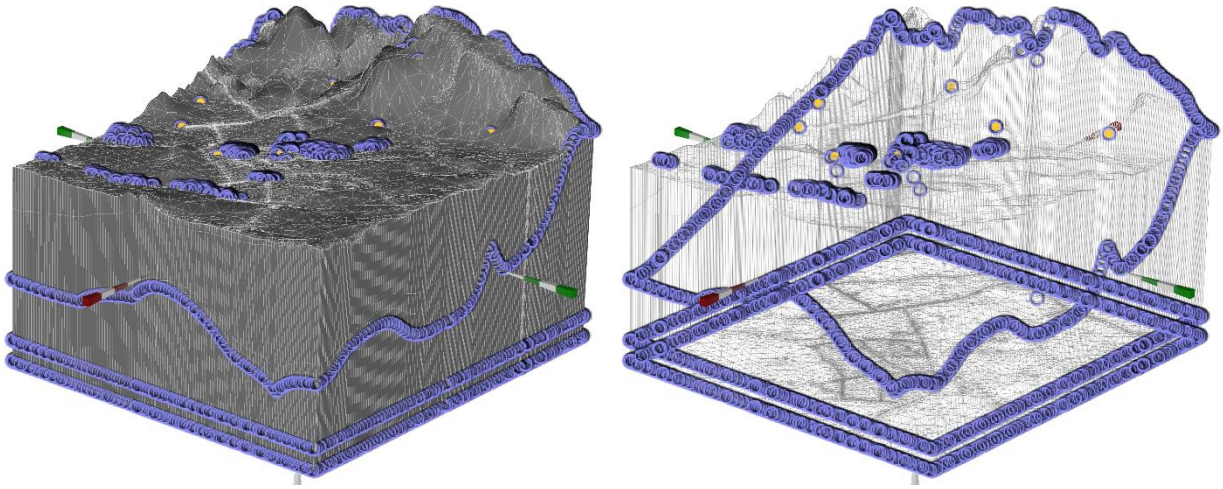
A szomszédos, egymáshoz közeli források esetén hozamkorlátot is alkalmaztunk, ahol az ismert mért hozamok alapján egy a Tata - Pokol jelű monitoringkútban mért potenciálváltozásoknak megfelelően – feltételezve, hogy a forrás-kilépési pont hidraulikai ellenállása független a gradienstől és a kilépési sebességtől az előforduló tartományban – engedélyeztük a hozamok változását. Ilyen módon elkerültük, hogy ez egymáshoz közel eső, de kismértékben eltérő fakadási szintű források közül csak a legalsó fakadjon, ugyanis ott a reális hozamkorlátok elérését követően a következő fakadási szintű forrás is megjelent, és ilyen módon az egyre magasabban fakadó források is megjelentek.

A modellt alapvetően a karsztban bekövetkező folyamatokra kalibráltuk, ilyen módon a felmért pleisztocén és holocén vízadókra települt források fakadásainak pontos követésével nem foglalkoztunk. Ezen források mind a potenciálkép, mind a vízforgalom szempontjából irrelevánsak, és a karsztos rendszertől elkülönülő hidraulikai rendszert képeznek.

A prealbai felületek mentén a modell oldalsó peremeihez (5-7. numerikus felületek), adott nyomású, de időben változó hidraulikus emelkedési magasságot rendeltünk, mint 1. Dirichlet típusú peremfeltétel. Ezek értékeit a kalibráltnak tekintett regionális modellből importáltuk át olyan módon, hogy minden peremi csomópontban a legközelebbi regionális modell-csomópont vízszint-változási értékét vettük át. A modell északi peremén csak kiáramlást engedélyeztünk tekintettel arra, hogy az a perem, még a legnagyobb depressziók idején és a tatabányai és oroszlányi nagy depressziók időszakában is, kifolyási határként működött.

A peremi csomópontok közelében a karsztos észlelőkutakban (Kocs-1, Neszmély-3, Vértesszőlős-1 és Tata-pokol) jelentkezett potenciálváltozásoknak megfelelő hozamváltozási korlátozásokat alkalmaztunk annak érdekében, hogy a ritkább regionális csomópont sűrűség miatt a hozzárendelést követően bekövetkező változási ugrásokat tompítsuk. Mivel a peremek belső sávjában egy magasabb vezetőképességű technikai zónát hoztunk létre, előfordulhatott volna, hogy a beáramló hozamot akár csak egy, a legmagasabb potenciállal rendelkező pont biztosítja, amit el akartunk kerülni és szélesebb zónára a hozamkorlátozással osztottunk szét. Mivel a hozamkorlátok a potenciál-változások ütemét követték, ilyen módon az áramképet nem befolyásolták, pusztán annak elkerülésére került a modellbe, hogy aránytalanul nagy legyen lokálisan, egy-egy csomópont közelében a peremi beszivárgás, illetve, hogy a peremi, előírt módon változó potenciálú peremi csomópontok között irreális keresztszivárgásokat elkerüljük.

A modell aljára – a nagy mélység miatt feltételezve, hogy ott a vertikális vízforgalom már elhanyagolható – nem határoztunk meg peremfeltételt, tehát a modell alulról zárt.

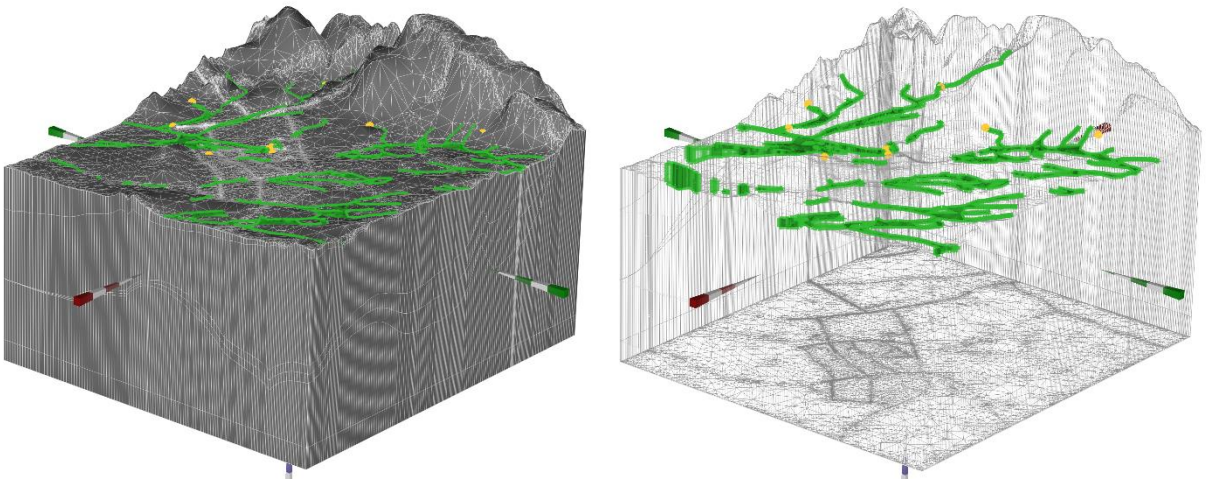


39. ábra: A numerikus modellben szereplő 1.tipusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel

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 digitális terepmodell (DDM) alapján adtuk meg.

A kontrollálatlan hozambeáramlás miatt a peremfeltételt korlátoztuk, csak fakadást engedélyeztünk. Az átszivárgási együtthatót egységesen 0,04 nap^{-1} értékűnek választottuk, ami megfelel a regionális modellben felvett értéknek.



40. ábra: A numerikus modellben szereplő 3.tipusú (Fluid 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.

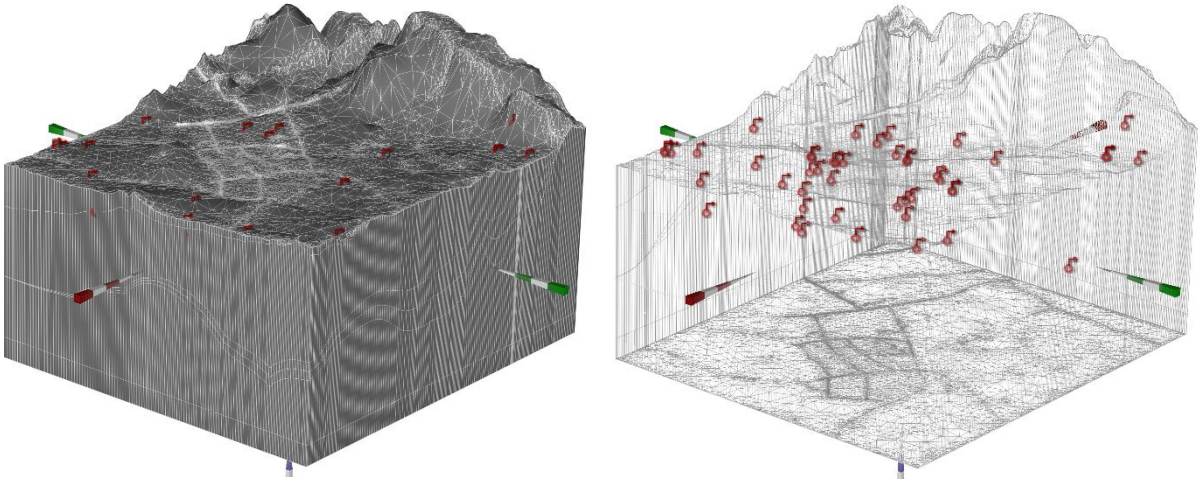
A numerikus modellben a következő termelőobjektumok szerepelnek:

- A hideg karsztvíztest területén a karsztot, illetve a fedőt megcsapoló termelő objektumok, amelyekből van termelési adat 2003-2018 között.
- A termál karsztvíztest területén a karsztot megcsapoló termelő objektumok, amelyekből van termelési adat 2003-2018 között.

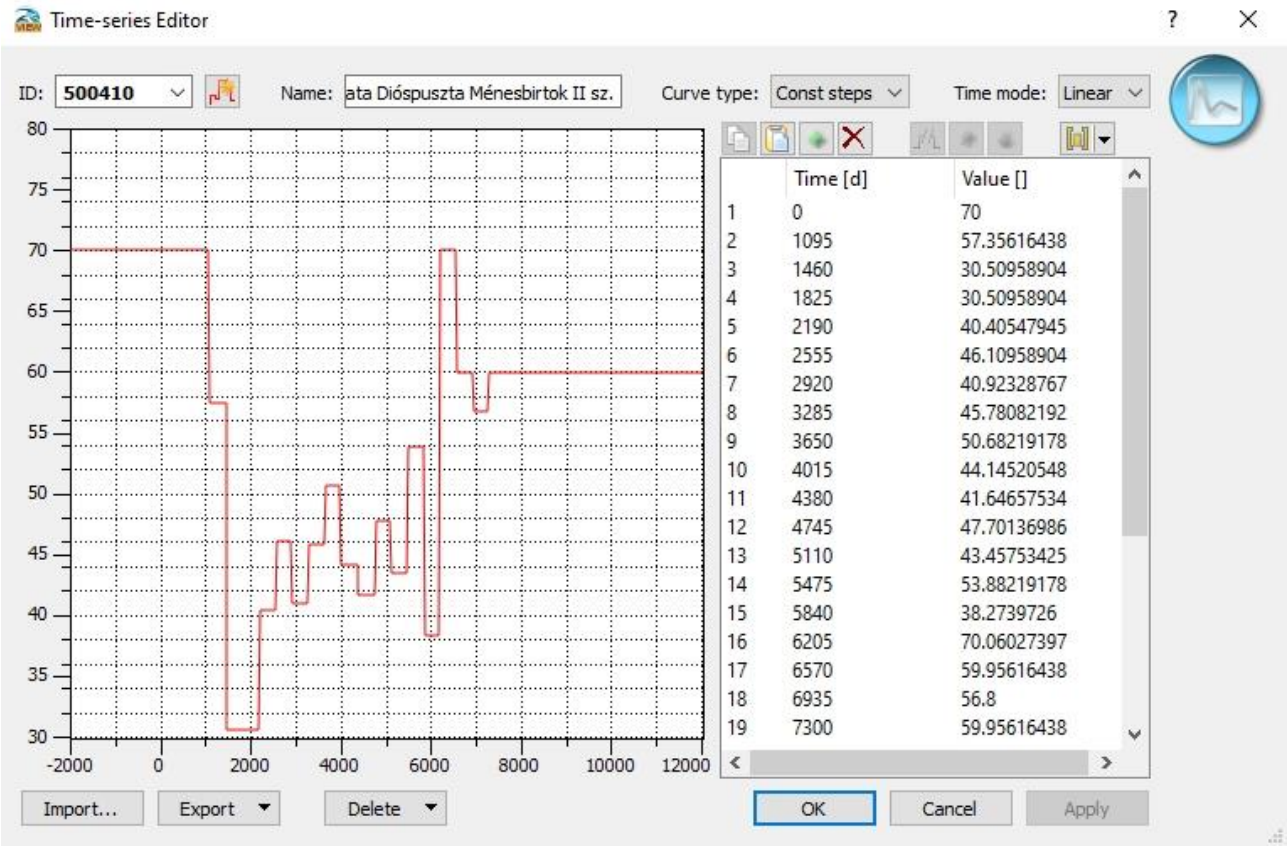
Összesen 46 db kút, kutanként 30 évnyi termelési adata szerepel a numerikus modellben. A kutaknak 2019-ig a tényleges termelési adatait vettük figyelembe, míg 2020-tól, ahol ez az adat már nem volt elérhető a 2018-évi termeléseket használtuk, mint időben állandó termelési adatot.

A fő karsztvíztárolót megcsapoló objektumok termelését az 5. numerikus rétegbe telepítettük tekintettel arra, hogy ez a réteg adja a karsztos összlet transzmisszivitásának nagy részét, és a felette fekvő 4. réteg erősen vízrekesztő, ilyen módon az 5. numerikus szintre telepített kutak utánpótlódása gyakorlatilag kizárólag a mészkőből történik.

A tranziens modellben a vízkivételeket éves időlépcsővel, lépcsős függvénnyel definiáltuk (***42. 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 (<gap>). A vízkivételi adatbázist át kellett alaktani a FEFLOW bemeneti adat formátumának megfelelően.



41. ábra: A numerikus modellben szereplő 4.tipusú (Well) peremfeltétel



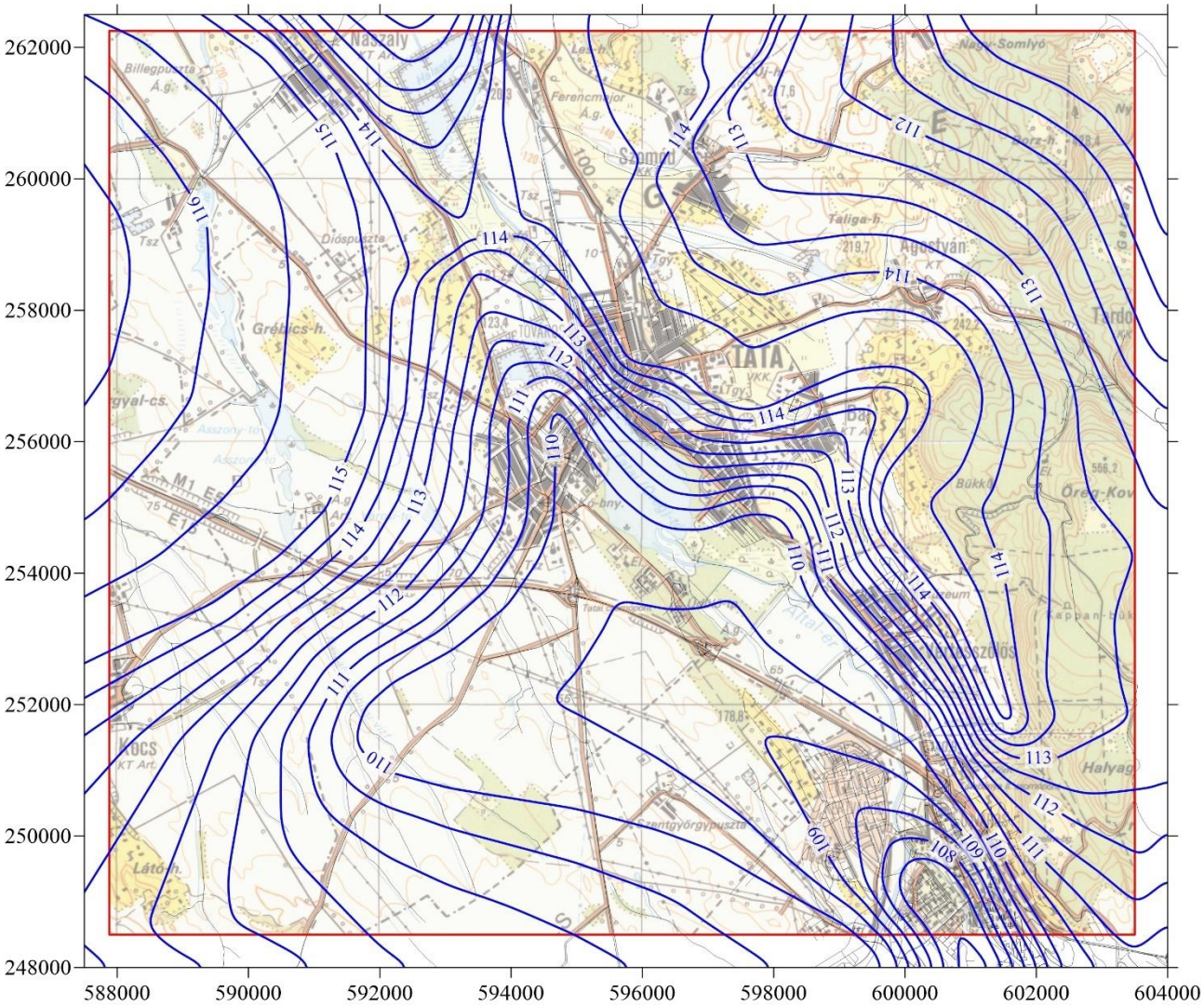
42. ábra: A vízkivételek modellbeli leképezése az 500410 jelű kút (Tat, Dióspuszta, Ménesbirtok II. sz. kútja) példáján

3.5 A tranziens modellezés

A tranziens modellezés során egy pesszimista és egy erősen pesszimista (későbbiekben ultra pesszimista néven említett) változatot kellett elkészíteni. A pesszimista változat esetén a jelenlegi állapot után a korábbi legcsapadékosabb évtized beszivárgási viszonyait feltételeztük, az ultrapesszimista esetben az utolsó évben az eddigi legcsapadékosabb 2010. évbeli beszivárgásokat alkalmaztuk. Emellett készült mind a pesszimista, mind az ultrapesszimista modellnek egy ún. kötött változata is, ahol a megfigyelőkutakban a vízszinteket előírt módon a méréseknek megfelelően változtattuk, így az ismert mérési pontokban a kalibrált modell hibáját mesterségesen megszüntettük. Ezen modellváltozatokra „kötött” modellként hivatkozunk a későbbiekben.

