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

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

CSÓR LOKÁLIS MODELL

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 – Csór lokális modell
Megrendelő	Országos Vízügyi Főigazgatóság 1012 Budapest, Márvány utca 1/D.
Vállalkozó	Smaragd GSH Kft. 1114 Budapest Villányi út 9.
Végrehajtás ideje	2019.01.11.-2021.06.30.

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

Gondárné Sőrj Katalin
……

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

Jóváhagyta:

Gondár Károly

……..
Gondár Károly Ügyvezető

TARTALOMJEGYZÉK

1. Feladat meghatározás 7
2. A lokális modellterület bemutatása 10
2.1 Elhelyezkedés 10
2.2 Hidrogeológiai viszonyok 12
2.2.1 Földtani felépítés 12
2.2.2 A kőzetek vízföldtani tulajdonságai 15
2.2.3 Természetes megcsapolódások 18
3. A lokális numerikus modellezés bemutatása 20
3.1 A numerikus modell geometriai felépítése, numerikus rétegek 20
3.2 A numerikus modell rácshálójának kialakítása 28
3.3 A numerikus modell hidraulikai paraméterezése 32
3.3.1 Szivárgási tényező értékek a numerikus modellben 32
3.3.2 Fajlagos tározás értékek a numerikus modellben 44
3.3.3 Beszivárgás a numerikus modell felszínén 49
3.3.4 A diszkrét elemek a numerikus modellben 51
3.4 Peremfeltételek a numerikus modellben 53
3.4.1 1. típusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel 53
3.4.2 3. típusú (Transfer)-Cauchy peremfeltétel 54
3.4.3 4. típusú (Well)-Kút peremfeltétel 55
3.5 A tranziens modellezés 57
3.5.1 A tranziens modellezés kezdeti feltételei 57
3.5.2 A tranziens modell időléptéke 58
3.5.3 A numerikus modell kalibrálása 58
4. A lokális modellezés eredményei 62
4.1 A 2019-es állapot 62
4.2 Prognózis 2030-ra 70
5. Veszélyeztetettség 75
5.1 A karsztvíztároló fedőjének földtani értékelése a veszélyeztetett területeken 76
5.2 A modellezett veszélyeztetett területek összevetése az állapotértékelés során tapasztaltakkal 77
5.3 Javaslatok 78
6. Felhasznált irodalom 79

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A lokális modellek területei a regionális modellen belül 8
2. ábra: A lokális modell területe topográfiai térképen 11
3. ábra: Fedett földtani térkép a lokális modell területén (Magyarország fedett földtani térképe 1:100 000 Magyar Állami Földtani Intézet 2005 [11]) 13
4. ábra: A lokális modellterület domborzata 17
5. ábra: A prealbai képződmények szerkesztett felszíne a lokális modellterületen 17
6. ábra: A csóri Csabafővíz forrás hozam idősora (1950-2019) 18
7. ábra: A csóri numerikus modellterület É-D-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás) 23
8. ábra: A csóri numerikus modellterület Ny-K-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás) 23
9. ábra: Példa a főkarszt kibúvás geometriai leképezésére egy numerikus modellben (5x túlmagasítás) (forrás: *Smaragd GSH 2020 [3]*) 24
10. ábra: Az 1. numerikus modellfelszín [mBf] 25
11. ábra: Az 1. numerikus modellréteg vastagsága 25
12. ábra: A 2. numerikus modellfelszín [mBf] 26
13. ábra: A 2. numerikus modellréteg vastagsága 26
14. ábra: A 3. numerikus modellfelszín [mBf] 27
15. ábra: A 3. numerikus modellréteg vastagsága 27
16. ábra: Az 5. numerikus modellfelszín [mBf] 28
17. ábra: A FEFLOW szoftverben alkalmazható elemek 29
18. ábra: Pont elemek 30
19. ábra: Egyszerűsített folyóhálózat 30
20. ábra: Egyszerűsített vetőhálózat 31
21. ábra: A numerikus modell rácshálójának Csór lokális modellterületre eső részlete 31
22. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 34
23. ábra: A 2. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 35
24. ábra: A 3. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 36
25. ábra: A 4. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 37
26. ábra: Az 5. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 38
27. ábra: A 6. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 39
28. ábra: A 7. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 40
29. ábra: A 8. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 41
30. ábra: A szivárgási tényező eloszlás É-D-i irányú szelvényen (2,5x túlmagasítás) 43
31. ábra: A numerikus modell Ny-K-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás) 43
32. ábra: K-tényező változása azonos rétegekben, Ny-K-i irányú szelvényen kinagyítva (2,5x túlmagasítás) 44
33. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 46
34. ábra: A 2. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 46
35. ábra: A 3. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 47
36. ábra: A 4. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 47
37. ábra: Az 5. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 48
38. ábra: A 6. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 48
39. ábra: A 2018-as év végére számolt beszivárgás a numerikus modellben 50
40. ábra: A különböző évekre számított beszivárgás értékek kapcsolása a tranziens modellben 51
41. ábra: A numerikus modellbe beépített vetők szivárgási tényező értékei az 5. rétegben 52
42. ábra: A numerikus modellben a források összekötése az 5. rétegig 1D elemmel Sötét szürkével az 5. réteg látható 53
43. ábra: A numerikus modellben szereplő 1.tipusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel 54

44. ábra: A numerikus modellben szereplő 3. típusú (Transfer)-Cauchy peremfeltétel peremfeltétel 55
45. ábra: A főkarsztot (5. réteg) megcsapoló termelőkutak a numerikus modellben 56
46. ábra: A főkarsztot (6. réteg) megcsapoló termelőkutak a numerikus modellben 56
47. ábra: A vízkivételek modellbeli leképezése Csór karasztakna példáján 57
48. ábra: A tranziens modell kezdeti (2000.01.01) vízszinteloszlása az 5. rétegben 58
49. ábra: A lokális modellterületen található monitoring kutak elhelyezkedése és a modellezett-mért vízszintek eltérése 2019. január 1-i állapotra 59
50. ábra: A numerikus modell számított karsztvízszint eloszlása 2019. január 01-i állapotra (mBf) 59
51. ábra: Az Isztimér-3 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió) 63
52. ábra: A Bakonykúti HgI-41 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió) 64
53. ábra: A Csór HgI-44 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió) 65
54. ábra: Az Iszkaszentgyörgy Kp-248 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió) 66
55. ábra: Az Iszkaszentgyörgy HgI-37 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió) 67
56. ábra: Az Iszkaszentgyörgy HgI-38 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió) 68
57. ábra: A Tés-1, Királyszállás monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió) 69
58. ábra: A sólyi meteorológiai állomás adatai alapján, HELP szoftverrel számított 10 éves átlagos beszivárgás mennyiségek (mm/év) 71
59. ábra: Mért és kétféle modellszcenárióval (pesszimista 1/2.) modellezett karsztvízszintek Bakonykúti HgI-41 kút példáján 72
60. ábra: A pesszimista szcenárió esetén figyelembe vett éves csapadékmennyiség és a beszivárgásmennyisége a sólyi meteorológiai állomáson mért adatok alapján 73
61. ábra: A pesszimista 2. szcenárió esetén figyelembe vett éves csapadék mennyiség és a beszivárgás mennyisége a sólyi meteorológiai állomáson mért adatok alapján 73
62. ábra: A lokális modellben a pesszimista 1. szcenárió alapján 2030-ra prognosztizált karsztvízszintek (mBf) 74
63. ábra: A lokális modellben a pesszimista 2. szcenárió alapján 2030-ra prognosztizált karsztvízszintek (mBf) 74

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat: A Csór lokális modell sarokpontjainak koordinátái 10
2. táblázat: A csóri modellterület fontosabb karsztforrásainak kiindulási, mért minimum és jelenlegi hozamadatai 19
3. táblázat: A numerikus modellfelszínek szerkesztéséhez felhasznált elvi rétegbeosztás a feldolgozott fúrások alapján a különböző földtani helyzetek esetén 22
4. táblázat: Az egyes képződmények K-tényező értéke a numerikus modellben 42
5. táblázat: Az egyes képződmények vertikális elterjedése a numerikus modellben 44
6. táblázat: A szerkezeti elemek hidraulikai paraméterei 52
7. táblázat: A mért és modellezett vízszintek a megfigyelőkutakban a kalibráció időpontjában 60
8. táblázat: A regionális modellezés során használt szcenáriók 71

TÉRKÉPMELLÉKLETEK

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

DIGITÁLIS FÜGGELÉK

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

1. FELADAT MEGHATÁROZÁS

A Dunántúli-középhegységi főkarsztvíztároló a bányászati célú karsztvízszint süllyesztés időszaka után (1960-1989) az 1990-es évek eleje óta regenerálódott, a karsztvízszint és a forráshozamok folyamatosan emelkedtek. A 2. Vízgyűjtő-gazdálkodási terv elkészítése során, a Dunántúli-középhegység állapot értékelése megállapította, hogy a visszatöltődés 2015 végére már közel 90%-ban lezajlott, a forráshozamokban azonban még emelkedés várható (*Hydrosys Kft. – Smaragd GSH Kft. 2015*)[7].