3.5.1 A tranziens modellezés kezdeti feltételei

A lokális tranziens modell kezdeti időpontjának a 2000. január 1-ét jelöltük ki. Mivel a kezdeti vízszinteket alapértelmezetten a Dunántúli-középhegység 1999. évi karsztvízszint-térképéről vettük le, ugyanakkor a modellben a vízszintek (részben a 2000. január 1-i időpont miatt is kicsit magasabban voltak, ezért a térképről digitalizált potenciálszinteket a jobb egyezés érdekében és elkerülendő a tranziens modell első pillanataiban bekövetkező potenciál-ugrásokat is, 3 m-rel megemeltük és ezt az állapotot illesztettük a modellbe kezdeti feltételként.



43. ábra: A tranziens modell kezdeti vízszint eloszlása

3.5.2 A tranziens modell időléptéke

A tranziens modell havi időlépcsőnként számítja és jeleníti meg az eredményeket, ebbe a szökőéveknek megfelelő bontás is beletartozik. Tehát a numerikus modell összesen 358 időpontra végzi el a számítást, 2030 január 1-ig. A 2019 január 1.-e a modellben 6940 napnak (19 évnek), a 2020 január 1. 7305 napnak (20 évnek), a 2030 január 1. 10958 napnak (30 évnek) felel meg.

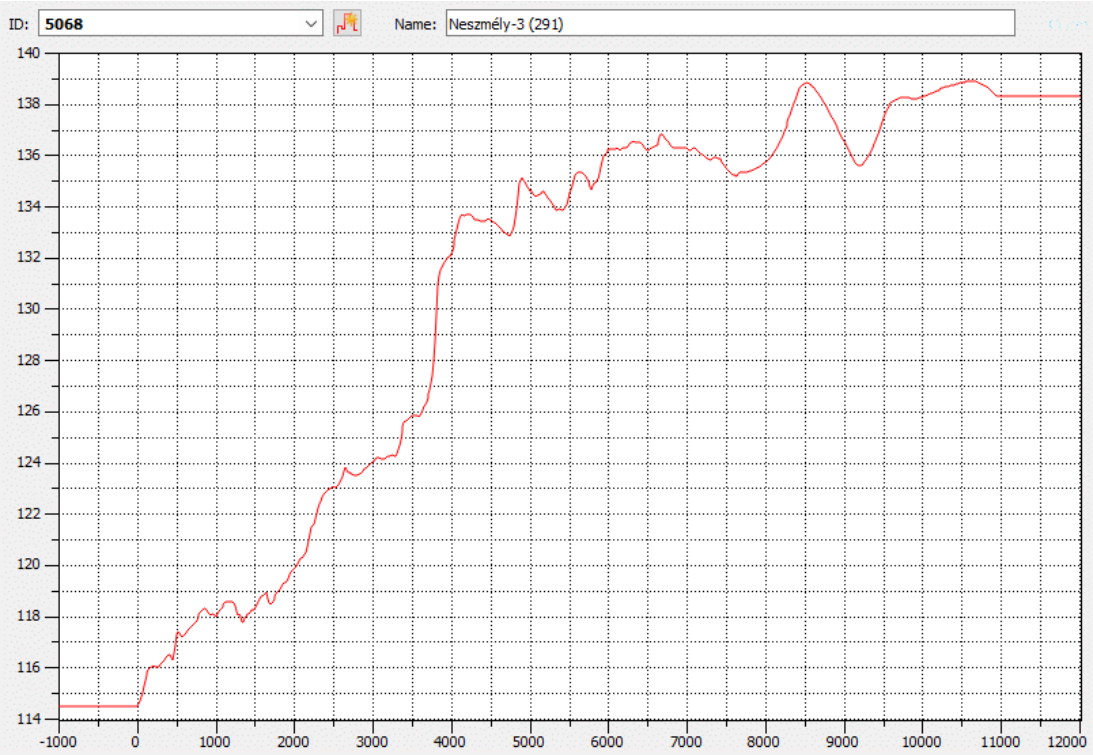
3.5.3 A numerikus modell kalibrálása

2.5.4.1 *A karsztvízszint kalibrálása a 2019 állapotra*

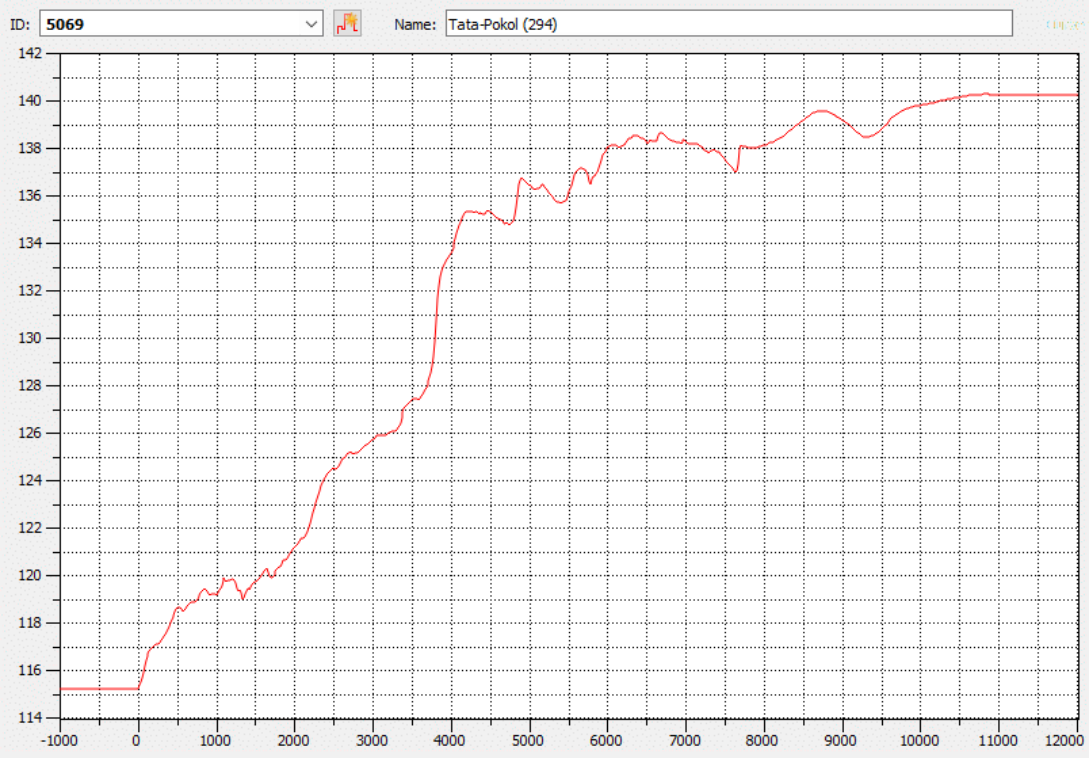
A tranziens modell kalibrációjához a területre eső mindösszesen öt karsztvízre telepített monitoring kút nyugalmi vízszint adatát használtuk fel. A kutak közül 4 db azonos változási karakterisztikát mutatott (Tata-Pokol, Neszmély-3, Vértesszőlős-1 és Kocs-1) míg az utolsó Baj-1 megfigyelőkút a többitől teljesen eltérő megjelenésű és karsztvízszint-tartományú vízszint-változást mutatott, mind az elmúlt 20 évben, de a regionális modellezés 70 éves idősora során is.

A Baj-1 kút vízszint idősora tökéletesen hasonlatos egy alsó kifolyású karsztvízgyűjtő idősorához, ahol a rendszer mélypontjának van egy vagy több, adott pontján ismert potenciálfüggő hozammegcsapolása. Ilyen a Bükkben pl. a Nagyvisnyó-8 vagy a Tebepusztai kút idősora is. Ráadásul a vízszint aszimptotikusan tart egy magas, kb. 162 mBf. szinthez, ami annak a rendszernek a kifolyási, megcsapolási szintjéhez közeli érték lehet. Mindezek alapján azt gondoljuk, hogy a Baj- 1 kút nem a főkarsztot, hanem egy arra, vagy afelett települő másik, esetleg függőkarszt zónát szűrőz be, amelyik hidraulikai szempontból nincs, vagy csak elhanyagolható kapcsolatban áll a főkarszttal. Ilyen módon a Baj-1 kútra való kalibrálástól eltekintettünk. Tehettük ezt azért is, mert a probléma szempontjából releváns karsztvízszint emelkedéssel jellemezhető területek mind a főkarszttal kapcsolatosan jelentkeznek, ilyen szempontból az ismeretlen geometriájú függőkarsztos zóna modellezése irreleváns.

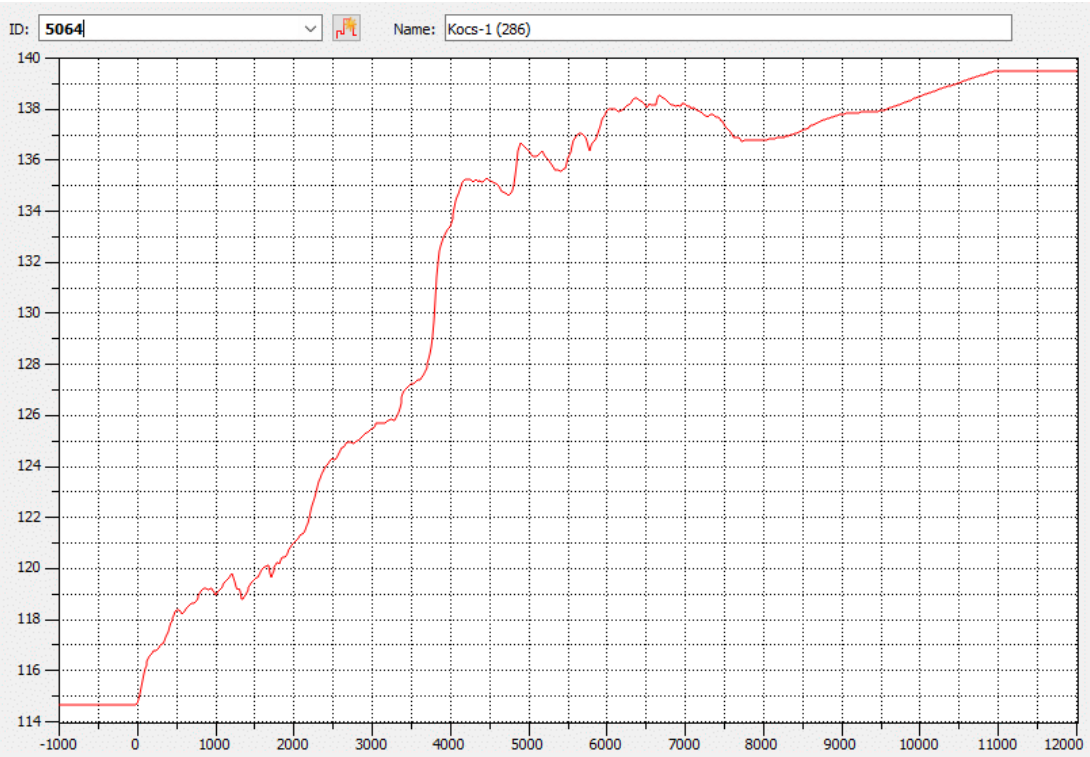
A mért vízszinteket havi időlépcsővel hívtuk be a modellbe, minden hónap első mért értéke került be kb. 2021 első negyedévéig (egyes kutaknál január végéig, máshol március végéig), ameddig az adatszolgáltatásban az értékek szerepeltek. Az adatsort ezután kétféleképpen hosszabbítottuk meg 2030-ig (***44. ábra - 48. ábra***). Egyik esetben a 2019 január 1-i értéket konstansnak vettük, másik esetben az idősort a regionális modellben számított vízszintváltozási karakterisztikával követtük le, ami a feltételezett pesszimista forgatókönyvnek megfelelő vízszintváltozási trendeket mutatja be. Az eltérések szemléltetésére az állapotot érdemes összevetni azzal, ha a vízszintek a 2019. évinek megfelelően alakulnának, amit a ***49. ábra*** mutat be.



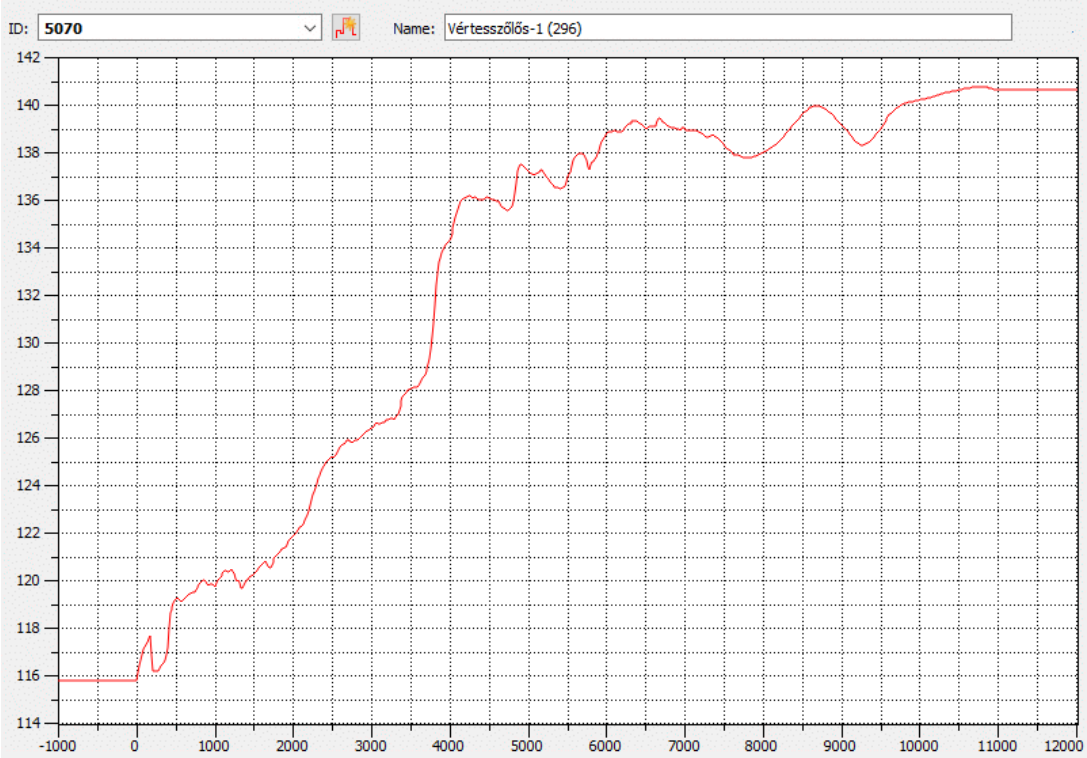
44. ábra: A Neszmély-3 karsztvízszint észlelőkútban mért tranziens vízszint-változás [mBf] 2021 után kiegészítve a regionális modellből származó várható trenddel



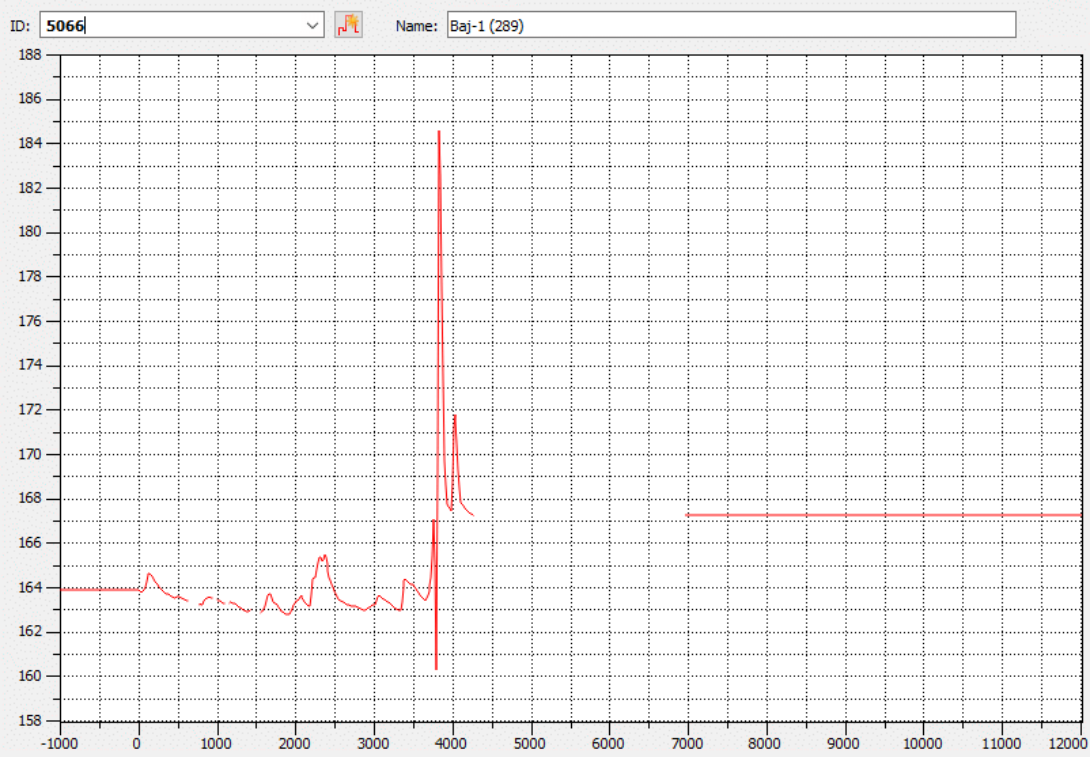
45. ábra: A Tata-Pokol karsztvízszint észlelőkútban mért tranziens vízszint-változás [mBf] 2021 után kiegészítve a regionális modellből származó várható trenddel



46. ábra: A Kocs-1 karsztvízszint észlelőkútban mért tranziens vízszint-változás [mBf] 2021 után kiegészítve a regionális modellből származó várható trenddel



47. ábra: A Vértesszőlős-1 karsztvízszint észlelőkútban mért tranziens vízszint-változás [mBf] 2021 után kiegészítve a regionális modellből származó várható trenddel



48. ábra: A Baj-1 karsztvízszint észlelőkútban mért tranziens vízszint-változás [mBf] 2021 után kiegészítve a 2019-es vízszinttel

49. ábra: Az optimista forgatókönyv szerinti (jövőben 2019 évi vízszintek) és pesszimista forgatókönyv szerinti (jövőben a pesszimista forgatókönyv szerint változik a beszivárgás következtében a vízszint) vízszintek feltételezett alakulása a Neszmély-3 kútban