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-

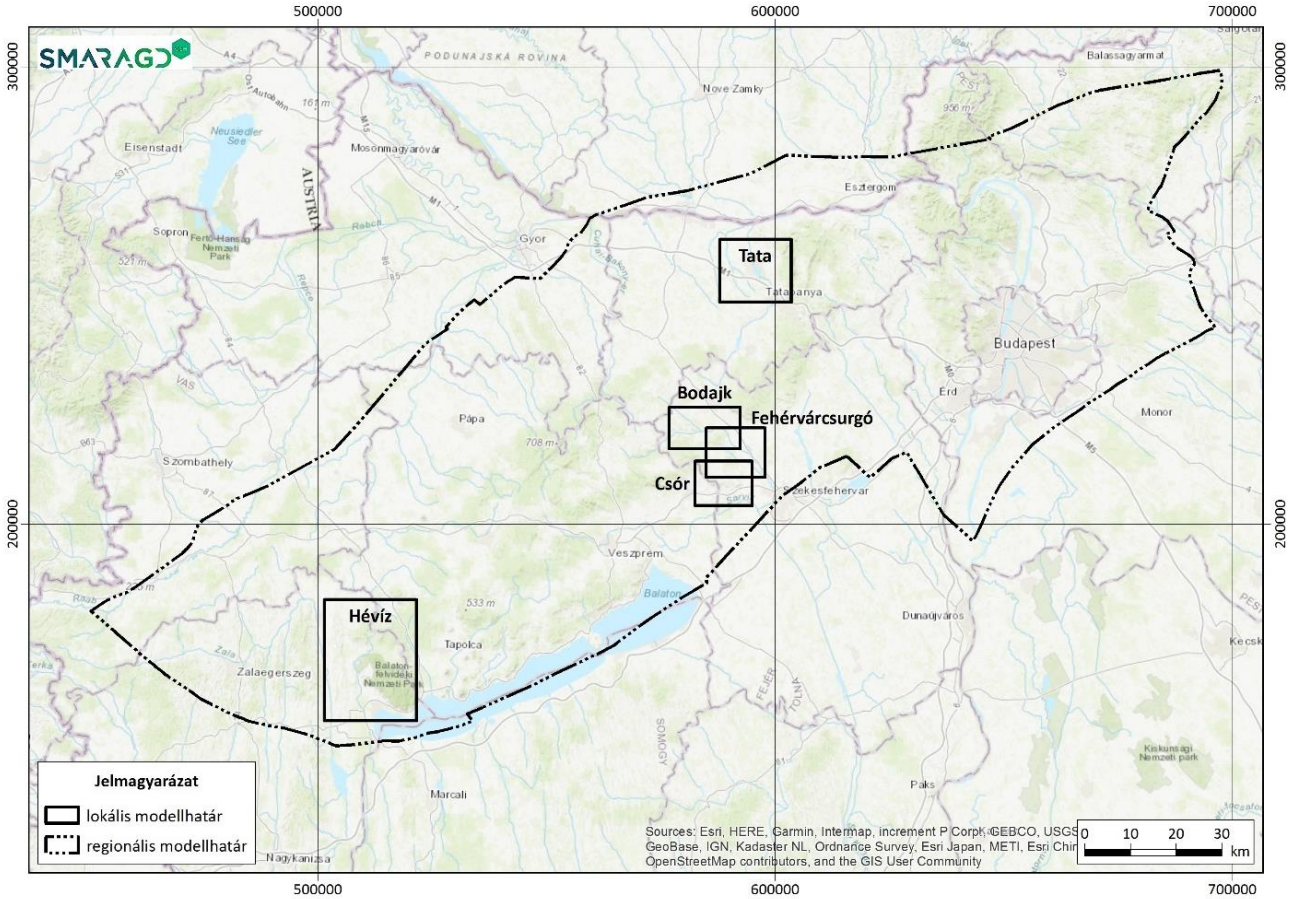
00010. Vízháztartási modellezés és állapotértékelés – III. kötet. *A karsztvíztároló állapotának összefoglaló értékelése*. Jelentés.

[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-vel 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 Csór lokális modellezés eredményeit foglalja össze. A jelentés szervesen épül az előzőekben felsorolt, már eddig elkészült jelentésekre.

2. A LOKÁLIS MODELLTERÜLET BEMUTATÁSA

2.1 Elhelyezkedés

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

A Csór lokális modellterület határát a regionális modell alapján, a csóri vízakna, mint jelentős vízkivételi központ környezetében határoztuk meg. A lokális modell a k.1.1 Veszprém-Várpalota, Vértes D-i források vízgyűjtője karsztvíztestet érinti, déli része kis területen átlóg a k.4.2 karsztvíztestre is.

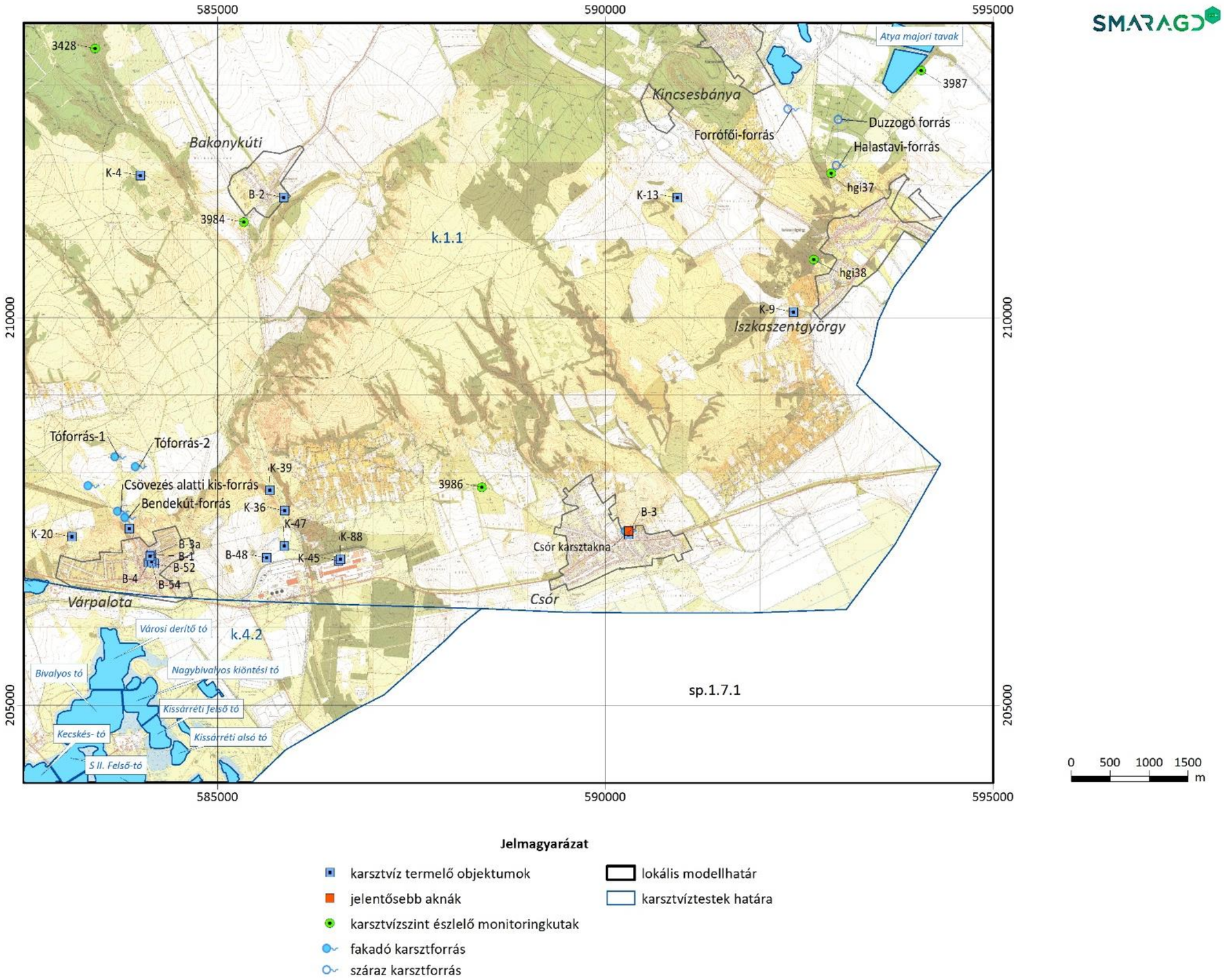
Földrajzilag a lokális modell a Keleti-Bakony peremi részén található, a modellterület délkeleti részén a mocsaras környezettel jellemezhető Sárrét is megjelenik (***2. ábra***).

Határoló koordinátát az ***1. táblázat*** mutatja, területe 122,5 km^2.

1. táblázat: A Csór lokális modell sarokpontjainak koordinátái

EOV X_{min}	204000
EOV X_{max}	213800
EOV Y_{min}	582500
EOV Y_{max}	595000

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



2. ábra: A lokális modell területe topográfiai térképen

2.2 Hidrogeológiai viszonyok

2.2.1 Földtani felépítés

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

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

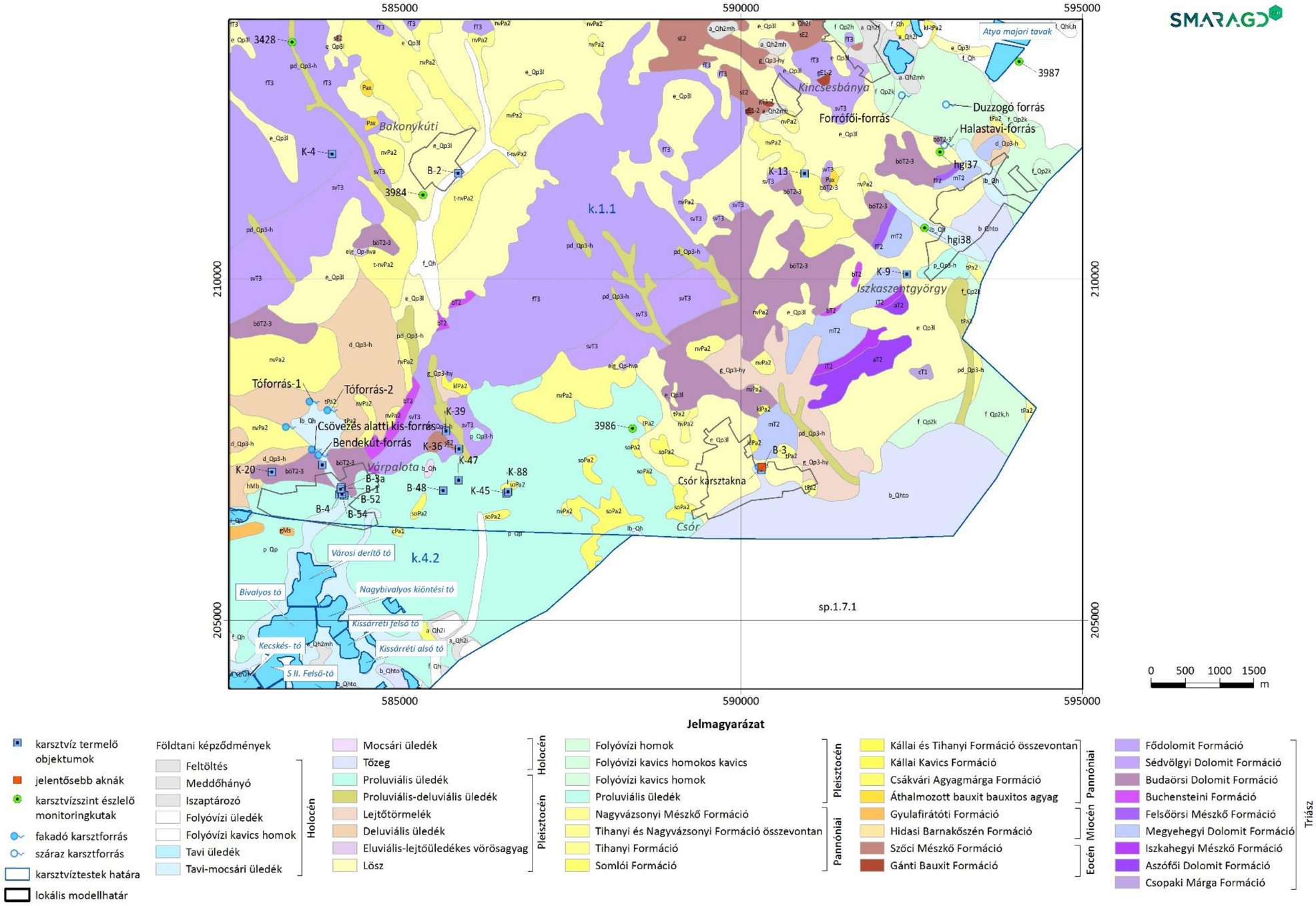
A csóri modellterületen a prealbai aljzat legidősebb képződménye a variszkuszi orogén ciklus idején képződött kovapala és homokkő betelepüléseket tartalmazó alacsony fokú metamorfózison átesett aleuritos agyagpala (Lovasi Agyagpala), amelyet a modellterület DK-i területein találjuk meg Csórtól illetve Iszkaszentgyörgytől DK-re.