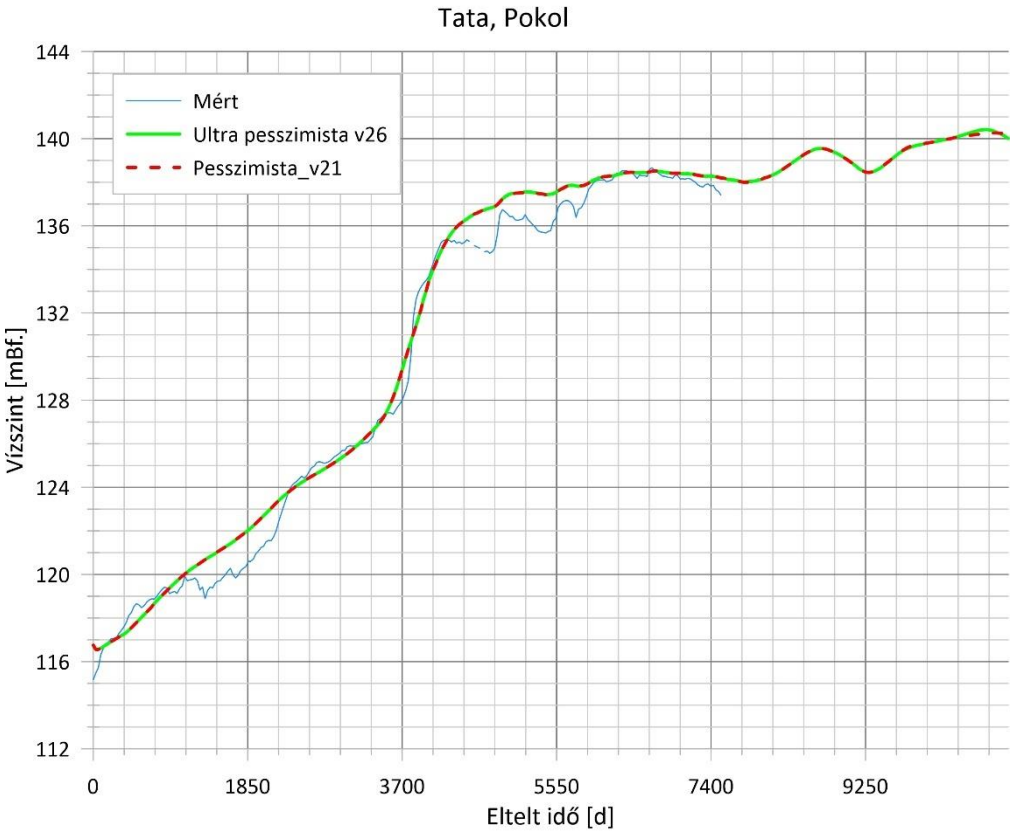
Az adatsorokból látszik, hogy a visszatöltődés elérte maximumát 2018 tavaszán, ami egy 2016 tavaszától 2019 tavaszáig tartó magas vízállásos időszak során következett be. Ilyen módon az első gyors visszatöltődési szakasz az adatok alapján lezárultnak tűnik, a mostani változások és vízszint-emelkedések már nem a bányászati víztelenítés megszűnése miatti változásoknak (visszatöltődésnek) köszönhetőek, hanem a hidrometeorológiai viszonyok alakulásának, illetve a felszín alatti víztermelések súlypontjainak áthelyeződéséből, és a vízigényeket követő víztermelések időbeli változásaiból fakadó új és folyamatosan változó „dinamikus egyensúlyi állapotot” reprezentálja.

A tranziens modell kalibrálását a 2019-es januári állapotra végeztük el. A továbbiakban a bemutatás is erre a két időpontra vonatkozik.

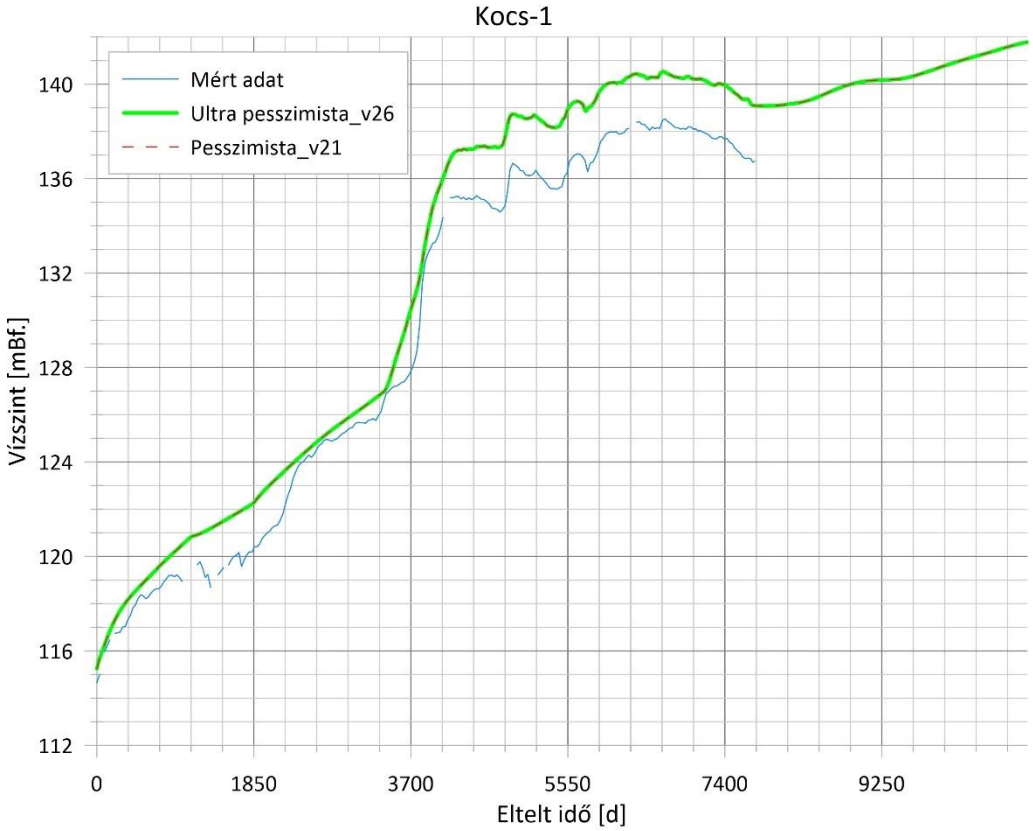
A kalibrálást a tranziens idősorra végeztük el, tekintettel a négy megfelelő adatsorral rendelkező kútra (***50 - 53. ábrák***). Itt jegyezzük meg, hogy a Kocs-1, a Vértesszőlős-1 és különösen a Neszmély-3 észlelőkút nagyon közel esik az általunk peremfeltételekkel befolyásolt modellperemekhez, ilyen módon arra törekedtünk, hogy a modell központi és a probléma szempontjából leginkább érintett térségében a Tata Angolparki kutak térségében (Tata-Pokol észlelőhely) legyen a legnagyobb az egyezés. Mivel a beszivárgás értékek és a peremfeltételek is egyéves ciklus szerint váltakoznak, ilyen módon az éven belüli változások lekövetése még lokális modellezés szintjén sem reális elvárás.

Az ábrákból látszik, hogy a peremfeltételektől nem befolyásolt, Tata-Pokol megfigyelőhely esetében a teljes 21 éves időszakon belül 1 méter alatti vagy körüli a hiba. A peremekhez kicsit közelebb eső, Vérteszőlős-1 kút esetében 2011-ig 1 méter alatti a hiba, utána ez 1-1,5 m körüli szinten állandósul. A déli peremhez közeli Kocs-1 kút esetében a hiba 2011-ig 1 méter alatti, az átlaghiba (0,2-1,5 méter tartományba esik), utána kb. 2 méter körül állandósul, a modell ÉK-i sarkában egészen a peremre eső Neszmély-3 kút esetében pedig 2011-ig 1,5-2 méter közötti a hiba, ami ezután 3 méter körül stabilizálódik.

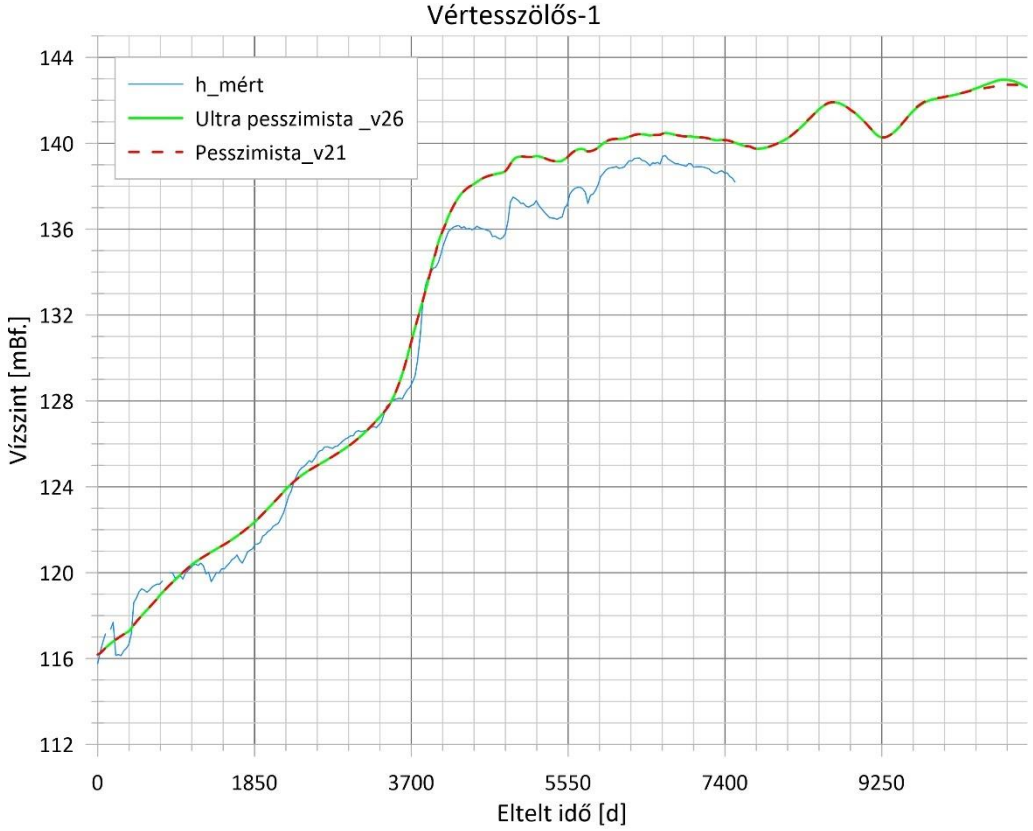
Mivel a központi területrészen a hiba 1 méter alatti, ezt a modellváltozatot fogadtuk el és változtattuk meg később kötött vízszintűvé, illetve pesszimistából ultra pesszimista változatúvá. Itt jegyezzük meg, hogy a legnagyobb eltéréseket produkáló 2011-2021 időszakban az eltérések a mért és a számított értékek között közel állandóak, így azon következtetések és megállapítások, melyeket a vízszint változásokról teszünk a megadottnál nagyságrendileg pontosabbak, vélhetően a változások tekintetében a modell pontossága 20-25 cm alatt van, az eltérések csak abszolútértékben nagyobbak.



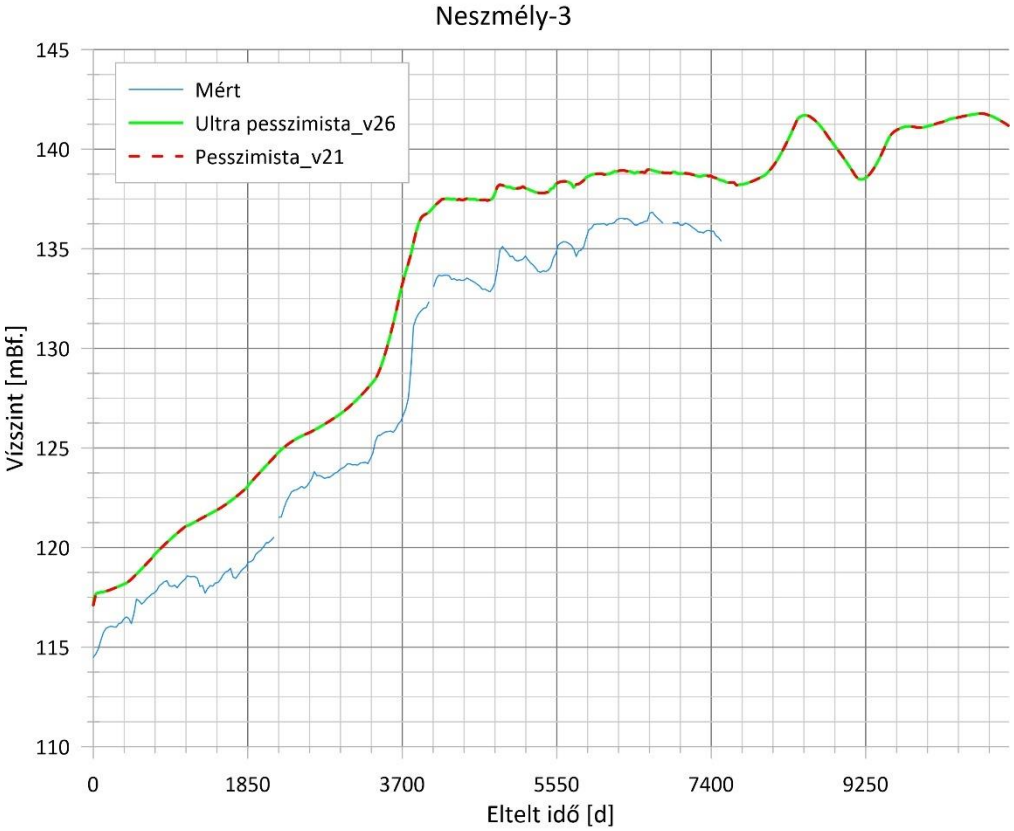
50. ábra: A mért és számított vízszintek alakulása a kalibrált modellekben (Tata-Pokol)



51. ábra: A mért és számított vízszintek alakulása a kalibrált modellekben (Kocs-1)



52. ábra: A mért és számított vízszintek alakulása a kalibrált modellekben (Vértesszőlős-1)



53. ábra: A mért és számított vízszintek alakulása a kalibrált modellekben (Neszmély-3)

A 4 db megfigyelőpont miatt RMS hiba számításának nincs sok értelme, de ennek ellenére ezen számokat megadjuk: 2010 január 1-jén a vízszintemelkedések leggyorsabb időszakában a 4 kút lapján számított RMS hiba 2,98 m, míg 2019. január 1-jén ugyanez 1,76 méter. A modell középső részére eső két kútból számított RMS hiba 0,82, illetve 0,67 m.

Az eltérések a regionális és a lokális modellterület felbontásának és diszkretizációjának eltéréséből, a beépített különböző információk sűrűségéből, azok helyességéből és a modellezésnél elkerülhetetlen egyszerűsítésekből, pontosabban az ezek közötti ellentmondásokból származik.

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.

A modellezés során elsősorban arra törekedtünk, hogy a vizsgált terület minél több és egymástól távol eső pontjában reprezentatív eredményeket szolgáltasson, miközben azt is tudjuk, hogy számos nagyon kevéssé ismert, de a potenciálszintek szempontjából igen fontos tényezőt vagy nem ismerünk vagy ismerünk, de nem tudjuk a modellbe adaptálni.

A vízkivételeket általában megfelelő pontossággal ismerjük, de az általa okozott depressziókat kevésbé. Sok kisebb víztermelő létesítmény esetében az adatszolgáltatás bizonytalanságokat hordoz magában.

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, ilyen módon a modell „jóságának" ismérve valószínűleg nem egy adott, méterben kifejezhető pontosság elérése, hanem az, hogy az eltérő jövőbeli állapotok esetére számolt eredmények milyen mértékben logikusak és milyen mértékben értelmezhetőek.

2.5.4.2 *A számított forráshozamok alakulása a mért adatok tükrében*

A ***5. táblázat*** foglalja össze a nagyobb források és forráscsoportok mért és a numerikus modell által számított mennyiségét, a 2019-es állapotra. Itt megadtuk egy korábbi VITUKI mérés adatát is viszonyítási alapot képezve. Sajnos a források egy jelentős része esetében nincs lehetőség a pontos mérésre vagy a fakadási helyek (pl. tófenék) okán vagy mert a vízhozamot nem mérhető módon vezetik el.