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

A permi vörös homokkőre már alsó-triász karbonátos üledéksor települ eróziós diszkordanciával. A triász elején bekövetkezett tengerszint emelkedés eredményeként létrejött sekély selfen rakódott le a Claraia kagylófaunát tartalmazó Arácsi Márga, majd a klíma szárazabbá válásával a törmelékes karbonátos, evaporitos, ősmaradvány mentes dolomit (Hidegkúti Formáció) a kora-triászban. A kora-triász legvégén bekövetkező transzgresszió eredményeként már nyílttengeri üledékképződés eredményeként rakódott le a Csopaki Márga.

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

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



3. ábra: Fedett földtani térkép a lokális modell területén
(Magyarország fedett földtani térképe 1:100 000 Magyar Állami Földtani Intézet 2005 [11])

Az üledékbehordás eredményeként a karni korszak végére jórészt feltöltődtek a mélyebb medencék és az így kialakult sekélytengeri platformon kezdődött meg a nagy vastagságú Fődolomit képződése.

Ebből a DNy-ÉK-i irányú több 10 km-nél is szélesebb triász üledéksorozatból áll a prealbai felszín a modellterület jelentős részén. Ugyanakkor Kincsesbánya-Iszkaszentgyörgy vonaltól ÉK-re már a kora-triász képződmények is csak nehezen különíthetők el, a középső-triász és a késő-triász eleji karbonátos képződmények pedig szinte egyáltalán nem. Ezeket a nehezen elkülöníthető középső-, késő-triász karbonátos képződményeket a Vértesi Formációcsoportba szokás sorolni. Ilyen képződményeket találunk Iszkaszentgyörgy-Kincsesbánya vonaltól ÉK-re Magyaralmás térségében, valamint egy 2,5 km-es ÉK-DNy-i sávban Bakonykúti környékén.

A Dunántúli-középhegységi egység területén az ausztriai tektonikai fázis hatására ÉK-DNy irányú tengelyű szinklináris szerkezet alakult ki. A korábbi nagy kiterjedésű triász platformok feltöredeztek, egymáshoz képest eltérő szintekbe kerültek. A krétában lezajló kompressziós tektonikai hatásokra a terület sokáig szárazulattá vált.

A prealbai képződmények a modellterület jelentős részén, a felszínen is (vagy csak nagyon vékony kvarter fedő alatt) megtalálhatók (Bakonykútitól Ny-ra, valamint Csórtól É-ra). Csór környékén a prealbai aljzat egy Csórtól D-re húzódó vetőzóna mentén oldalirányban mintegy 2,5 km-nyit elmozdult.

A kréta utáni szerkezeti mozgások eredményeként szárazulattá vált a Dunántúli-középhegységi egység, egészen a kora-eocénig. Ebben az időben rakódott le a triász törésekkel szabdalt karsztos térszínére a Gánti Bauxit. A kora-eocén végén meginduló újabb mozgások során megindult DNy felől a transzgresszió. A vetőkkel szabdalt, töredezett térszín tagoltsága miatt a középső-eocén során még ezen a viszonylag kis modellterületen is nagyon eltérő üledékképződési körülmények alakulhattak ki. A medencék területén a jelentős terrigén törmeléket tartalmazó márgás, biogén törmelékes rétegek rakódtak le. A tenger további mélyülését jelzik a foraminiferás márgák (Csolnoki Márga, Padragi Márga). Velük egyidőben a partokhoz közeli sekély tengerekben rakódott le a biogén Szőci Mészkő, amely a modellterületen Gúttamási és Kincsesbánya között a felszínen is megtalálható.

Az eocént követő infraoligocén denudáció eredményeként az eocén képződmények a teljes Dunántúli-középhegységi egység területén nagymértékben lepusztultak.

Az oligocénben megkezdődött szárazföldi üledékképződés még a miocén elején is zajlott. A kora-miocén közepén, nagy területeken rakódott le a jelentős vastagságban a Gyulakeszi Riolittufa, amely Inota térségében nagy területeken fordul elő. A kárpáti korszakban a tengerszint emelkedésének eredményeként finomabb szemű törmelékes üledékképződés zajlott (Garábi Slír Csór környékén), majd ezt követően durvább szemű pectenes, ostreás, bryozoás, balanuszos Bántapusztai Formáció keletkezett, amely a modellterület DNy-i részén (Inota és Csór környéke) fordul elő.

A bádeni korszak közepén tengeröblökben kialakult parti mocsarakban jött létre a Hidasi Kőszén (Csór környékén idősebb bádeni képződményekre települve találjuk). A késő-miocén elején jött létre a Kárpátokkal körbevett Pannon-beltó. A késő-miocén során ez a beltó fokozatosan feltöltődött, kiédesedett. Sekélytengeri környezetben a késő-miocén elején keletkezett a Csákvári Agyagmárga és a Csóri Aleurit (Csórtól D-re). A középhegység jelentős része továbbra is szárazulat volt, így a szárazulat partvonala mentén változatos üledékképződési környezetek alakultak ki. Így jött létre az elzárt lagúnákban a Nagyvázsonyi Mészkő (Bakonykúti, Isztimér, Gúttamási környékén) nagy területeken, a hullámveréses zónában a partszegélyi homok (Kállai Kavics). Ezt a homokot bányásszák Kincsesbánya térségében. A késő-miocén során a folyók deltafrontján a homokos kifejlődésű Somlói Tagozat, a part menti lagúnákban pedig az aleuritos Tihanyi Tagozat képződményei rakódtak le nagy területeken (a modellterület D-i és K-i részén Inota, Csór, Iszkaszentgyörgy térségében).

A felszínt nagy területen borítják kvarter képződmények. Közülük a lösz, Inota-Csórtól D-re a tavi-mocsári képződmények, illetve a kiemelt helyzetű területek peremeit szegélyezve különféle áthalmozott üledékek a legfontosabbak. Folyóvízi üledékeket a modellterület K-i részén találunk.

A Csóri karsztakna szűkebb környezetében már a felszínre emelkednek (É felé) az alsó-, középső- és felső-triász karbonátos sorozat tagjai (Csopaki Márga, Aszófői Dolomit, Iszkahegyi Mészkő, Megyehegyi Dolomit, a Buchensteini Formáció, a Budaörsi Dolomit, a Sédvölgyi Dolomit és a Fődolomit).

Az aljzat felett uralkodóan késő-miocén képződményeket találunk, de Csórtól Ny-ra (ahol az aljzat felszíne mélyebb helyzetű) megjelennek a középső-eocén Dorogi Formáció tarka agyagos, mészmárgás, szenes, valamint a Szőci Mészkő Kincsesi Tagozatának homokos, mészmárgás üledékei. A miocén képződmények Csór környékén gyakran közvetlenül a triász fölött jelennek meg, általában finomabb szemű formában (Ősi Tarkaagyag, Csákvári Agyagmárga, Csóri Aleurit), vastagságuk elérheti a 60-70 m-t. Csórtól É-ra a felszíni triász képződményeket D-ről kísérik az elzárt lagúnákban a partok közelében képződött Nagyvázsonyi Formáció mésziszapos, mészmárgás mészkőrétegei. A késő-miocén során a folyók deltafrontján a homokos kifejlődésű Somlói Tagozat, a part menti lagúnákban pedig az aleuritos Tihanyi Tagozat képződményei rakódtak le. Előbbi Csórtól Ny-ra és D-re, utóbbi a K-i oldalon.

A késő-miocén képződményeket többnyire kvarter képződmények borítják. Csórtól ÉNy-ra lösz, K és Ny felé proluviális üledék, illetve lejtőtörmelék fedi, míg D-i irányban jelentős kiterjedésben tavi-mocsári üledékek jelennek meg a felszínen.

2.2.2 A kőzetek vízföldtani tulajdonságai

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

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

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

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

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

Prealbai képződmények (főkarsztvíztároló):

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

Függőkarsztos rétegek hidrosztratigráfiai egység:

A kréta, illetve eocén korú mészkövek, ha közvetlenül települnek, a triász korú karbonátokra szintén a főkarsztot alkotják, ha a triász karbonátoktól márga és agyag rétegek különítik el, akkor a főkarszttól független, függőkarszt alakul ki. Regionális elterjedésűek. A csóri modell esetén az eocén képződmények jellemzően a terület északi határán találhatók meg, de néhány fúrásban a terület délebbi részén (Várpalota és Csór között) is írtak le eocén képződményt. Karbonátok közül a Szőci Mészkő jelenik meg, de többségében agyagos-márgás kifejlődésű képződmények találhatók meg (pl.: Dorogi Formáció, Gánti Bauxit Formáció), melyek kifejezetten rossz vízvezetőnek tekinthetők.

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

A főkarsztvíztároló fedőjének nagyvastagságú és elterjedésű képződményei tartoznak ebbe a csoportba. A modell területén ezek elsősorban, nagy vastagságú miocén finomszemcsés képződmények (Ősi Tarkaagyag, Csákvári Agyagmárga, Gyulafirátóti Formáció) formájában jelennek meg, melyek rossz vízvezető képességgel bírnak. Ezek a képződmények nagy kiterjedésben és vastagságban fordulnak elő a modellterület déli részén. Továbbá északon Kincsesbányától keletre jelennek meg.

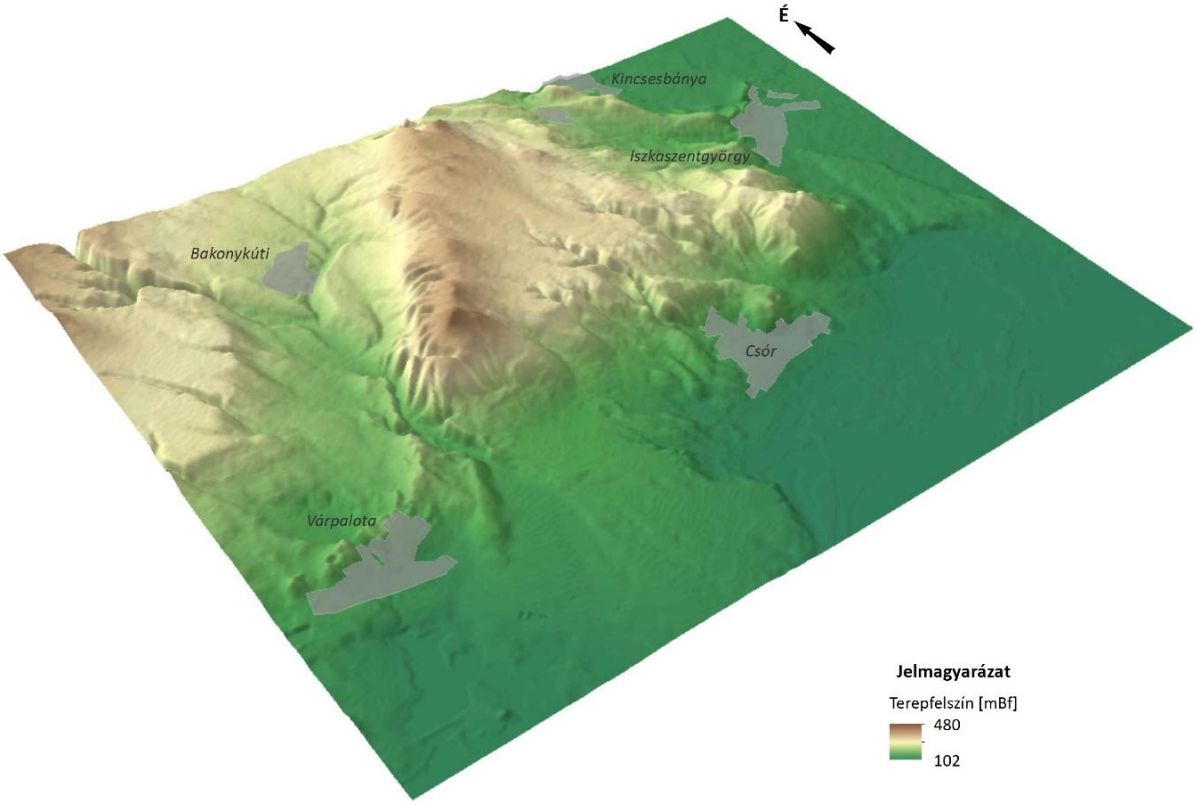
Kvarter – Felső-pannon porózus képződmények hidrosztratigráfiai egysége:

A főkarsztvíztároló fedőjének képződményei tartoznak ide. A csóri modellterületen ez a nyílt karszt körül jellemzően áthalmozott porózus képződményeket takar. Ezek lehetnek jó vízadó tulajdonsággal rendelkező homok és lösz, vagy finomabb szemcseméretű agyagos/aleuritos képződmények, melyek vízvezető képessége rosszabb. Ebbe a képződménycsoportba tartozik még továbbá a pannon Nagyvázsonyi Mészkő, mely viszonylag jó vízadó képződménynek tekinthető.

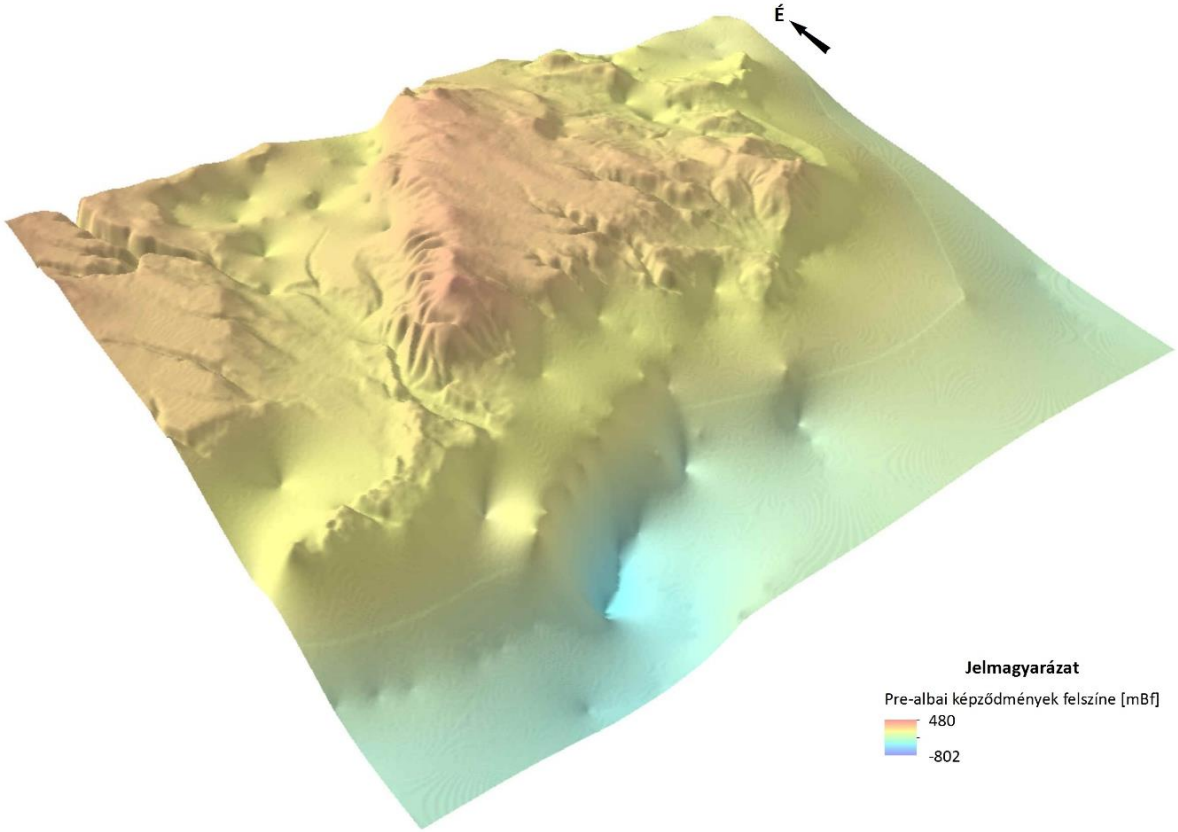
A lokális modellterületeken szükségessé vált ezen hidrosztratigráfiai egységek elterjedésének és vastagsági viszonyainak pontosítása, valamint a porózus fedőképződmények elterjedésének és kőzetminőségének sokkal részletesebb kidolgozása is. Ez a munkafolyamat a lokális modellterületeken található összes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

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

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



4. ábra: A lokális modellterület domborzata



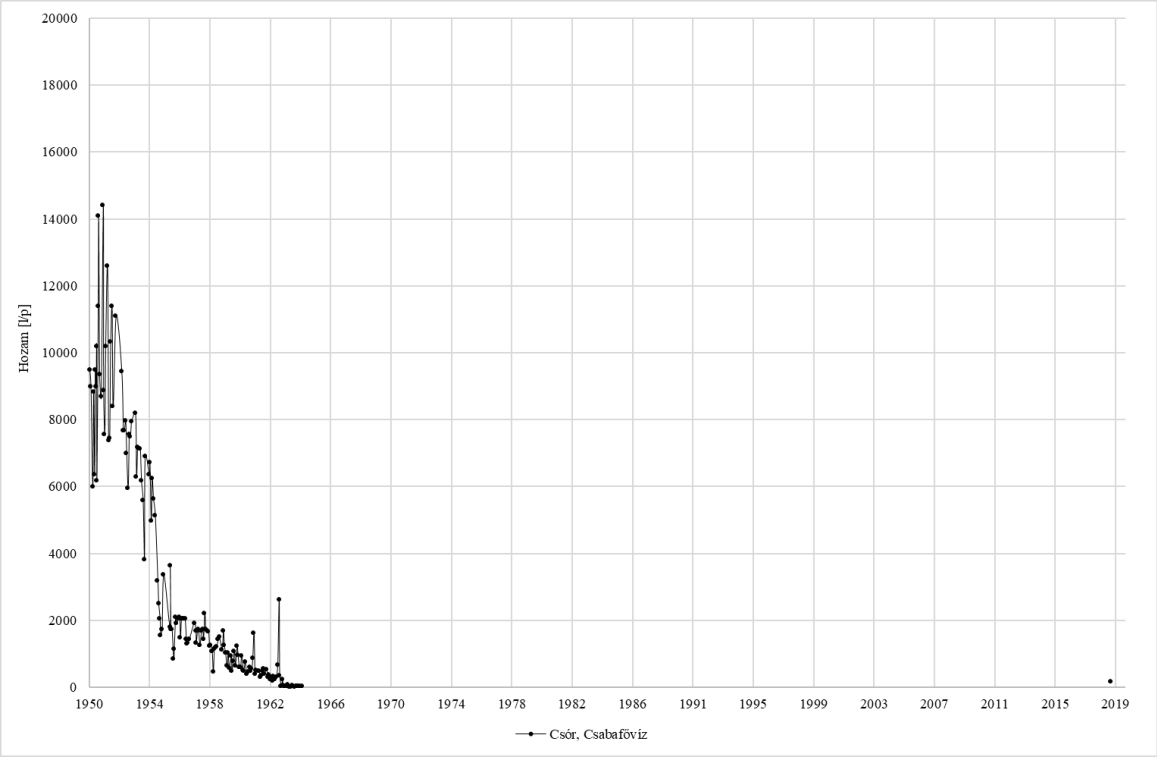
5. ábra: A prealbai képződmények szerkesztett felszíne a lokális modellterületen

2.2.3 Természetes megcsapolódások

A modellterületen belül jelenleg is fakadó források Csór és Inota környezetében találhatók meg.