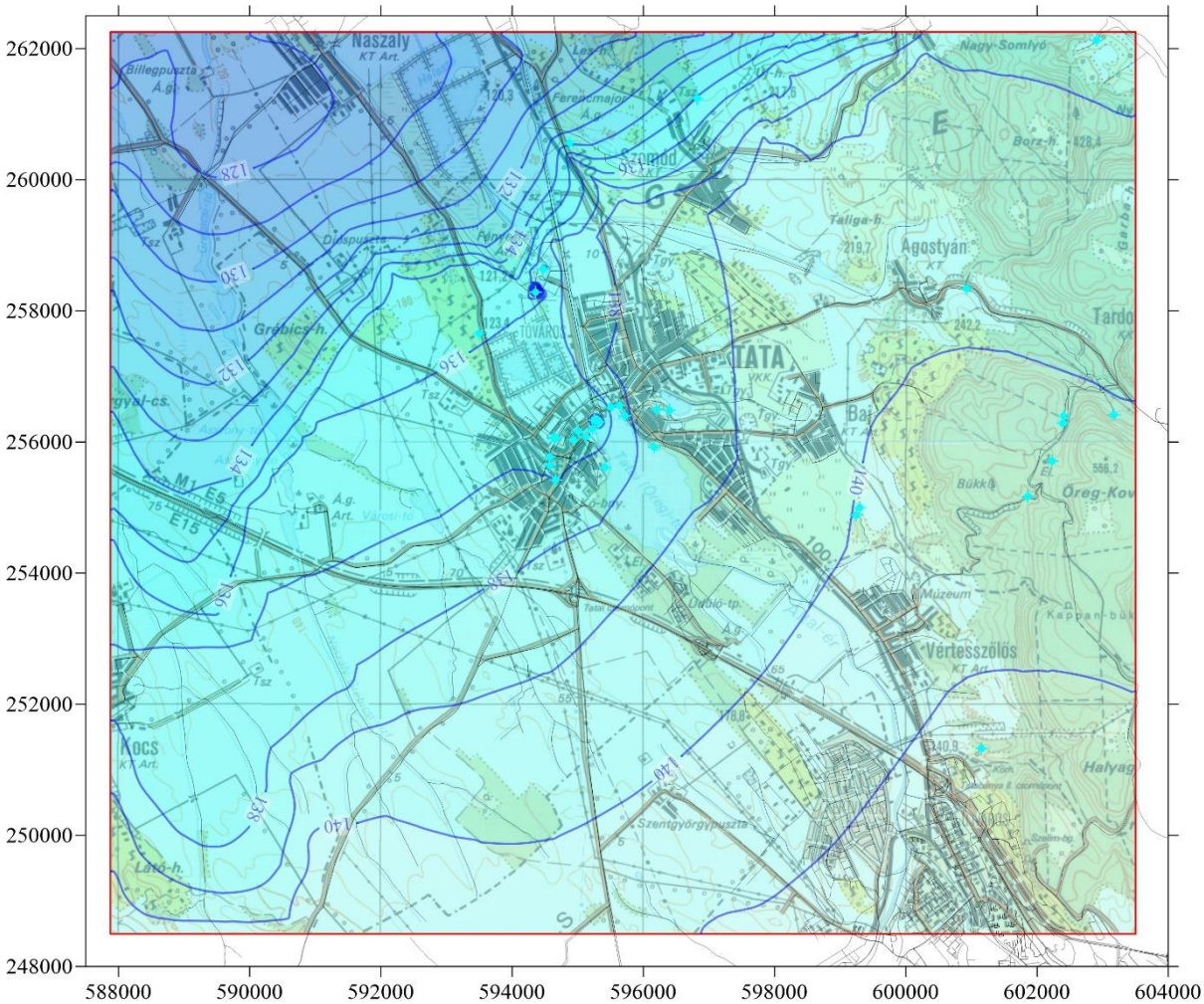
5. táblázat: A forráshozamok kalibrációja 2019-es állapotra

Forrás	**Mért (SMARAGD)**	**Mért (Maller, 2018)**	**Mért VITUKI (1950)**	**Számított**	
	[l/perc]	[l/p]	[%, l/perc]	[m^3/d]	[l/perc]
Fényes források	8515 + a tóforrások hozama	10277	51%, 25200	14095	7988
Belvárosi források	803 + az öregtavi váralatti tómederbeli - és ikerforrások hozama	n.m.	9%, 4220	4454	3093
Kálváriadombi források	850 + a komáromi utcai források drénbe elfolyó hozama	n.m.	5%, 2260	1437	998
Angolparki források (Tükör-forrás fakad)	157	n.m.	35%, 17400	481	334
Összesen	**>> 10240**	**-**	**49141**	**14592**	**21012**

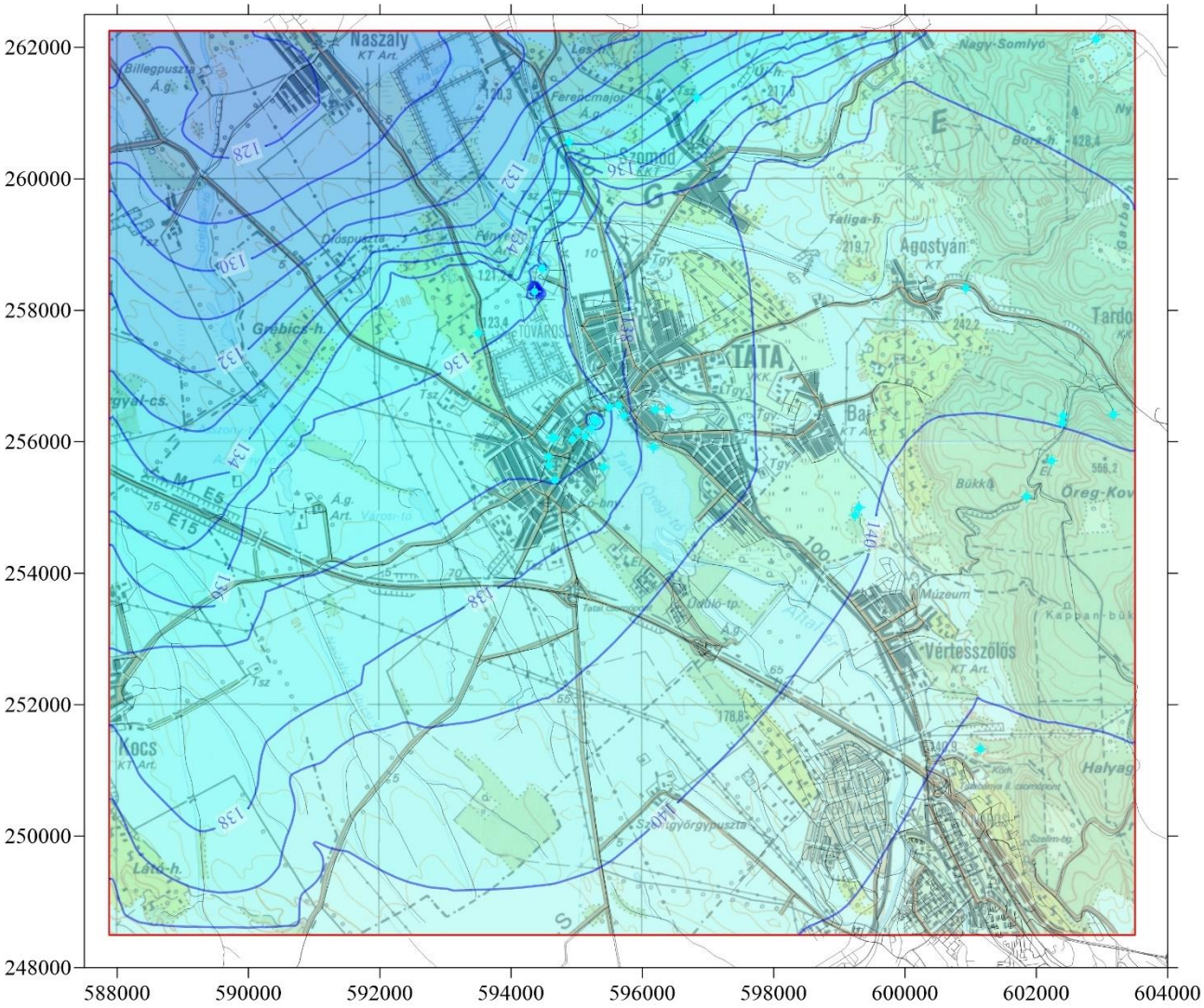
4. A LOKÁLIS MODELLEZÉS EREDMÉNYEI

4.1 A potenciálszintek alakulása

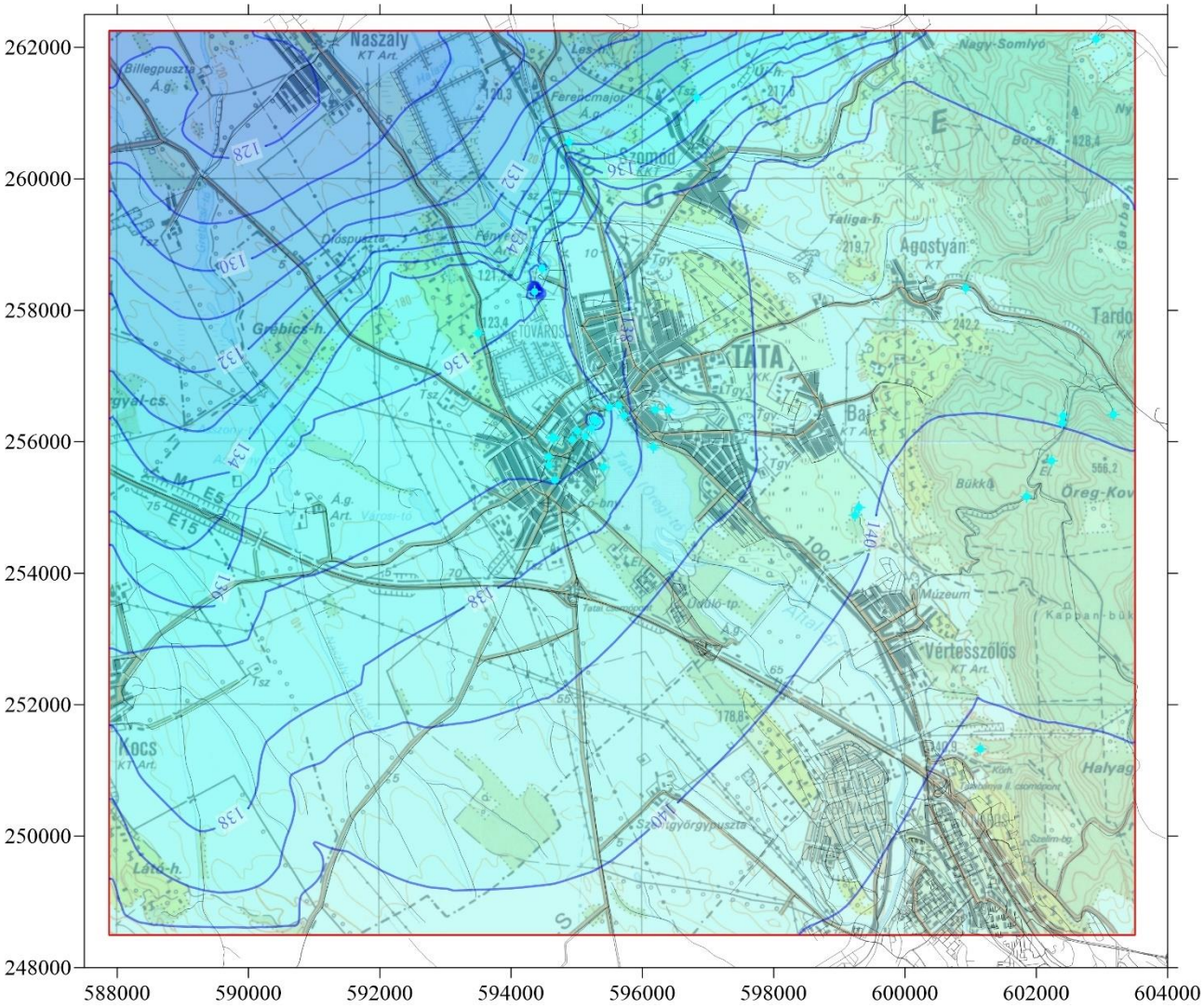
A modellezett karsztvízszintet pesszimista esetben a 2019. januári, a 2021. januári, a 2025. januári és a 2030. januári állapotra az ***54 - 57. ábrák*** mutatják be. Az időpontokat kiválasztását a regionális modellel való összevethetőség, a jelenlegi helyzet, a végállapot és egy jövőbeli köztes időpont bemutatásának igénye határozta meg.



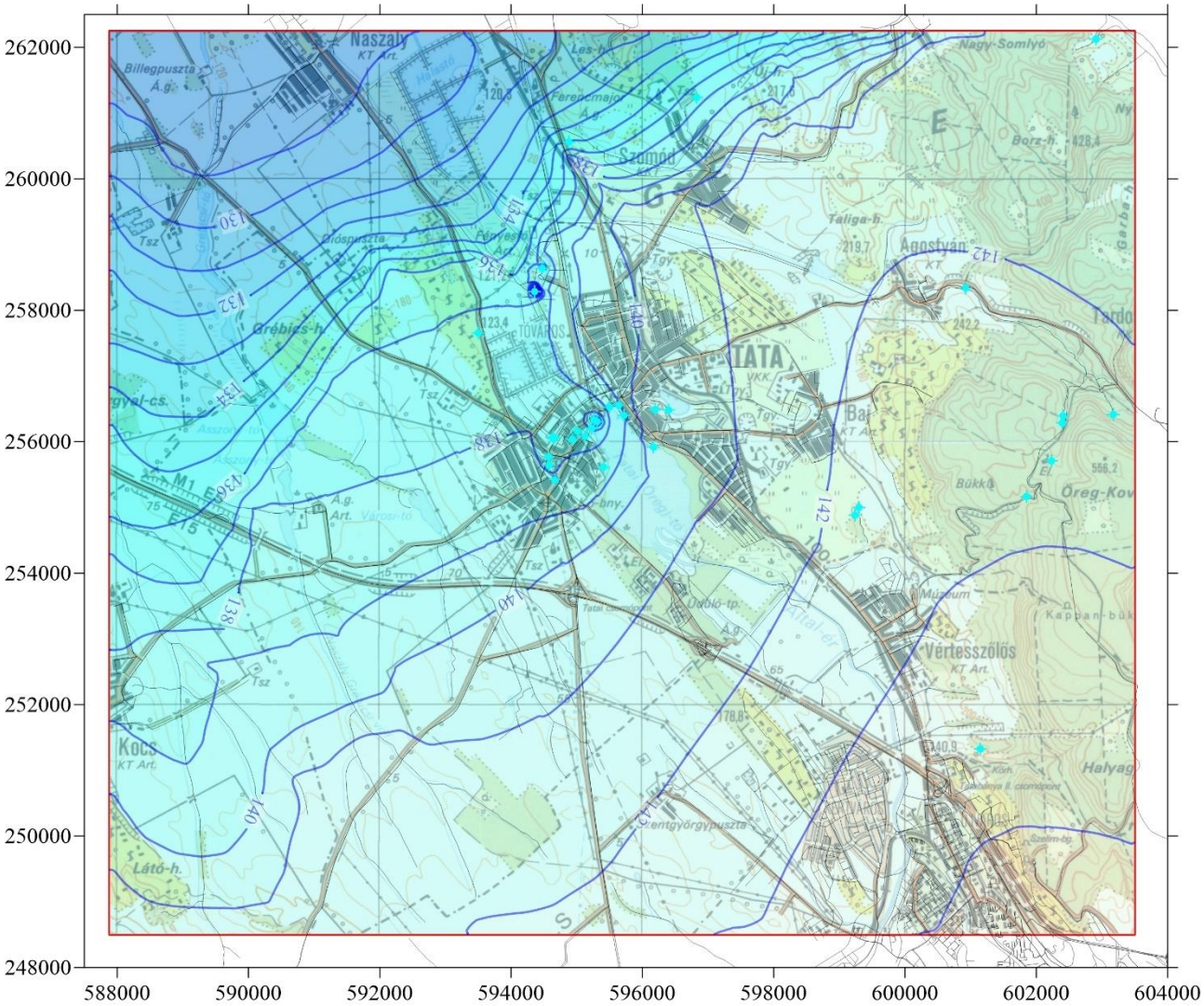
54. ábra: A számított karsztvízszintek alakulása a kalibrált modellben 2019. január 1-jén



55. ábra: A számított karsztvízszintek alakulása a kalibrált modellben 2021. január 1-jén



56. ábra: A számított karsztvízszintek alakulása a kalibrált modellben 2025. január 1-jén



57. ábra: A számított karsztvízszintek alakulása a kalibrált modellben 2030. január 1-jén

4.2 A 2019-es állapot

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

A lokális modellezés időperiódusa rövidebb volt, mint a regionálisé, 2003-tól kezdődve már csak a visszatöltődés periódusát szimulálta. 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. 2019-re, ami a modellezés referencia időpontja, a lokális modellel lehatárolt karsztvíztároló részben a karsztvízszint visszatöltődése kvázi befejeződött.

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, víz- és hőkészlete, nyomás- és mozgásállapota hosszú idő átlagában egyensúlyban marad.

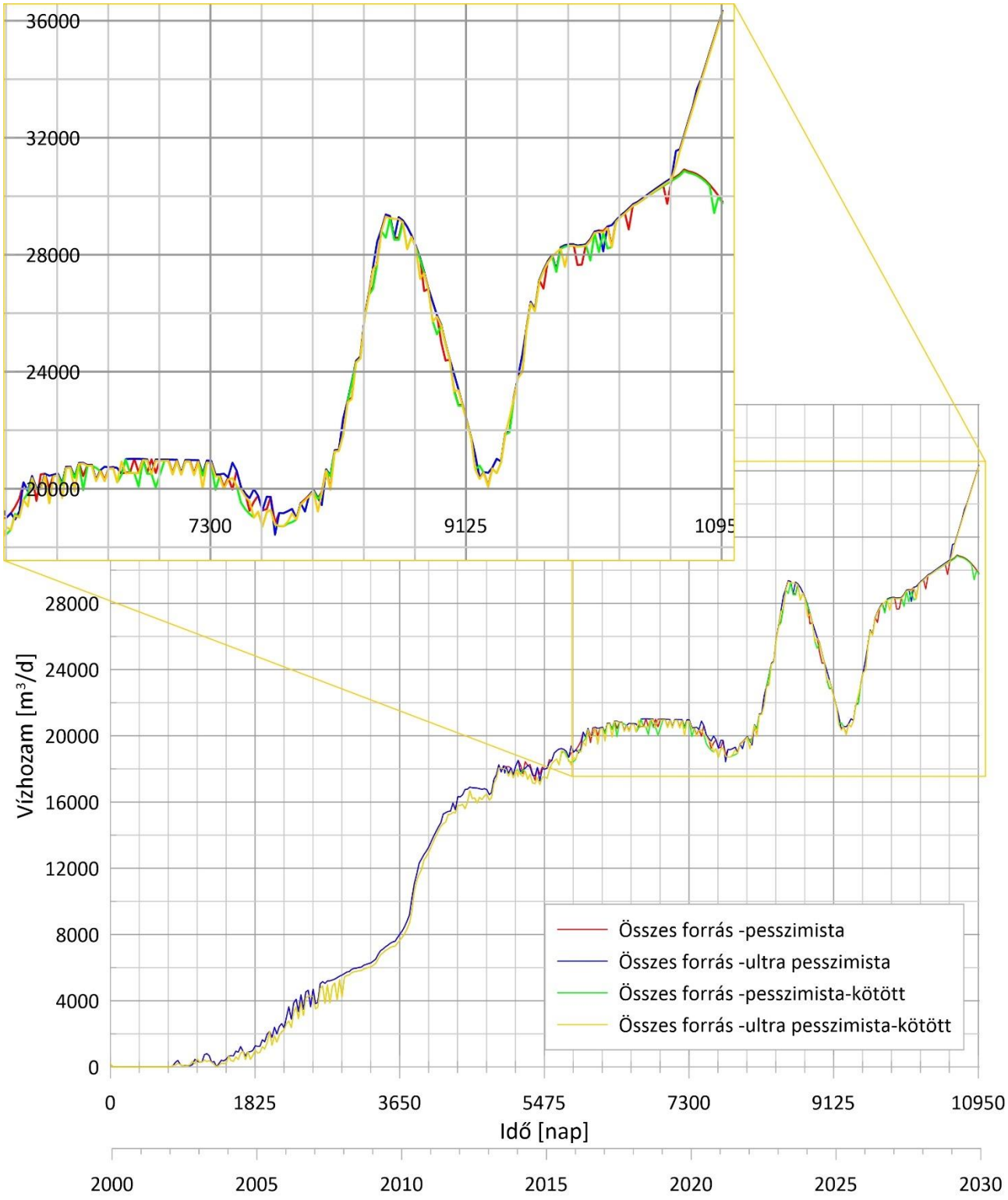
A projekt feladatai közé tartozik a 2019. januári 1. állapotú karsztvízszint térkép megszerkesztése. A karsztvízszint térképet a lokális tranziens hidrodinamikai modellezés eredményei alapján mutatjuk be (***1. térképmelléklet)***.