A Várpalota környéki forrásokról csak kevés, 50-es 60-as évekbeli vízhozam adattal rendelkezünk, így a források állapotának változásáról nincs elegendő információ. Irodalmi adatok alapján a Várpalotai szénbányák víztelenítése miatt az Inota községi-források elapadtak 1967-ben. A bánya bezárásával együtt a vízemelés megszűnt, ezek a források már 1991-ben jelentős hozammal újra megszólaltak. Az inotai források közül legjelentősebb a Tóforrás, mely Inotától északra, a „Tóföldi dűlő" lejtőjén ered két helyről, egymástól hozzávetőlegesen 300 méteres távolságra. A források fakadásuktól körülbelül 400 méterre összefolynak. Faller J. 1937-es mérései szerint [8] az akkori hozamuk 8200 l/p volt. 2014-ben a két Tóforrásnál összesen 4000 l/p, míg a 2019-es kataszterezés során 3004 l/p hozamot mértünk. Inotán a Dózsa György utca környékén is található két fakadó karsztforrás, melyek azonban jellemzően kis, csekély (27 l/perc) hozamú források.

Csór jelentősebb forrása a Csabafővíz (Csóri víz) forrás, jelenlegi, 2019-es hozama 175 l/p. Hozama az 1950-es évek elején még gyakran meghaladta a 10 000 l/p-t is, majd folyamatos csökkenést követően, 1965-ben elapadt ***(6. ábra)***.



6. ábra: A csóri Csabafővíz forrás hozam idősora (1950-2019)

A bányászati vízkivételt megelőzően jelentő forrás volt az Iszkaszentgyörgynél található *Duzzogó*-forrás, mely 1957-ben elapadt. A forrásra aknakút épült, vízszintje jelenleg több, mint 8 méterrel a terepszint alatt van.

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

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

Település	Forrás	VITUKI forráskataszter szerinti vízhozam		Legkisebb hozam		2019 kataszterezés során mért hozam	
		Év	Hozam (l/p)	Év	Hozam (l/p)	Év	Hozam (l/p)
Csór	Csabafővíz-forrás	1950	9480	1965	0	2019	175
Iszkaszentgyörgy	Duzzogó-forrás	1950	1400	1957	0	2019	0
Iszkaszentgyörgy	Forrófői-forrás	1950	600	1957	0	2019	0
Iszkaszentgyörgy	Halastavi-forrás	1953	50	1957	0	2019	0
Várpalota	Inota (Tó-forrás I-II)	1953	4458	1967	0	2019	3004

A modellterület déli részén, a 8-as főúttól délre több helyen alakultak ki természetes állóvizek, illetve ingoványos területek. Ilyen például a Várpalotától délre elhelyezkedő bányasüllyedékes tavak, valamint a DNy-i modellhatáron elhelyezkedő Sárréti Tájvédelmi Körzet. Mindkét terület feláramlási terület, ahol jelentős mennyiségű a karsztvíztároló miocén, homokos kőzetekbe átadódó vízkészlete. Ennek következtében a porózus fedőben kialakult várpalotai bányasüllyedékes tavak és Sárrét utánpótlása a fedőn keresztül történő, közvetlen karsztvíz utánpótlás.

Az modellterület északi részen a kincsesbányai homokbánya területén alakultak ki nagyobb állóvizek a fedő kőzetek mesterséges megbontása következtében. A homokbánya tavak utánpótlódása is a fedőn keresztül a karsztvíztároló felől történik.

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 Csór lokális modellben, az adott területre jellemző képződményeket vettük alapul. A numerikus modell vezérszintjeit alkotó hidrosztratigráfiai egységek – a regionális modellhez hasonlóan - a következők:

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

A lokális modellterületeken szükségessé vált ezen hidrosztratigráfiai egységek elterjedésének és vastagsági viszonyainak pontosítása, valamint a porózus fedőképződmények (alsó- és felső-pannon) elterjedésének és kőzetminőségének részletesebb kidolgozása is. Ez a munkafolyamat a lokális modellterületeken található összes olyan fúrás (85 db) figyelembevételével történt, amelyből a teljes rétegsor rendelkezésünkre állt, azaz elérte a prealbai képződményeket. Ez alapján el tudtuk különíteni a jobb és rosszabb vízvezető fedőképződménnyel fedett területeket. A függőkarsztos rétegcsoporton belül pontosabban le tudtuk határolni azokat a területeket, ahol az eocén/kréta márgák fordulnak elő, illetve azokat a területeket, ahol eocén/kréta karbonátos képződmények találhatóak. A fúrások alapján az egyes képződménycsoportok megjelenési mélységét is pontosítani tudtuk, mely alapján az azokat elválasztó vezérszintek (felszínek) is korrigálásra kerültek a regionális modellhez képest.

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

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

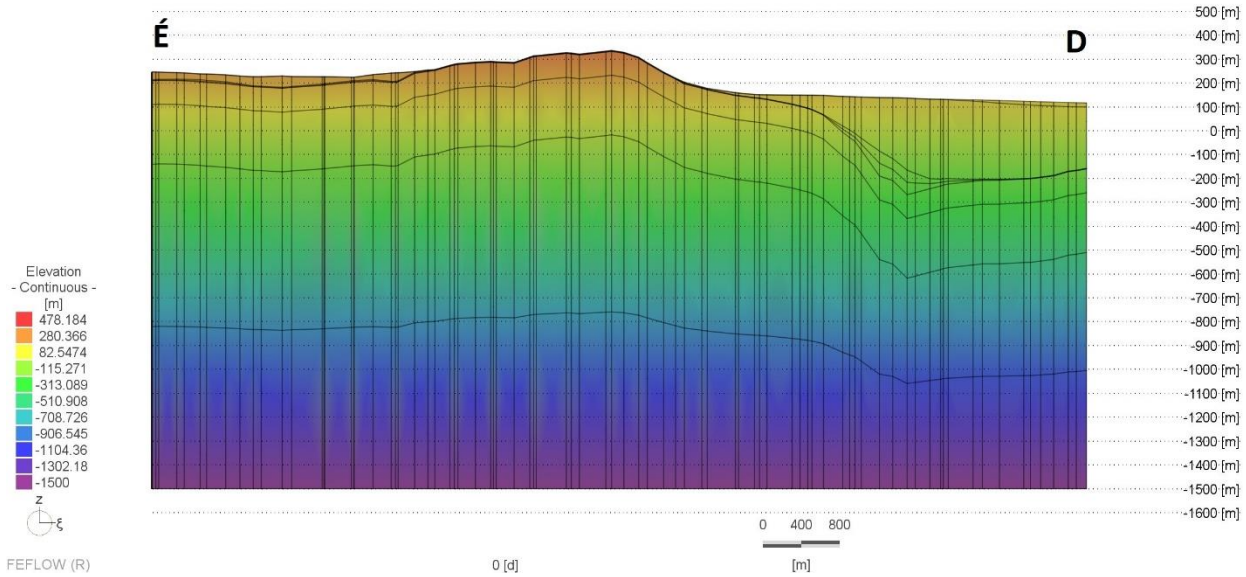
A fúrásokból kinyert információ alapján az egyes rétegek felszínét az ArcGIS Desktop 10.5.1 térinformatikai szoftvercsaláddal szerkesztettük. A numerikus modellben a terepszint képezi a felső felületet. A modellben felszíni domborzat az OVF 10 méteres digitális domborzat modellje alapján készült. A szerkesztett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

A kialakított lokális modellben tehát összesen 8 réteget és ebből következően 9 felszínt határoztunk meg. A rétegek vastagságát a modellterületen húzott É-D-i (***7. ábra***) és Ny-K-i szelvényen (***8. ábra***) mutatjuk be. A 8 réteg felülről lefelé a következő:

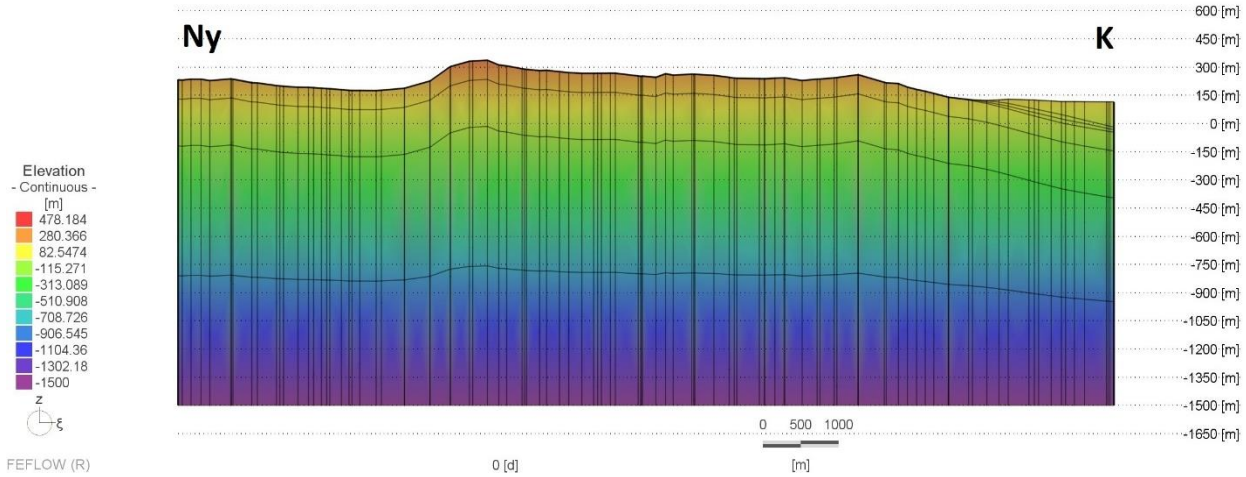
- 1. réteg: Kvarter és felső-pannon képződmények
- 2. réteg: Alsó-pannon – miocén – oligocén képződmények
- 3. réteg: Függőkarsztos rétegcsoport – mészkő
- 4. réteg: Függőkarsztos rétegcsoport – vízrekesztő képződmények
- 5. réteg: Főkarszt felső 100 m-es vastagságú része
- 6. réteg: Főkarszt 250 m vastagságú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

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

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

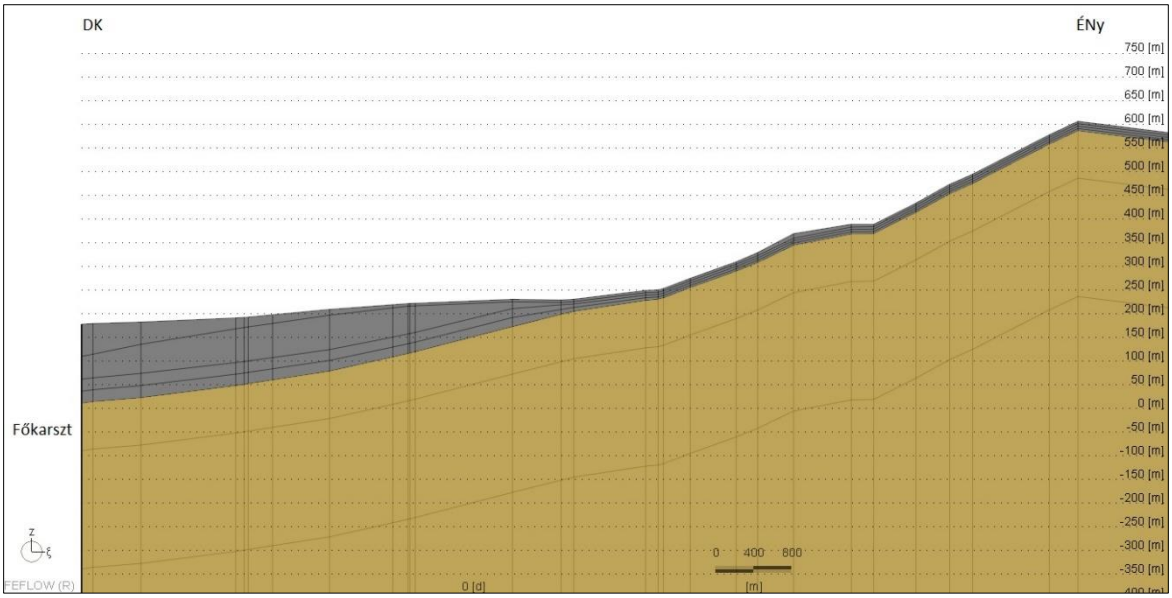


7. ábra: A csóri numerikus modellterület É-D-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás)



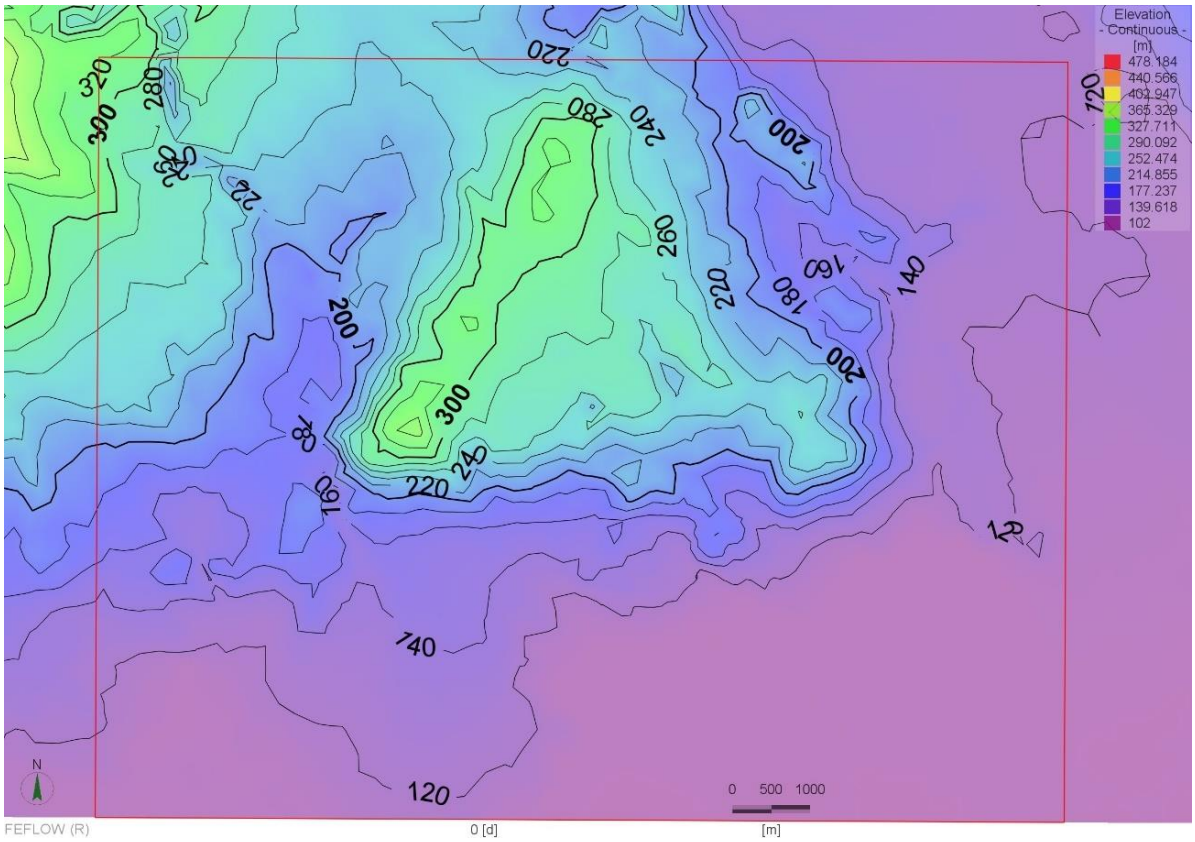
8. ábra: A csóri numerikus modellterület Ny-K-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás)

A ***9. ábra*** szemlélteti azt, hogy a modell geometriájának kialakítása során, miként vettük figyelembe azokat a területeket, ahol a valóságban főkarszt a felszínen van. Ezeken a helyeken – hasonlóan a regionális modellhez - az adott rétegben a geometriai megoldáson túl, paraméterváltást alkalmazunk a főkarsztvíztároló leképezésére (***3.3.1. fejezetre***).

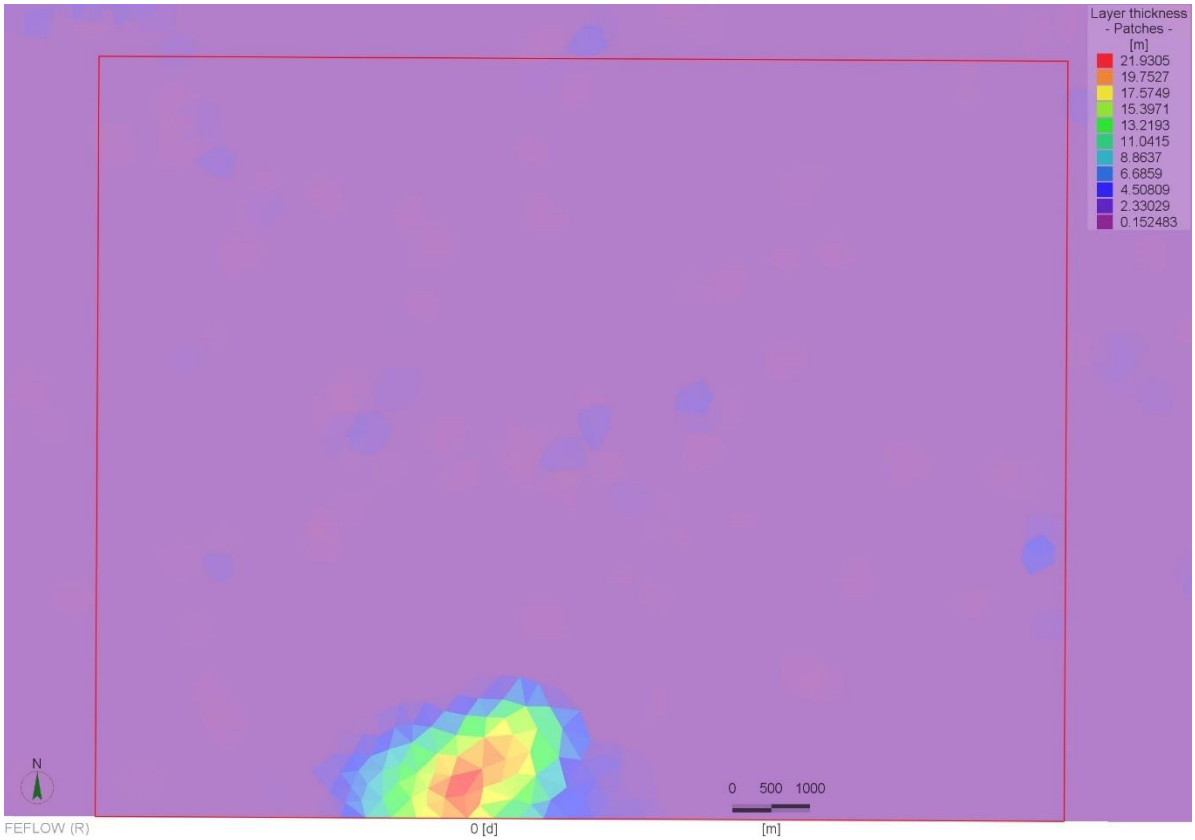


9. ábra: Példa a főkarszt kibúvás geometriai leképezésére egy numerikus modellben (5x túlmagasítás) (forrás: *Smaragd GSH 2020 [3]*)