A modellezett számított és a törzshálózati kutakban mért vízszintidősorokat mutatják be az ***50-53. ábrák***.

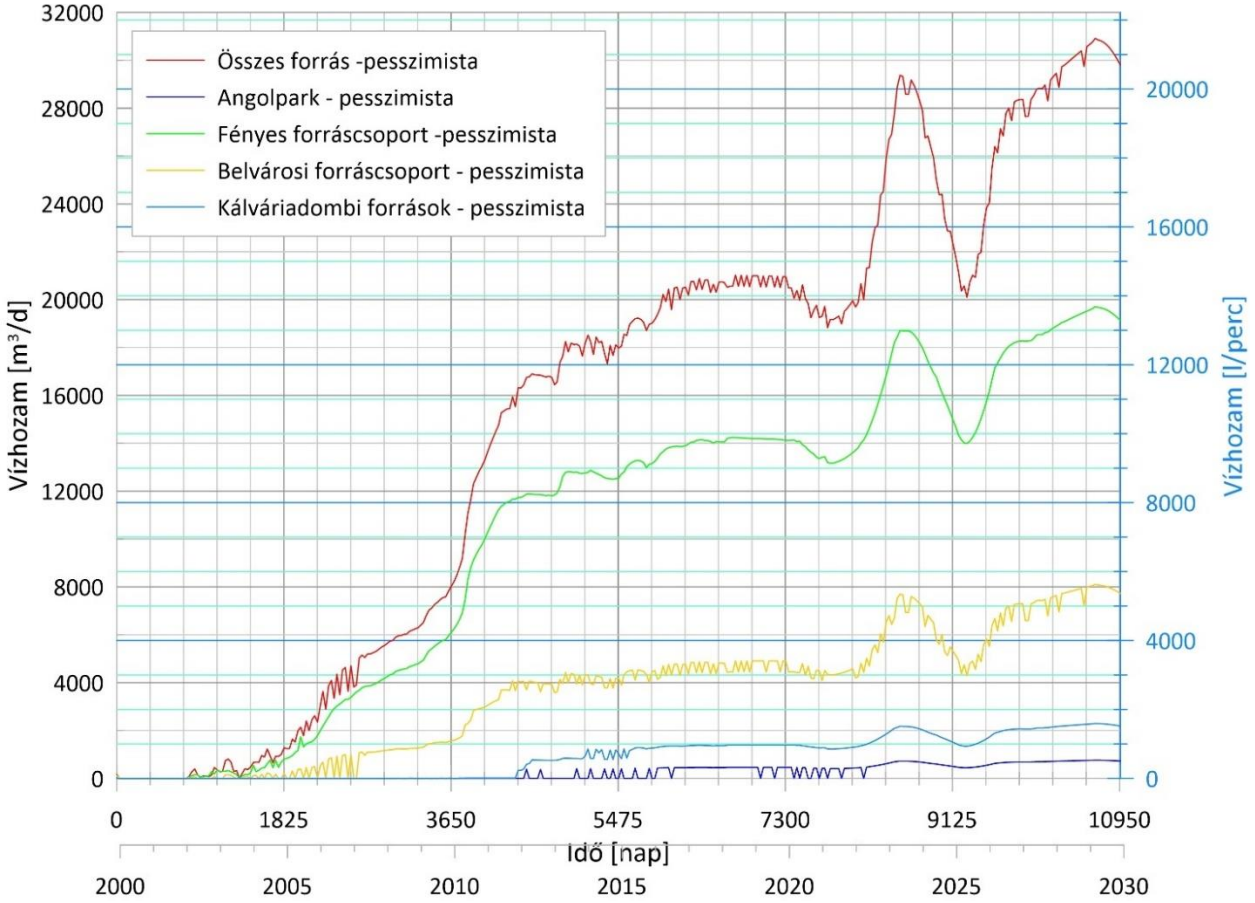
4.3 A források hozamának alakulása

A visszatöltődés eredményeképpen az elapadt források újból működni kezdtek, illetve a hozamuk egyre növekedett. A lokális modellterületen található, a vízgazdálkodás szempontjából jelentős források számított vízhozamát mutatják be az ***59. ábra-60. ábra***.

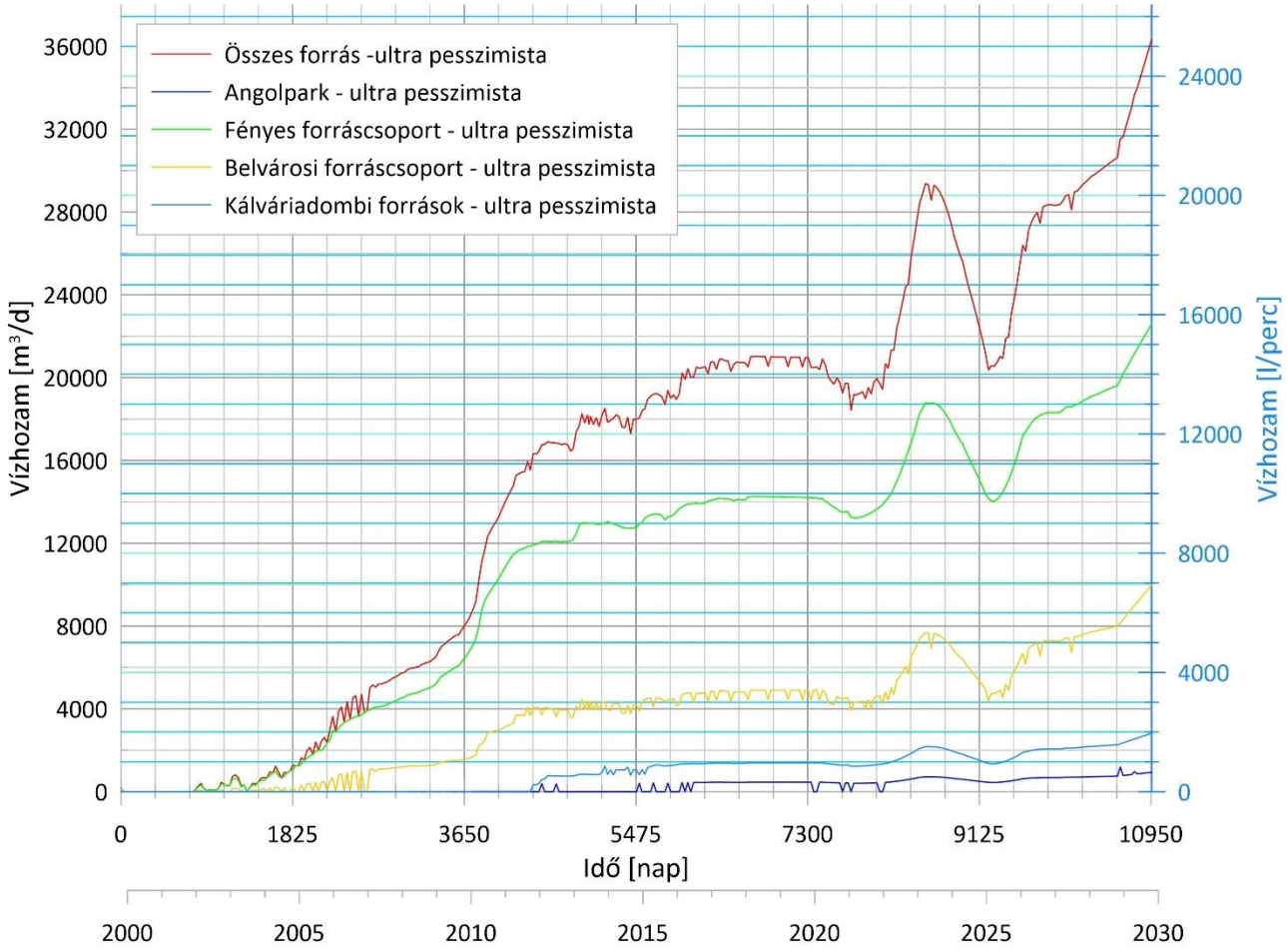
A hozamokat összevetve az ***5. táblázatban*** megadott hozamokkal az látszik, hogy nagyságrendileg hasonló hozamok alakultak ki a modellben, miközben az egyes források újbóli fakadásának időpontja is hasonló a ténylegesen tapasztaltakkal.



58. ábra: A számított összes karsztforrás vízhozam alakulása az időben az eltérő scenáriók esetén



59. ábra: A számított karsztvízhozamok a forráscsoportokban a pesszimista forgatókönyvnek megfelelő beszivárgási viszonyok esetén



60. ábra: A számított karsztvízhozamok a forráscsoportokban az ultra pesszimista forgatókönyvnek megfelelő beszivárgási viszonyok esetén

4.4 Prognózis 2030-ra

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

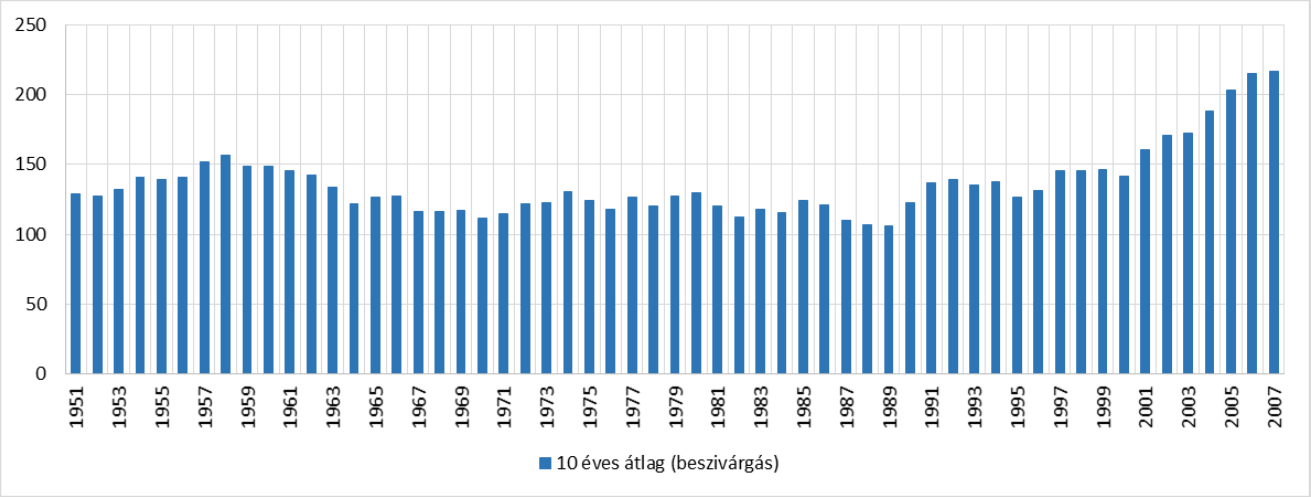
A beszivárgás mennyiségét számtalan tényező befolyásolja, ezen belül időben változó tényező: a csapadék mennyisége, a csapadék mennyiségének téli és nyári hidrológiai félévi eloszlása, és a csapadék intenzitása.

A módszertan szerint a prognózis időszakára (2019-2030) a beszivárgás mennyiségét az elmúlt 70 év, a Dunántúli-középhegységre jellemző éves mért csapadék adatokból 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 „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” című jelentésben mutattuk be.

A regionális modellezés három szcenáriót vizsgált. A „pesszimista”, „optimista” megfogalmazás a potenciális vízkárok szempontjából vizsgálja a karsztvízszint változását. A legmagasabb karsztvízszint a pesszimista változat esetén várható. Az átlagos változat nem egy matematikai átlagot takar az optimista és a pesszimista változat között, hanem egy hosszú, 30 éves időszakra jellemző átlag értéket. Fontos azt is megállapítani, hogy a kiválasztott évtizedeken belül magas és alacsony beszivárgású évek is előfordultak, valamint a valóságban sohasem következik be a csapadékeloszlás ugyanúgy, ahogy már egyszer megtörtént.

A 10 éves periódusok beszivárgás átlagait a tatai meteorológiai állomáson mért csapadék adatok alapján a *Hiba! A hivatkozási forrás nem található.* mutatja be.



61. ábra: A tatai meteorológiai állomás zónájához tartozó terület HELP szoftverrel számított beszivárgás mennyiségének 10 éves átlagai

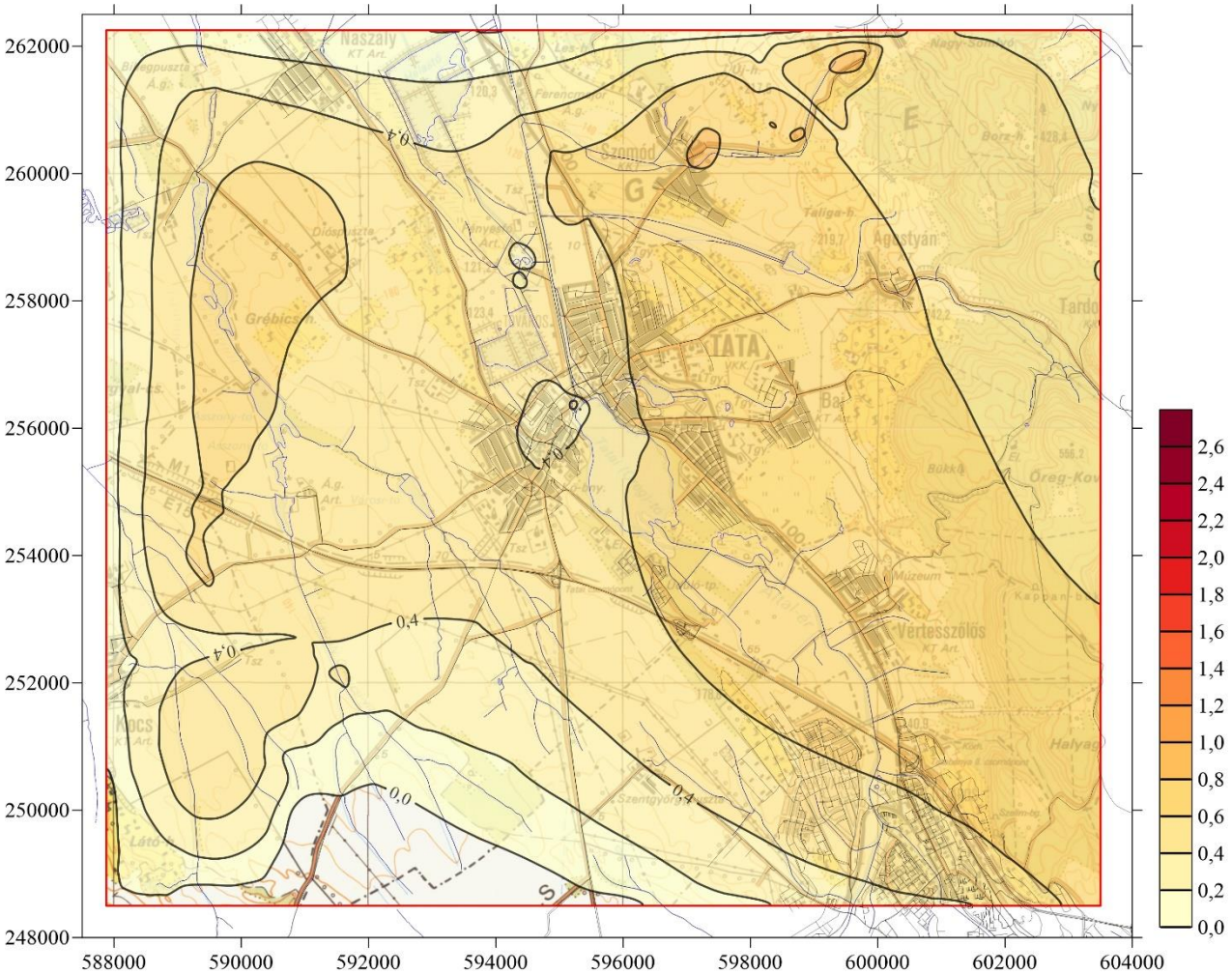
A tatai lokális modell esetében a pesszimista és egy ultrapesszimista szcenárió szimulációját kellett elvégezni. A pesszimista esetben a 2019-2030 időszakra a legcsapadékosabb egybefüggő időszak (2007-2018) (beszivárgási viszonyait implementáltuk a modellbe. Az ultrapesszimista esetben amellett, hogy a jövőbeli időszakban egy csapadékos dekádot tételeztünk fel, emellett még az utolsó, 2030. évi szimulációk során az abszolút legcsapadékosabb 2010. évi beszivárgást is a modellbe implementáltuk. Érthető módon az egy év csapadéktöbblete a modell általános viselkedését nem változtatta meg, ugyanakkor a hozamokban és a vízszintekben az ultrapesszimista variáns és a pesszimista variáns különbözősége megmutatkozott. A tranziens modell futásának első 29 évére ugyanakkor mindez értelemszerűen hatással nem lehetett.

Az alábbi ***6. táblázatban*** az egyes szcenáriókra jellemzőket foglaljuk össze.