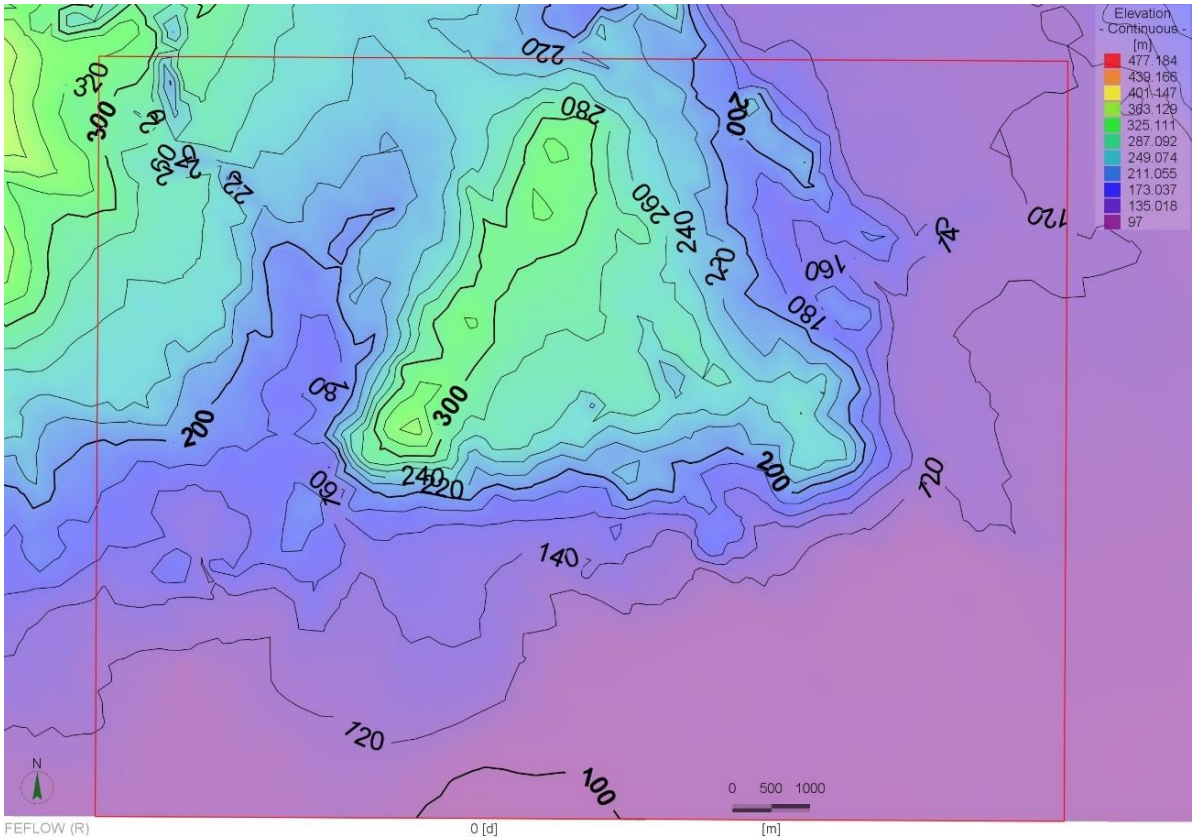
A ***10-16. ábra*** sorozat mutatja be a numerikus rétegek egyes felszíneit Csór lokális modell területén.



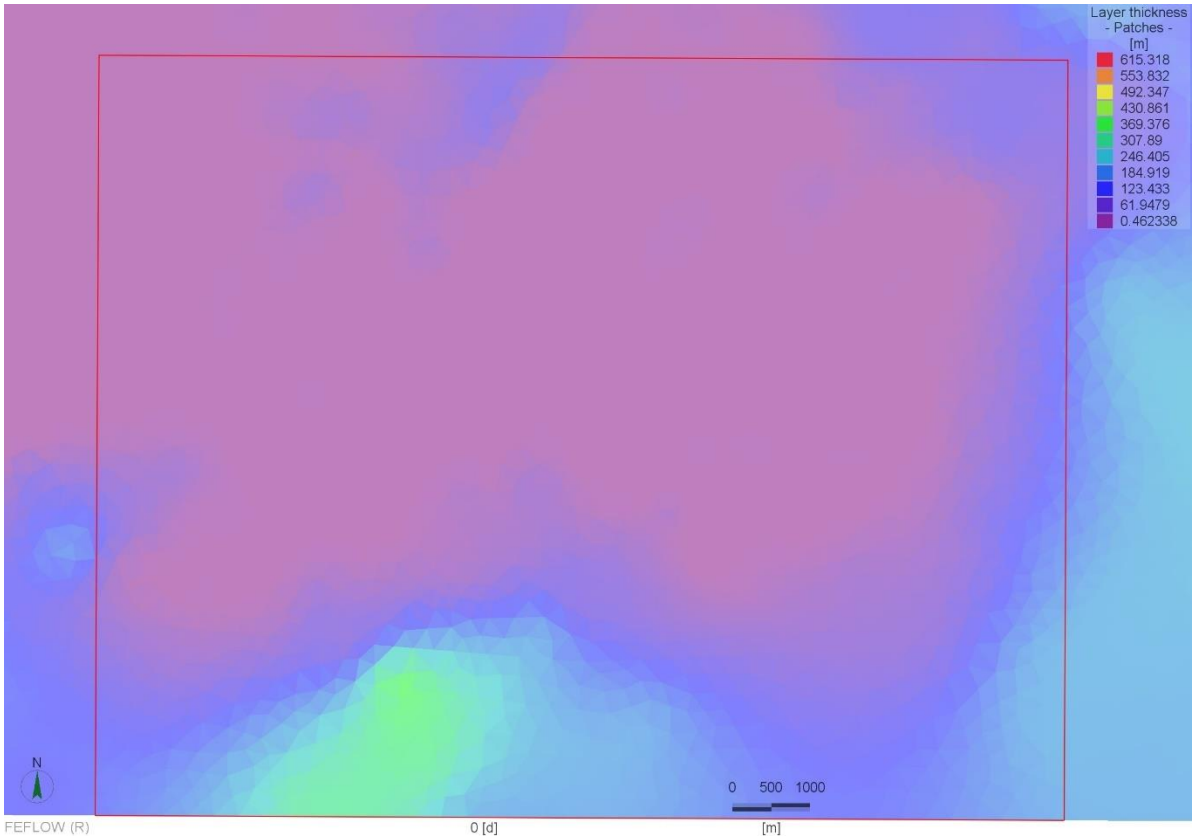
10. ábra: Az 1. numerikus modellfelszín [mBf]



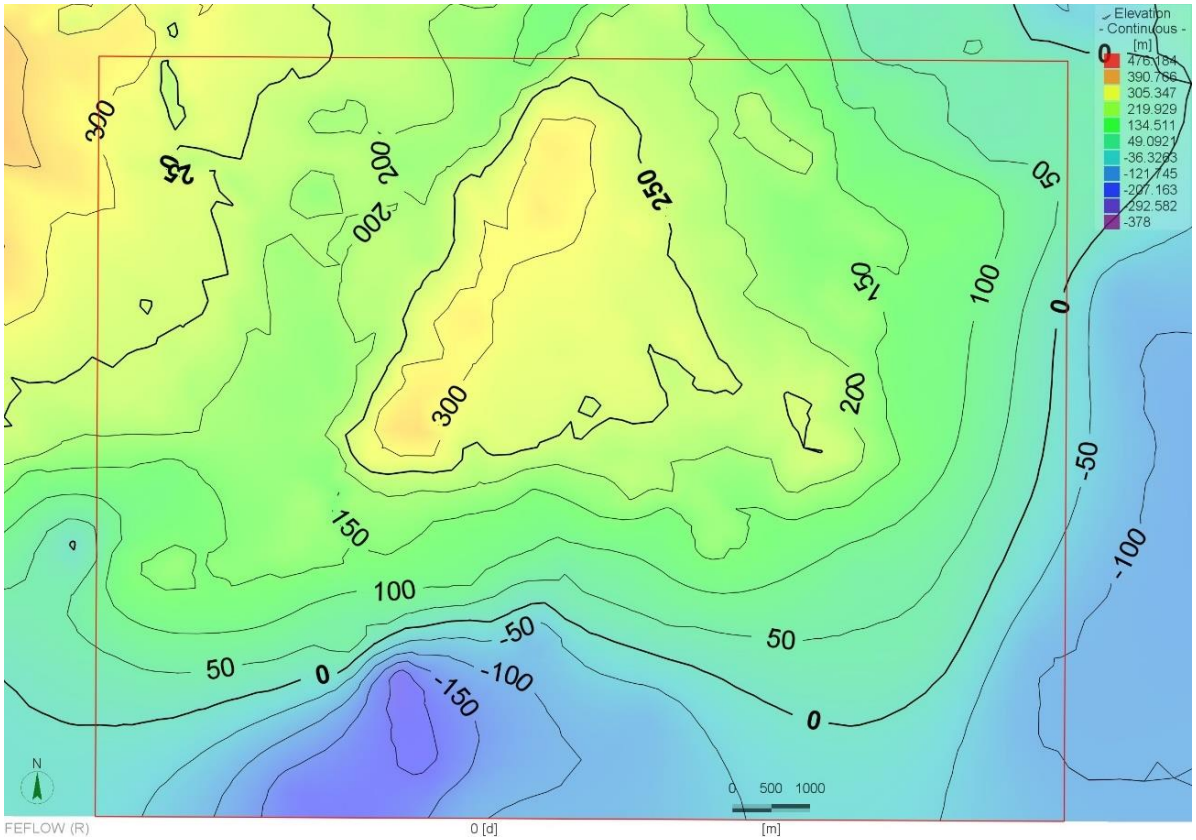
11. ábra: Az 1. numerikus modellréteg vastagsága