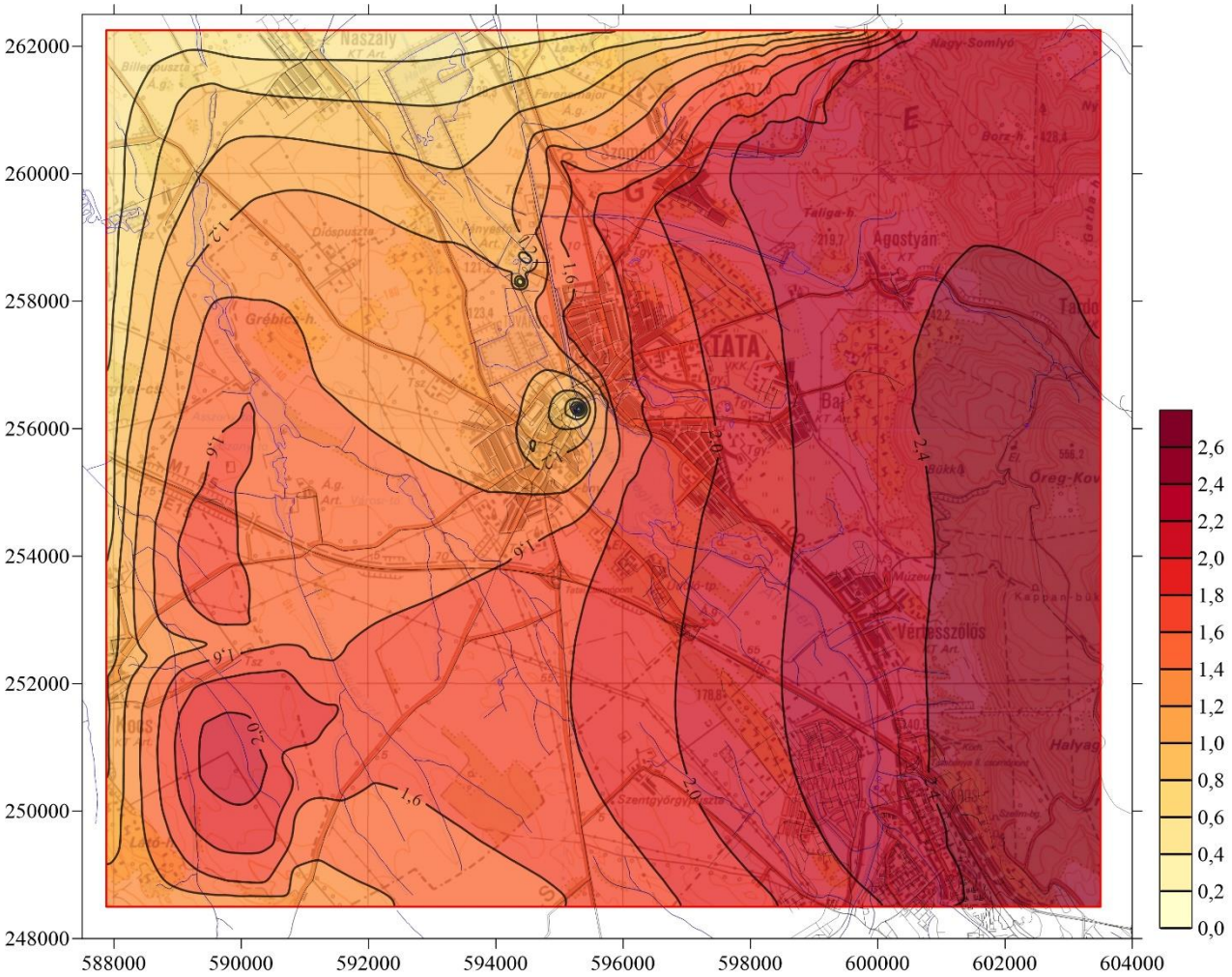
6. táblázat: A regionális modellezés során használt szcenáriók

Jellemző	Pesszimista változat	Ultrapesszimista változat
A változatok meghatározásának módja a módszertan szerint	10 éves legnagyobb beszivárgású időszak: 2006-2018	10 éves legnagyobb beszivárgású időszak: 2006-2018
A 2019-2030 időszakra ténylegesen modellezett beszivárgás	2007-2018 évek beszivárgásai	2007-2018 évek beszivárgásai, de 2029-től a 2010. évi beszivárgások
Termelés figyelembevétele a modellezésben	2018-as év tény vízkivétel	2018-as év tény vízkivétel

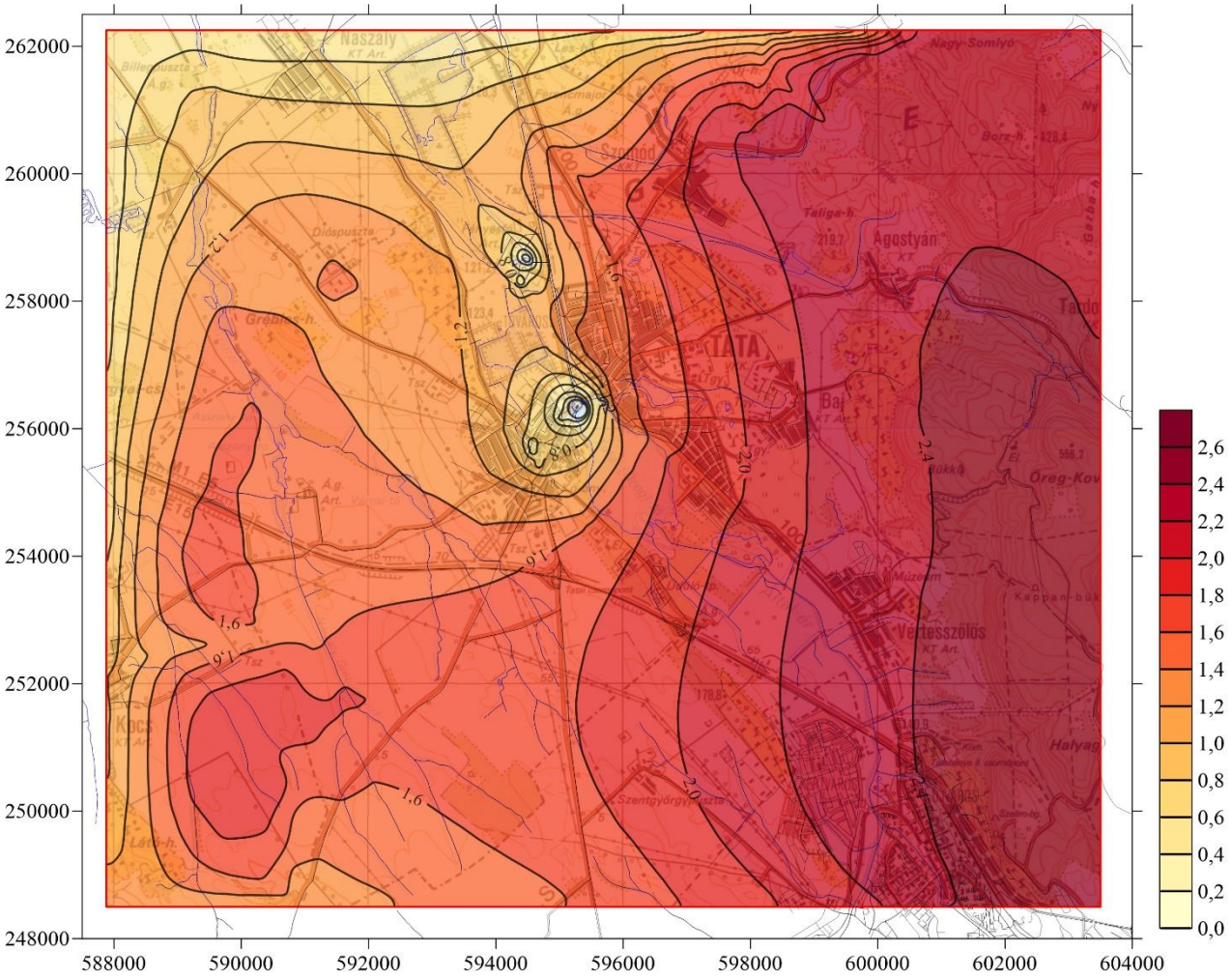
A 2030-ra prognosztizált legmagasabb karsztvízszintet a ***2. térképmelléklet*** és az ***57. ábra***, a 2019 és 2030 közötti változás mértékét a ***62. ábra-64. ábra*** sorozat mutatja be. A 2019 és 2030 közötti időszak közötti változást a ***3. térképmellékleten*** is bemutatjuk**.**



62. ábra: 2025. évi prognosztizált és a 2019. évi számított karsztvízszintek különbsége pesszimista szcenárió esetén



63. ábra: 2030. évi prognosztizált és a 2019. évi számított karsztvízszintek különbsége pesszimista szcenárió esetén



64. ábra: 2030. évi prognosztizált és a 2019. évi számított karsztvízszintek különbsége ultrapesszimista szcenárió esetén

A vízszintemelkedéseket elemezve láthatjuk, hogy egy 5 éves csapadékosabb periódus még relatíve egyöntetű vízszint emelkedési mintázatot hoz létre, azonban egy 10 éves csapadékos periódus a beszivárgási területeken fogja megemelni a vízszinteket. Jól látszik az is, hogy a források térségében (Fényes fürdő, Vár térsége és az Angolpark) a potenciál-emelkedések lecsengenek. Ugyancsak látszik, hogy egy erősen csapadékos év (ultrapesszimista változat) kismértékben megnöveli a beszivárgási területek vízszintjeit és ugyancsak kismértékben növeli a megcsapoló források depressziós tölcsérét is. Mindez arra utal, hogy egy-egy csapadékos év inkább a források hozamának erős emelkedésében, mint a térségi karsztvízszintek emelkedésében fog megmutatkozni. Egyszerűbben fogalmazva: rövidebb időszakon belül beszivárgó nagyobb csapadék a karsztos járatokon keresztül a források felé zúdul, majd ott hamar a felszínre lép és a hatása csak a beszivárgási területeken, illetve a források térségében fog érvényesülni. A hosszabb csapadékos időszakok (pl. egy dekád) ugyanakkor nagyobb térségekre vonatkozó vízszintemelkedéseket fognak generálni. Itt jegyezzük meg, hogy a bemutatott térképeken a vízszintemelkedések Ny-i és É-i peremeken történő lecsengését a peremfeltételek erősen befolyásolják, a változásoknak a bemutatottnál kisebb mértékű lecsengését valószínűsítjük.

A modellezéssel prognosztizált vízszinteket az ***54 - 57. ábrákon*** bemutattuk, míg a források hozamának változását az ***58. ábra-60. ábra*** sorozat mutatta be.

A forráshozamok alapján látszik, hogy pesszimista esetben a forráshozamok 20 700 m^3/d hozamról 30 700 m^3/d hozamra történő emelkedésével kell számolnunk, ami 48%-os emelkedés, ráadásul az emelkedés a Fényes fürdői- és a Tata belvárosi-forráscsoportot érinti elsősorban, tekintettel annak alacsonyabb fakadási szintjeire. A magasabban fakadó Kálvária-dombi forrásfakadások hozama csak kis mértékben, az angolparki források (Pokol- és Tükör-források hozama is csak kis mértékben emelkedik meg.

Az ultrapesszimista szcenárió esetén a források összhozama további 17%-kal emelkedik meg az utolsó egy évben a 2010. évinek megfelelő többletbeszivárgás hatására. Ebben az esetben a Fényesfürdői források hozama tovább emelkedik és a belvárosi forráscsoport hozama is, ugyanakkor már a kálvária-dombi források sőt a Tükör-forrás hozamának az emelkedése is valószínűsíthető.

Az ultrapesszimista szcenárió esetén tehát arányaiban a forráshozamok emelkedése egyre inkább a magasabb fakadási szintű források térségére helyeződik át.

4.5 A lokális modellterület vízmérlege

A lokális modellekre elvégzett számítások rámutattak arra, hogy a lokálkis modell vízmérlegét az alkalmazott peremfeltételek erősen meghatározzák. Ha abból indulunk ki, hogy a tatai regionális modellel vizsgált térség utánpótlódási területeinek jelentős része a modell peremén kívül eső területekre esik, amit jól mutat a ***37. ábra*** is, ahol látszik, hogy a modellezett terület 85-90 %-án alárendelt a beszivárgás és csak a maradék 10-15% -nyi területrészen jellemző a magas beszivárgás. Mindez azt is jelenti, hogy a modellezett eredményeket a peremi hozamok uralják.

Ennek ellenére érdemes néhány vízmérlegelem meghatározása, úgymint a beszivárgásból eredő hozam, a források által megcsapolt hozamok, a patakok és tavak megcsapoló hatása.

A vízmérlegből az látszik, hogy beszivárgásból eredő hozam csapadékos időszakban 32 000 m^3/d, átlagos időszakban 19 000 m^3/d, míg a patakok megcsapolása 7600 és 11 000 m^3/d, a tavaké pedig 5000, illetve 5800 m^3/d. A felszíni vizekbe tehát átlagos időszakban 12 600, csapadékos időszakban pedig 16 800 m^3/d hozam jut. Ehhez adódik hozzá a források hozama, amit egy részben vízellátási céllal hasznosíthatnak, más részben a felszíni vizeket táplálják. A források hozama 21 000 és 30 100 m^3/d a modell szerint.

Mindezek alapján a térség vízforgalmának deficitje egy átlagos időszakban 14 600 m^3/d, amikoris a beszivárgásból származó 19 000 m^3/d hozammal szemben összesen 33 600 m^3/d kilépő hozam jut, míg csapadékos időszakban ugyanez az érték -14 900 m^3/d, ami a 32 000 m^3/d beszivárgásból eredő hozam mellett 46 900 m^3/d számított kilépő hozamot feltételez.

A kapott adatok annyiban logikusak, hogy a vizsgált terület egyértelműen kiáramlási terület, így a vízmérlegének egyértelműen negatívnak, azaz deficitesnek kell lennie. Emellett meglepő, de érthető, hogy a deficit mértéke nagyban nem tér el csapadékos és átlagos időszakban, ugyanis ahogyan azt korábban is megállapítottuk, a magasabb beszivárgás gyorsan magasabb forráshozamokat okoz, ami miatt a vízmérleg deficitje csak kis mértékben módosulhat.

4.6 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 nyomásfelszíne magasabb, mint a terepfelszín (***65-66. ábra***). 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 lehatároltuk azokat a térrészeket, ahol a fedő vastagsága kisebb vagy egyenlő, mint 50 méter (***67. ábra***), 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 számítottuk a teljes fedőre számolt fajlagos védettség értékét.

Az egyik megközelítés szerint a fedővastagság értékét [m] elosztottuk a fedő alján jelentkező, bar-ba átszámolt nyomással. Ezzel tehát meghatároztuk a fedőrétegre számított átlagos reciprok vertikális hidraulikus gradiens értékét , azaz megadtuk azt a kvázi ideális fajlagos védettség értéket, amit akkor kapnánk, ha a teljes fedő agyagos képződmény lenne. Ennek 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.

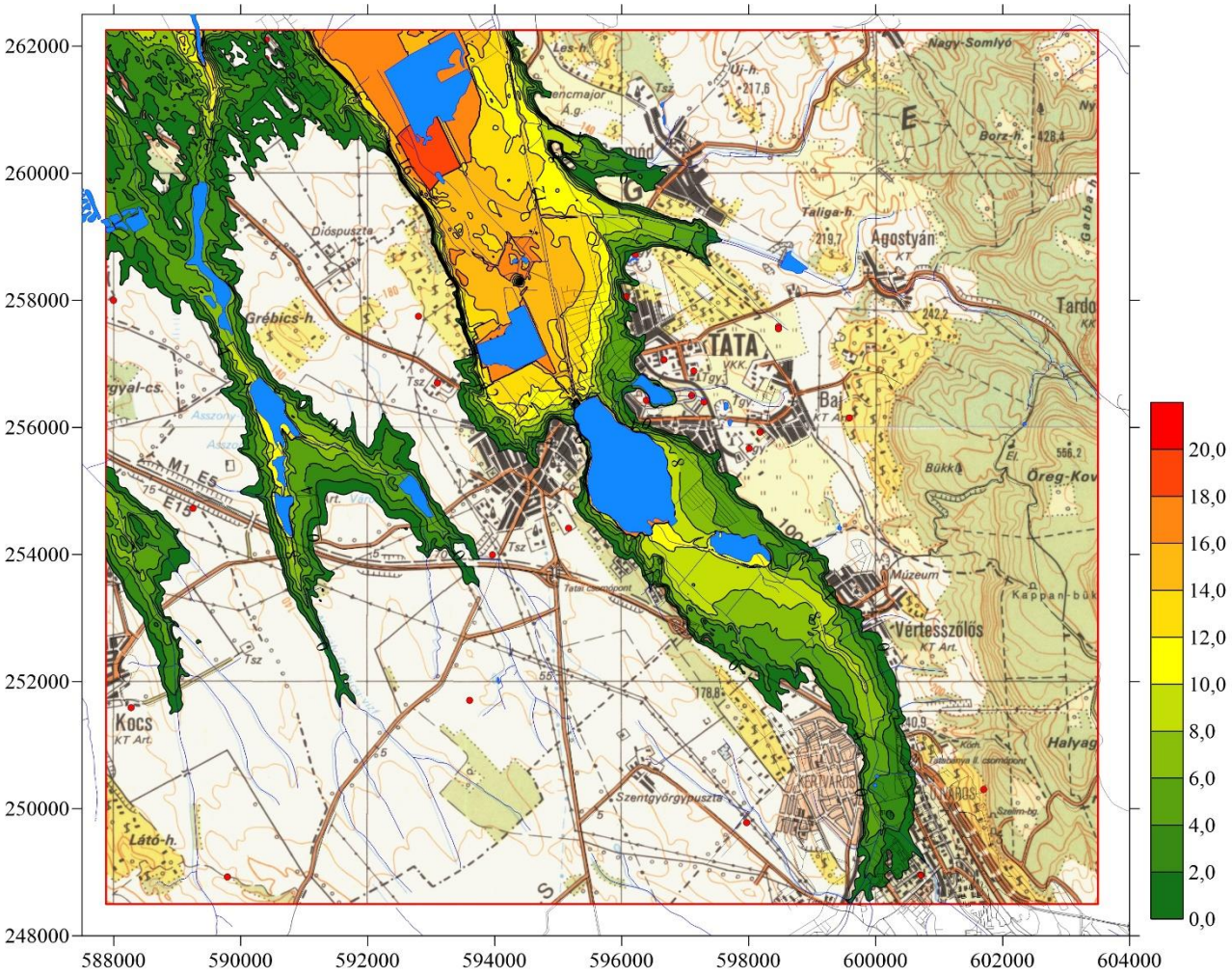
Tata városában a karsztvíz emelkedés okozta problémák miatt kiemelt jelentőséggel bír a veszélyeztetett területek lehatárolása. A probléma minél mélyebb megértése érdekében egy másik, a vertikális hidraulikus gradiens számításán alapuló, érzékenyebb veszélyeztetettségi megfontolás sorozat alapján is elkészítettük a térképeket.

Ezen másik megfontolás szerint, a vízoszlop-magasságban értelmezett potenciális terepszint feletti túlnyomást osztottuk a fedőréteg vastagságával. Ebben az esetben figyelembe vettük azt, hogy a számított karsztvízszintek hibája a legproblémásabb területeken kb. 0,5 m, illetve hogy a pesszimista verzió esetén a 2019. évi karsztvízszintekhez képest kb. 2,5 m vízszintemelkedés alakulhat ki, azaz a

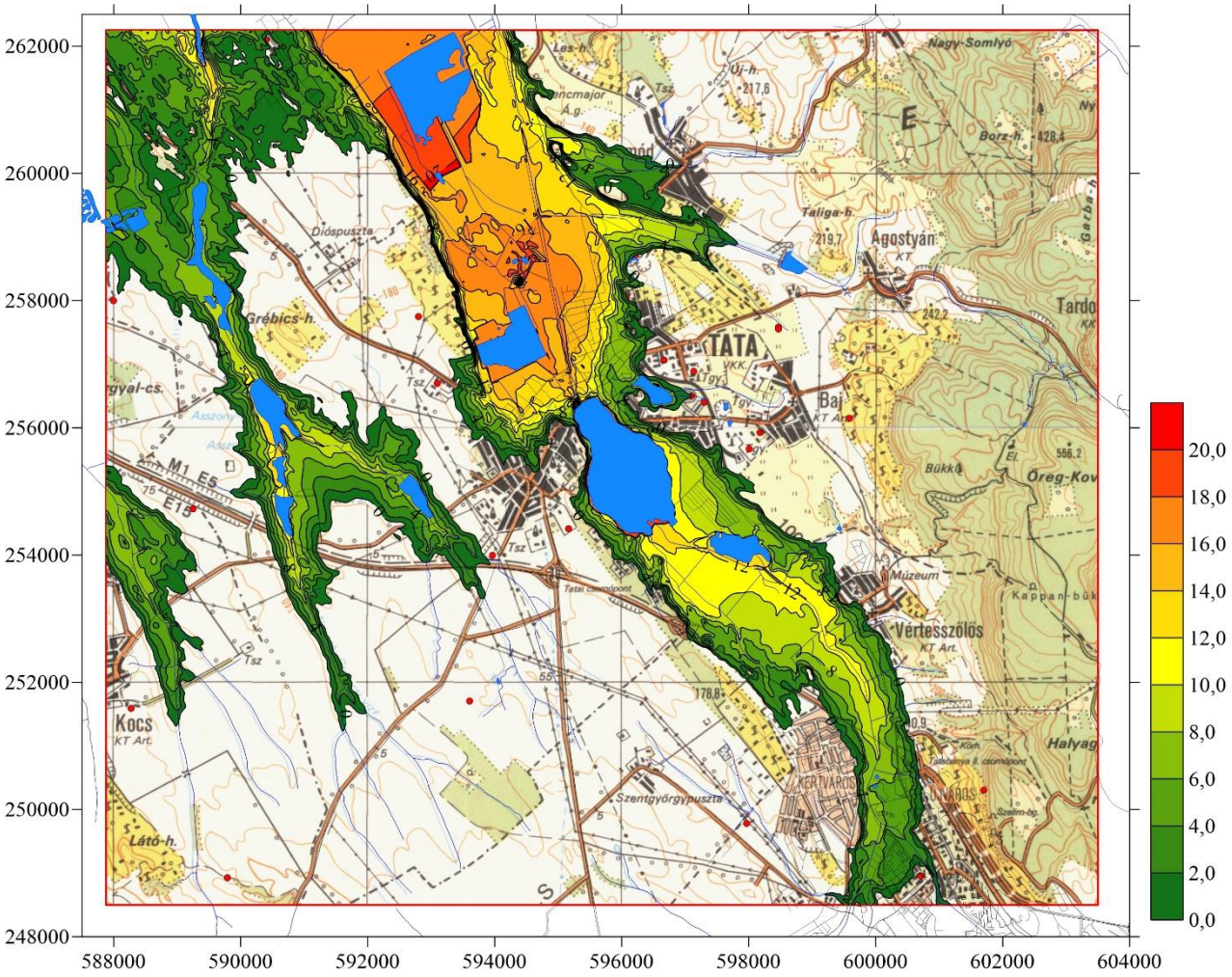
2019. évi számított karsztvízszintekhez képest 3 m-rel magasabb reprezentatív karsztvízszintekkel szükséges számolni. Ezzel a módszerrel kiszámoltuk az általunk veszélyeztetettségi indexnek nevezett értéket, amelyből következtethetünk a veszélyeztetettség mértékére. Ennek az eredménye a ***68***. ábra-***71. ábra*** látható, ahol a 0,02 m/m alatti területrész elvileg veszélyeztetett (a karsztvíz a felszín fölé jöhet), az e feletti térrész veszélyeztetettségének mértéke pedig arányos a vertikális hidraulikus gradiens nagyságával. Ez tekinthető egy veszélyeztetettségi alapállapotnak (***68***. ábra-***69. ábra***).

Ugyanakkor az is elképzelhető – tekintettel arra, hogy egy erősen beépített térrészről van szó –, hogy pl. építési céllal a fedőréteget megbontják, ami átlagos helyzetben a terepszint alatti 3 m-es zónát érinti. Ilyen módon a terepszint ideiglenes vagy végleges csökkentése miatt további 3 m korrekcióval érdemes számolni. Ebben az esetben egy nagyobb biztonságra történő számítás végezhető el, értelemszerűen nagyobbá válnak a veszélyeztetett területek is (***70***. ábra-***71. ábra***).

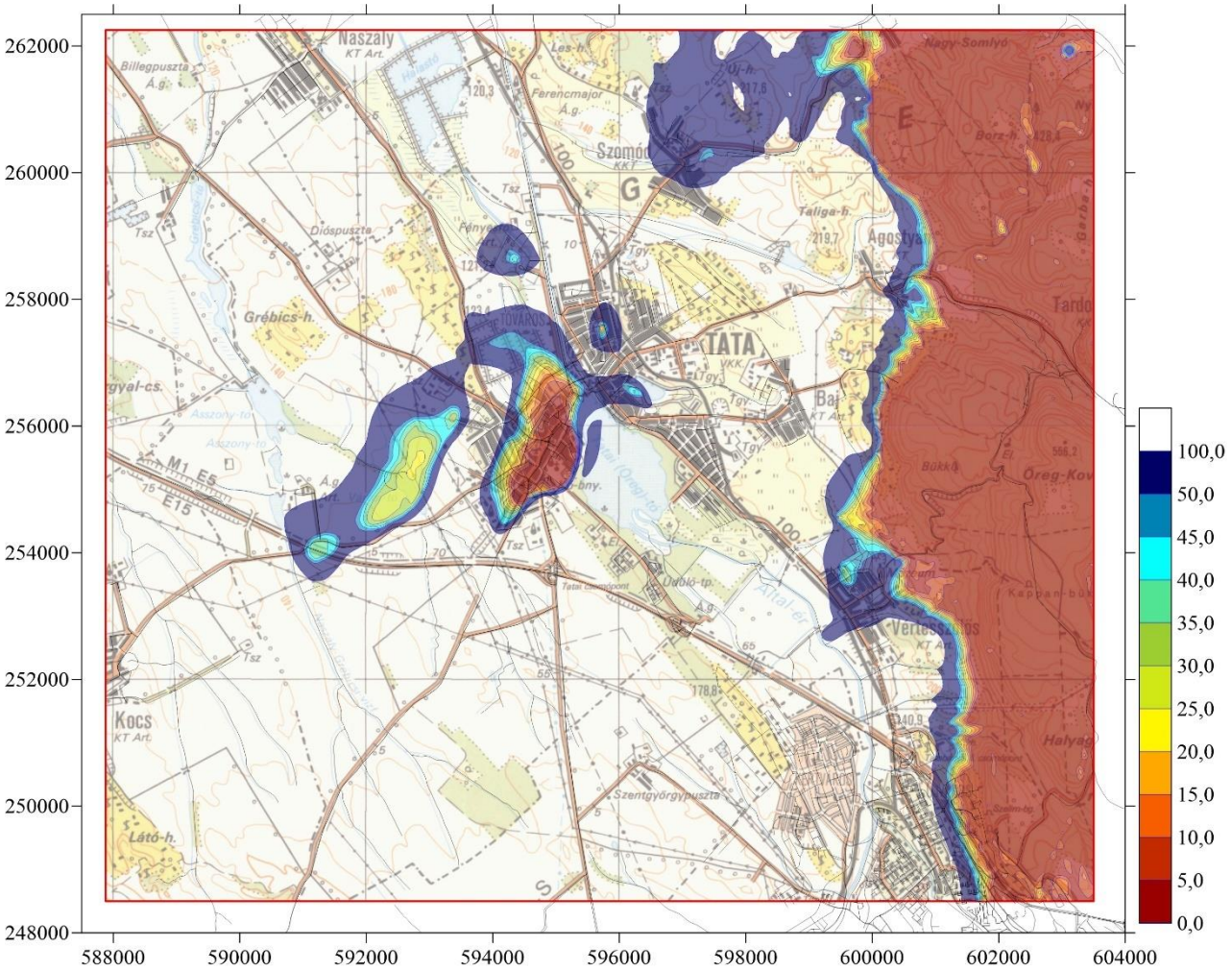
A ***70.*** és ***71. ábra*** jól látszik, hogy azok kirajzolják azon helyeket, ahol jelenleg is forrásfakadási helyek vannak, és ahol ennek alapján a jövőben vagy a potenciálok emelkedése miatt vagy a fedőréteg megbontása okán karsztvíz feltörésekre számolhatunk egy következő csapadékos dekád során.



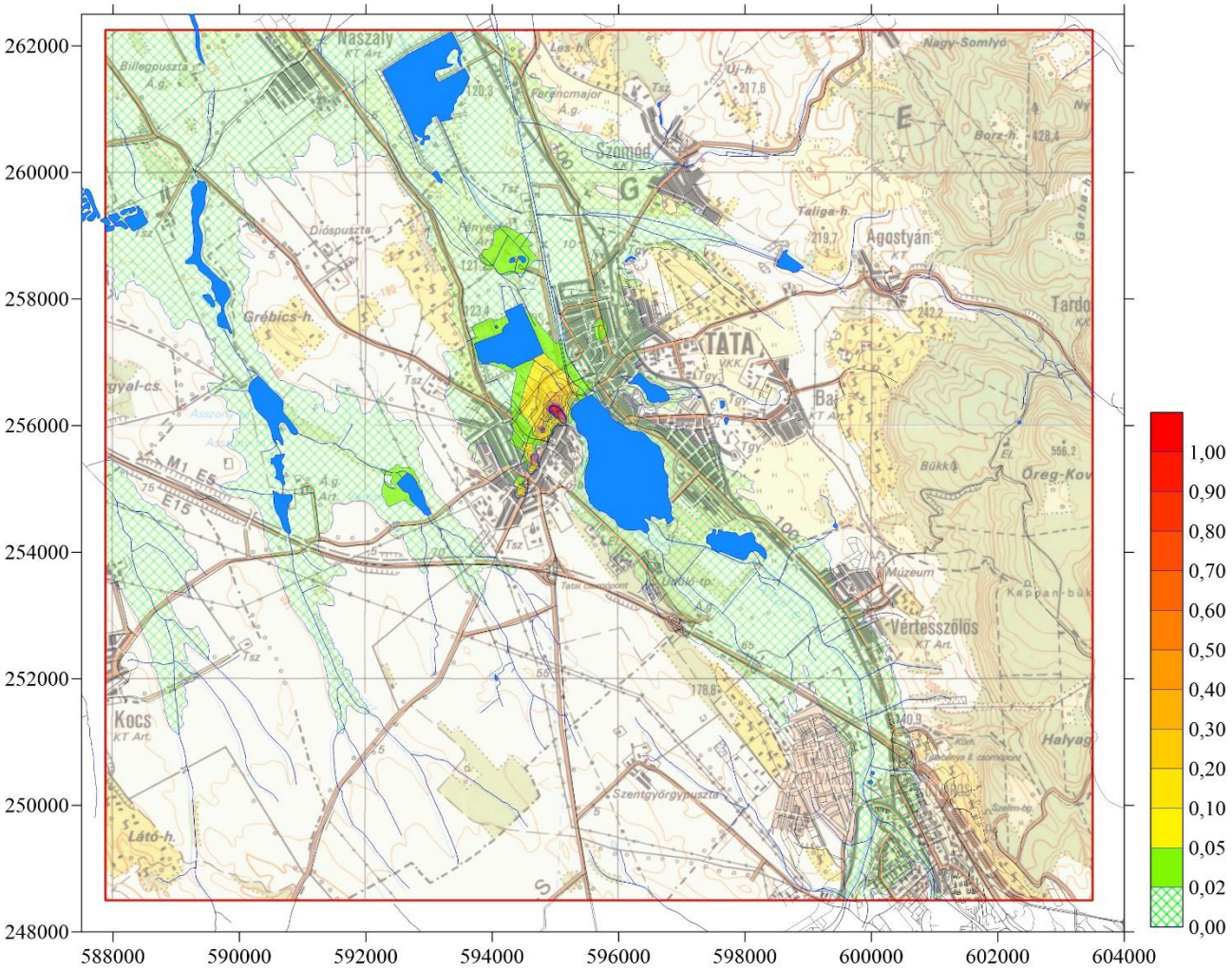
65. ábra: A karsztvízszintek terep feletti magassága [m] a 2019. évi számított karsztvízszintek esetében



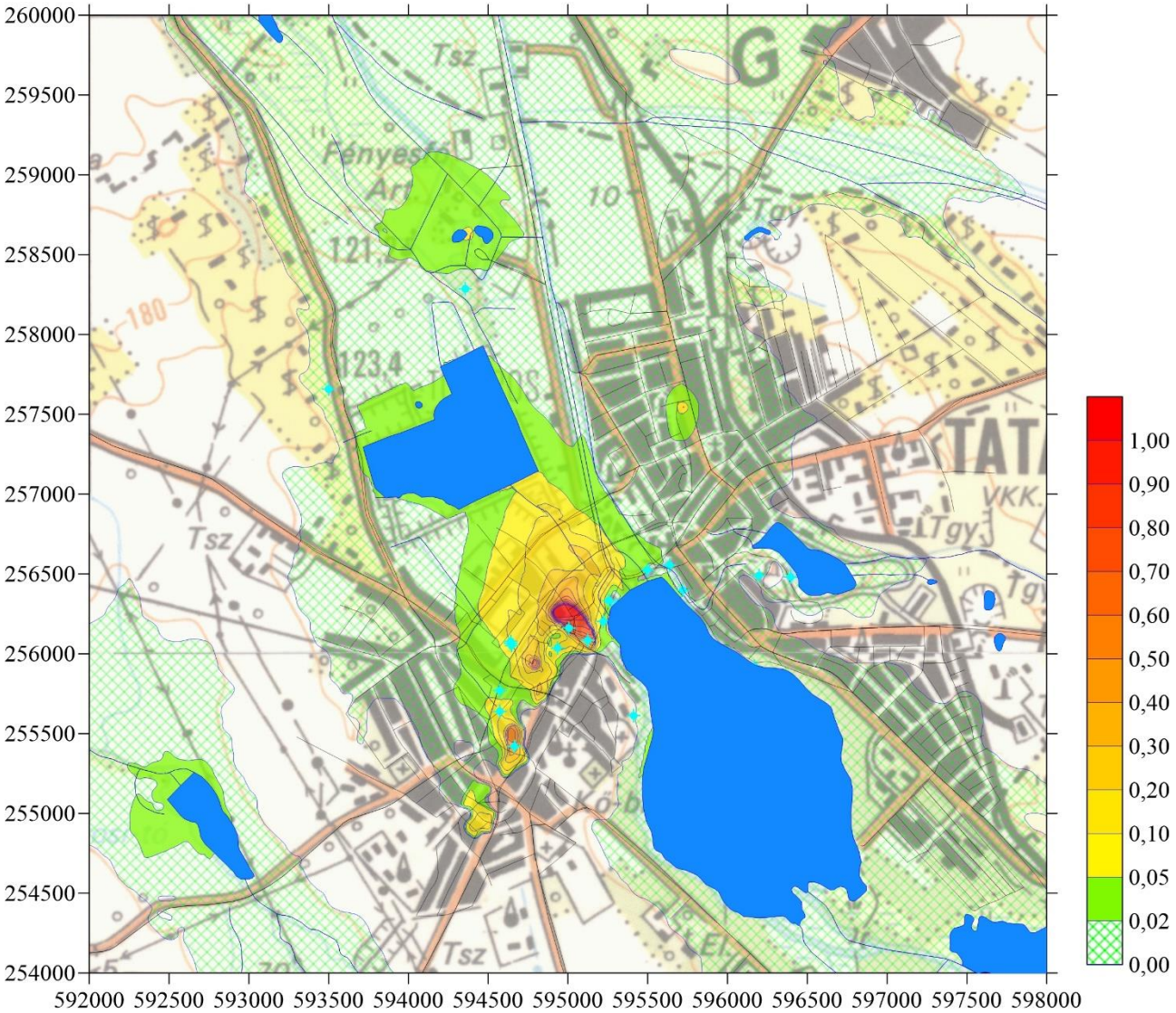
66. ábra: A karsztvízszintek terep feletti magassága [m] a 2030. évi prognosztizált karsztvízszintek esetében



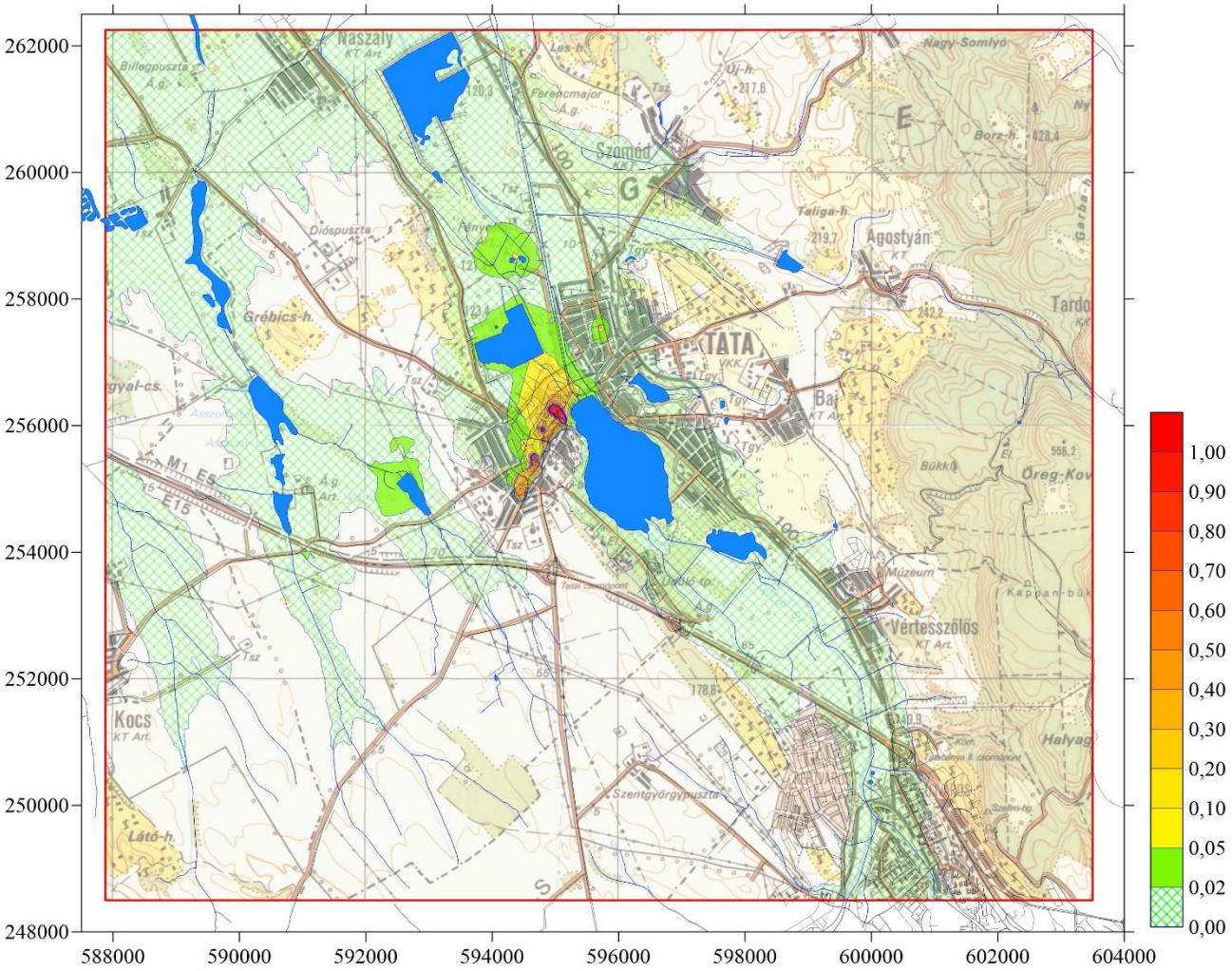
67. ábra: A karsztos képződmények terepszint alatti mélysége, amely megadja a fedő vastagságát [m]



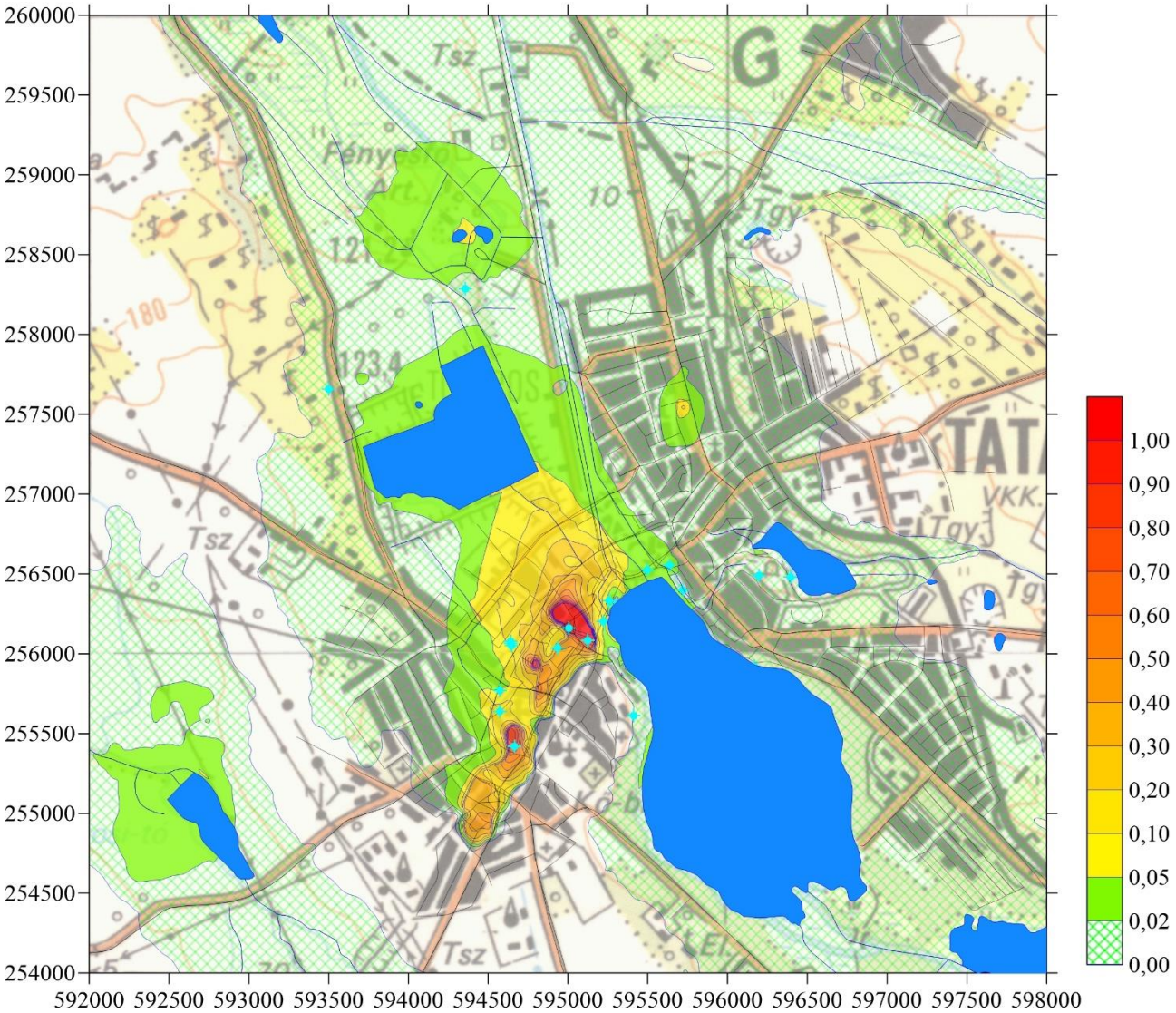
68. ábra: A vertikális hidraulikus gradiens elvén értelmezett veszélyeztetettségi index értéke átnézetes térképen



69. ábra: A vertikális hidraulikus gradiens elvén értelmezett veszélyeztetettségi index értéke a forrásfakadások környezetében



70. ábra: A vertikális hidraulikus gradiens elvén értelmezett veszélyeztetettségi index értéke átnézetes térképen max. 3 m mélységig végzett földmunka figyelembevételével



71. ábra: A vertikális hidraulikus gradiens elvén értelmezett veszélyeztetettségi index értéke a forrásfakadások környezetében max. 3 m mélységig végzett földmunka figyelembevételével

Ezen veszélyeztetettségi számítással le lehet határolni szintén azokat a területeket, ahol elvi lehetőség lehet a karsztvízszint terepszintre vagy beavatkozással módosított terepszintre jutásának, de a bar/m vagy a m/m érték alapján az eltérő veszélyeztetettségű zónák is kijelölhetőek.

A két módszer alapján lehatárolt veszélyeztetett térrészek jelentős részben átfednek egymással. A módszerek együttes alkalmazásával azonban nem csak azok a területek váltak kijelölhetővé, ahol a fedővastagság és a karsztvízszint alapján veszélyeztetett területek alakulnak ki, hanem azok a területek is, ahol a vizesedés megjelenése elsősorban műszaki beavatkozás következtében (3 méter mélységig végzett földmunka) jelentkezhet.

A veszélyeztetett területeket a ***4. térképmellékleten*** és M=1:10 000 méretarányban, digitális függelékekben is ábrázoltuk. A térképmellékleten az alábbi kategóriák kerültek feltüntetésre:

1. 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.

2. 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.
3. Veszélyeztetett területek, ahol a fedővastagság ≤ 50 m és a fajlagos védettség ≤ 2 m/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.
4. A fedő csökkentésére érzékeny terület: veszélyeztetett területek, ahol a vizesedéshez kötődő problémák elsősorban műszaki beavatkozás következtében jelentkezhetnek, a területen található fedő agyagi minőségének függvényében.

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 minden veszélyeztetett 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, prealbai rétegeket elérő fúrások feldolgozása megtörtént, a potenciálisan veszélyeztetett területeken egy esetleges műszaki beavatkozást megelőzően szükséges lehet a fedő anyagi minőségének további vizsgálata.

5.1. A karsztvíztároló fedőjének földtani értékelése a veszélyeztetett területeken

A földtani kiértékelést az MBFSZ fúrási adatbázis és a Geoszféra Kft. által átadott geotechnikai fúrások alapján végeztük el.

A Tatán található karsztvízszint emelkedés által veszélyeztetett terület jellemzően a város belterületén helyezkedik el, de a várostól Ny-ra a Városi-tó környezetében, valamint az M1 és Kocs felé tartó út találkozása környékén is találunk olyan területet, amelyet a lokális modellezés potenciálisan veszélyeztetettnek jelölt. Ez utóbbi területeken jellemzően a fedővastagság kisebb, mint 50 m.

A város belterületén a felszínen kvarter löszt és folyóvízi üledékeket, valamint mesterségesen feltöltött területeket találunk.

A legnagyobb kiterjedésű potenciálisan veszélyeztetett területrészen (Május 1. út menti terület) található Tt-16 fúrásban már 1,3 méterrel a felszín alatt megjelenik a jura Tűzkövesárki Mészkő Formáció, melyet csak vékony talaj és homok réteg fed. A Tt-8 fúrás szintén a Tűzkövesárki Mészkő Formáció képződményeit tárja fel, több mint 11 méter vastag fedőképződmény alatt, melyből a jellemzően finomszemcsés Száki Agyagmárga Formáció képződményei a legjelentősebbek (kb. 10 méter vastagságban). A 20,2 méter mély Tt-17 fúrás, amely a terület délebbi részén helyezkedik el, csak a fedő egy részét tárja fel: fél méter talajréteget követően kb. 3 méter deluviális agyag, kb. 10 méter Száki Agyagmárga, majd ez alatt a Kisbéri Kavics Formáció képződményei jelennek meg.

A terület É-i részén mélyült Tt-13 jelű fúrásban a fúrás talpától 45,5 m-es felszín alatti mélységig a jura Tűzkövesárki Mészkő található. Fedőjében a Csatkai Formáció, a Kisbéri Kavics és a Száki Agyagmárga rétegeivel.

A Tt-25 fúrásban a kb. 20 méter vastagságú változatos kvarter és neogén képződmények (agyag, homok, Száki Agyagmárga F., Kisbéri Kavics T.) alatt a kréta Vértessomlói Aleurolit Formáció jelenik meg több 10 méteres vastagságban. Ezen terület környezetében további fúrások is elérik a karsztvíztárolót, melyekben különböző vastagságban változatos összetételű, a területre jellemző fedőképződmények (kvarter üledékek, Száki Agyagmárga F., Kisbéri Kavics F., Csatkai F., Vértessomlói Aleurolit F.) jelennek meg.

A Május 1. út É-i oldalán található Tt-38 fúrásban a felszínhez viszonylag közel, már 14,3 méteres mélységben megjelenik a triász Dachsteini Mészkő Formáció. Valamivel délebbre, a Tt-7 fúrásban a karsztvíztároló Tatai Mészkő Formációba sorolható képződményeit tárták fel 60,5 méter mélységben. A potenciálisan veszélyeztetett terület D-i részén található fúrásokban (Tt-18, Tt-21) a felszíntől kicsit több, mint 10 méter mélységben a karsztvíztárolóhoz tartozó különböző jura korú Pisznicei Mészkő jelent meg.

A város belterületén a Cseke-tó környékén, a Vasút utca és az 1-es út közötti területeken, a Fényes-fürdő környékén is találunk potenciálisan veszélyeztetettnek jelölt területeket. A Cseke-tó környékén mélyült K-26 és K-41 fúrásban a Dachsteini Mészkő 40,5 méter és 40 m-es felszín alatti mélységben jelent meg, fedőjében vastag Csatkai Formációval és 8,0 méter vastag kvarter édesvízi mészkővel. A jelzett területtől D-re mélyült K-24 jelű fúrásban a késő-triász Dachsteini Mészkő felszíne már 70 m-es felszín alatti mélységben van, fölötte 20 m vastag jura, majd 12,1 méter vastag kréta üledéksor települt, fedőjében a miocén Csatkai Formációval és elég vastag (8,0 m-t is meghaladó) kvarter édesvízi mészkővel.

A Vasút utca és az 1-es számú út közötti területen mélyült a B-1 kataszteri számú kút, melynek fúrásakor a Dachsteini Mészkövet már 21,7 m-es mélységben elérték. A triász felett a Kisbéri Kavics és a Száki Agyagmárga rétegeivel.

A város É-i részén, a Fényes-fürdő környékén a potenciálisan veszélyeztetett területeken létesült a K-29 és K-34 kataszteri számú kút. A kutak rétegsorában a vékony felszíni negyedkori üledékek alatt a Száki Agyagmárga található a 43,8 illetve 29,4 m-es mélységben megjelenő késő-triász Dachsteini Mészkő fölött.

A Városi-tó környékén a lokális modellezés által potenciálisan veszélyeztetettnek jelzett területtől É-ra mélyült a Tt-39, D-re a Tt-47 jelű fúrás. A Tt-39 fúrásban a fúrás talpától (70,5 m) jura képződményeket találunk (Pisznicei Mészkő, Tűzkövesárki Mészkő, Kisgerecsei Márga, Lókúti Radiolarit, Pálihálási Mészkő) 52,4 m-es mélységig. A jura képződmények fedője a Tatai Mészkő, melyet 30,3 m-es mélységtől majdnem a felszínig Száki Agyagmárga fed le. A területtől D-re mélyült Tt-47 fúrásban azonban már 41,3 m-es felszín alatti mélységben a Dachsteini Mészkő képződményeit harántolták. Fedőjében vékony Csatkai fölött a Száki Agyagmárga jelenik meg vékony kvarter lösz alatt.

Az innen DNy-ra levő kisebb veszélyeztetettnek jelzett területen mélyült Tt-46 fúrásban a triász felszínét 51,3 m mélységben érték el. Fedőjében 16,4 m-ig Csatkai Formáció, felette a Száki Agyagmárga képződményei települtek.

4.7 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.

Tata környékén a lokális modellezés eredménye és a tényleges állapot jól egyezik. A lokális modellezés alapján veszélyeztetett a település egy része. A lokális modellezés megerősítette eddigi ismereteinket és terepi tapasztalatainkat, hogy a Május 1. út térségére, valamint a Fényes-fürdő környékére továbbra is kiemelt figyelmet kell fordítani.

A modellezett veszélyeztetett területek kiterjedése megfelel az elmúlt évtized tapasztalatainak, a lokális modellezéssel veszélyeztetettnek jelzett területek (ahogy azt várható volt) nagyobbak, mint a regionális modellezés által kijelölt területek. Azon területrészek és környezete jelentkezik veszélyeztetettnek, ahol a pontosított mészkőfelszín a terepszinthez közel esik, azáltal a fedő képződmények hidraulikai ellenállása nem elegendő a karsztvíz felszínre szivárgásának megakadályozására. Mivel a sasbércektől távolodva a fedőrétegek vastagsága hirtelen megnő, ezért ott a potenciál-emelkedésből eredő vizesedési problémák nem jelentkezhetnek.

A lokális modellezés során olyan területek is potenciálisan veszélyeztetettnek adódtak (Városi-tó térsége, Kocs felé vezető út mente) amelyeken a felszíni vizesedés és forrásfakadások szempontjából probléma nem jelentkezett. A térség egyelőre nem beépített, de ennek ellenére annak állapotára figyelemmel kell lenni.

Itt hívjuk fel a figyelmet arra, hogy a területen számos forrásfakadás vizének elvezetése a felszín alatt történik. Az elvezető rendszerek eltömődése vagy szándékos eltömedékelése újabb forrás fakadási pontok megjelenéséhez vezethetnek.

4.8 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.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

A projekt előző jelentései

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

Felhasznált irodalom

[12] Alföldi L.-Csepregi A.-Kapolyi L. (Alföldi L. és Kapolyi L. (szerk.)) 2007: Bányászati karsztvízszint-süllyesztés a Dunántúli-középhegységben, MTA Földrajztudományi Kutatóintézet

[13] Ballabás G. (2004): Visszatérő karsztforrásokkal kapcsolatos településfejlesztési és környezetvédelmi lehetőségek és veszélyek Tata város példáján. Geográfus Doktoranduszok VIII. Országos Konferenciája. Szeged. SZTE TTK Természeti és Geoinformatikai Tanszék. CD kiadvány, https://docplayer.hu/2985296-Visszatero-karsztforrasokkal-kapcsolatos-telepulesfejlesztesi-es-kornyezetvedelmi-lehetosegek-es-veszelyek-tata-varos-peldajan-ballabas-gabor-1.html és http://geogr.elte.hu/TGF/TGF_Cikkek/ballabas2.pdf

[14] Csepregi A. 2007: A karsztvíztermelés és hatása a Dunántúli-középhegység vízháztartására. In: Szerk: Kapolyi L. A bányászati karsztvízszint süllyesztés a Dunántúli-középhegységben pp.77-112.

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

[16] 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/

[17] Fogarasi S. 2001: Visszatérnek-e a tatai források? Magyar Földrajzi Konferencia tudományos közleményei (CD kiadvány) Szeged. pp: 14.

[18] Horusitzky, H. (1923): Tata és Tóváros hévforrásainak hidrogeológiája és közgazdasági jövője – A Magyar Királyi Földtani Intézet Évkönyve XXV. kötet 3. füzet, pp. 38-83.

[19] HYDROSYS Víz-és Környezetvédelmi Fejlesztő Szolgáltató Kft. 2013: A Dunántúli-középhegység főkarsztvíztárolójának 2013. évi állapotértékelése. Jelentés. KDTVIZIG adattár.

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

[21] Maller M. (2012): Tata, városközpont forrásainak hidrológiai vizsgálata, diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

[22] Maller M. (2018): A tatai Fényes-források összes vízhozamának meghatározása, Hidrológiai Közlöny, 2018 (98. évfolyam), 2018 / 4. szám pp. 17-23.

[23] Országos Vízügyi Főigazgatóság 2016: A Duna-vízgyűjtő magyarországi része — Vízgyűjtő-gazdálkodási Terv. – Kézirat, Országos Vízügyi Főigazgatóság, Budapest (www.vizeink.hu)

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

[25] Tóth, M. – Dorn, F. – Fürst, Á. – Dr. Lorberer, Á – Dr. Sárváry I. (1999.): A tatai források visszatérésével kapcsolatos vizsgálatok és cselekvési program, Tata (Hydrosys Kft., Monumentum Kft., Equilibrium Bt.)

Felhasznált jogszabályok

[26] 219/2004. (VII.21.) Korm. rendelet a felszín alatti vizek védelméről

[27] 221/2004. (VII.21.) Korm. rendelet a vízgyűjtő-gazdálkodási tervezésről

[28] 30/2004. (XII.30.) KvVM rendelet a felszín alatti vizek vizsgálatának egyes szabályairól

[29] 30/2004. (XII.30.) KvVM rendelet a felszín alatti vizek vizsgálatának egyes szabályairól

Felhasznált térképek

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

[31] 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

[32] Csíky G. – Erdélyi Á. – Jámbor Á. – Kárpátiné Radó D. – Kőrössy L. (1987): Magyarország pannóniai (s.l.) képződményei (Magyarország Földtani Atlasza) A dunántúli főcsoport (=felsőpannóniai képződmények) talpmélység térképe 1:500 000