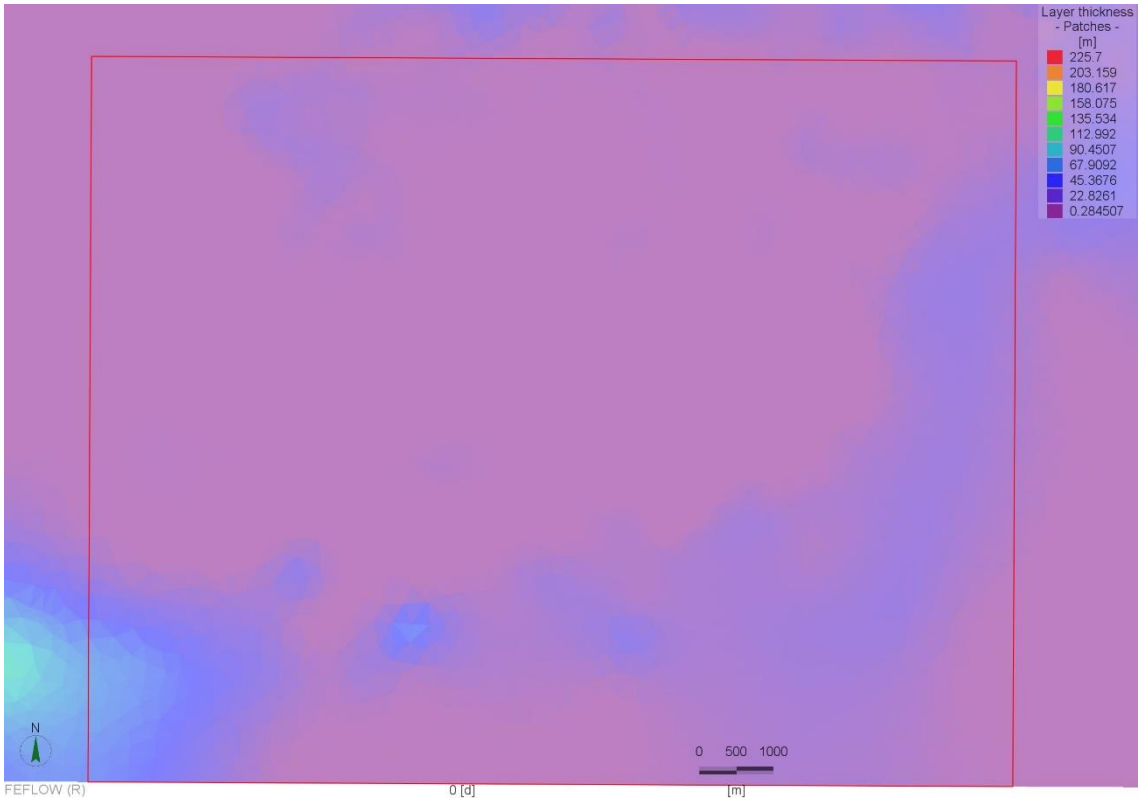
12. ábra: A 2. numerikus modellfelszín [mBf]



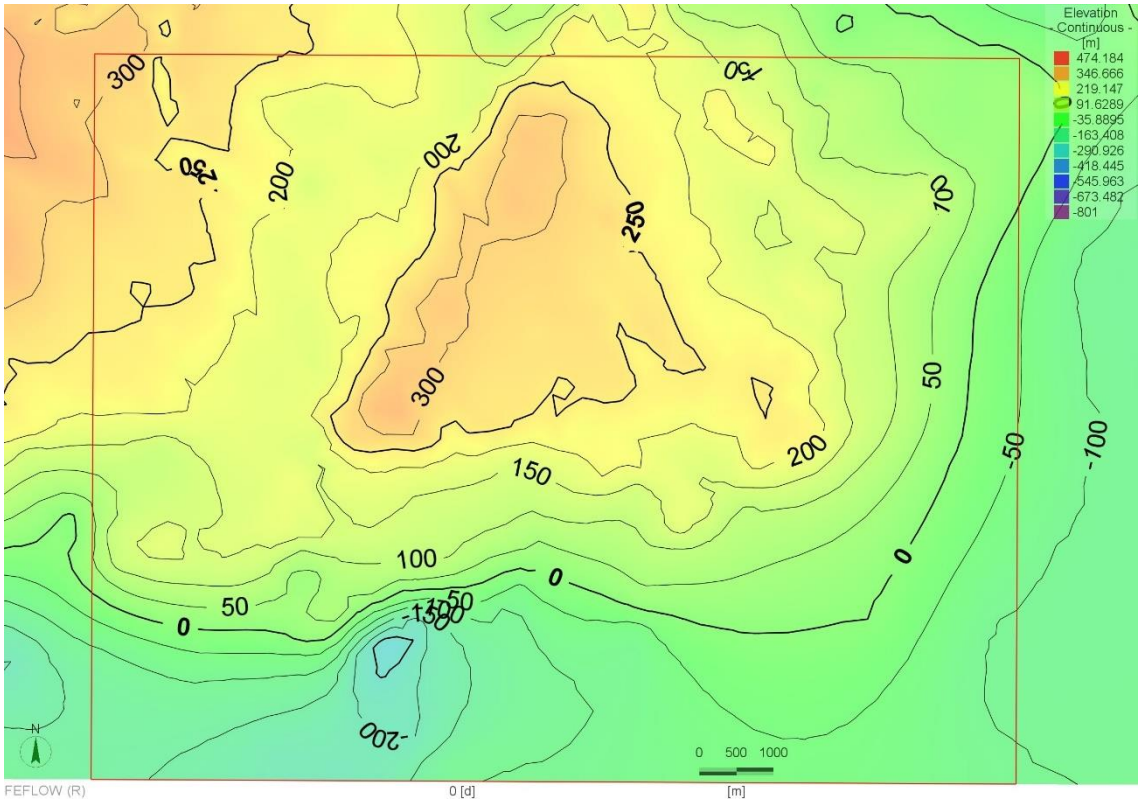
13. ábra: A 2. numerikus modellréteg vastagsága



14. ábra: A 3. numerikus modellfelszín [mBf]



15. ábra: A 3. numerikus modellréteg vastagsága



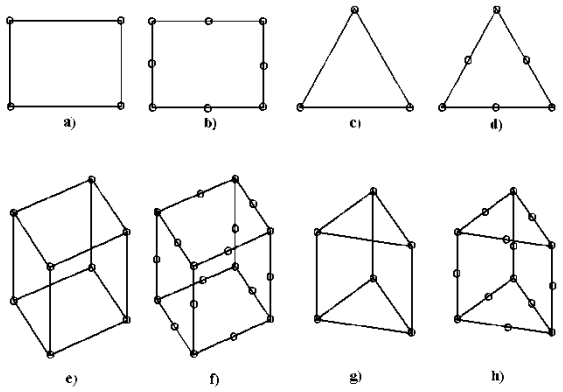
16. ábra: Az 5. numerikus modellfelszín [mBf]

3.2 A numerikus modell rácshálójának kialakítása

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

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

A végeselem módszer lényege, hogy a modellezni kívánt teret tetszőleges számú és alakú elemre bontjuk (***17. 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.



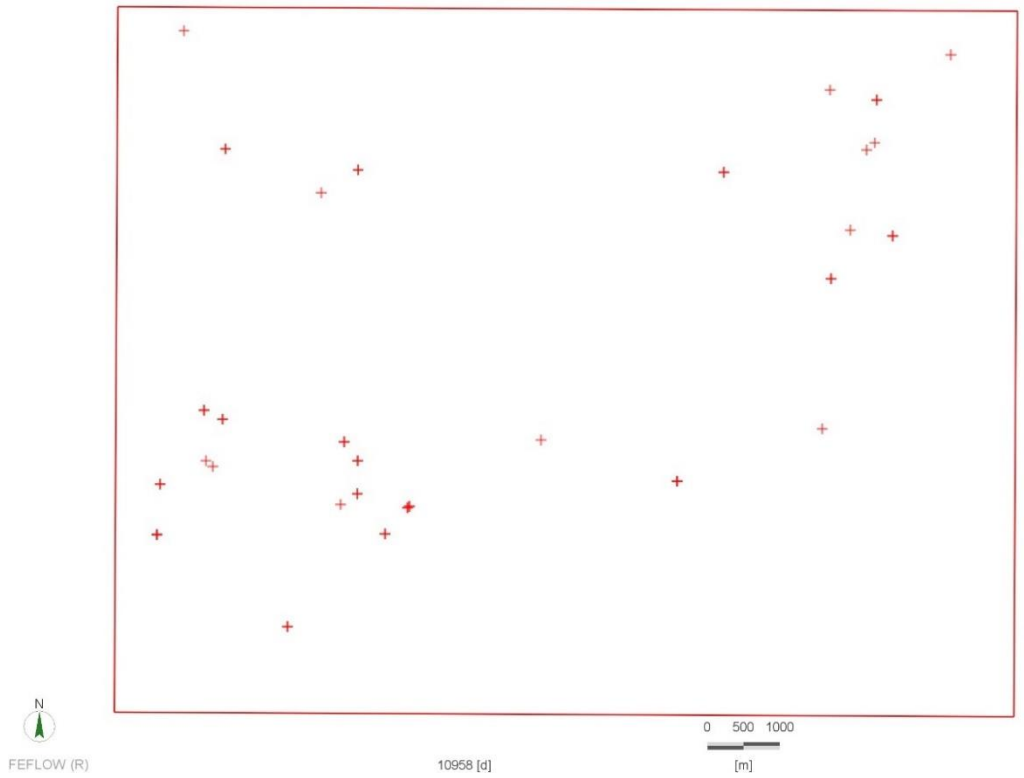
2D modul:
a) 4-csomópontos
b) 8-csomópontos négyoldalú elemek
c) 3-csomópontos
d) 6-csomópontos háromoldalú elemek
3D modul:
e) 8-csomópontos
f) 20-csomópontos négyoldalú prizmák
g) 6-csomópontos
h) 15-csomópontos háromoldalú prizmák

17. ábra: A FEFLOW szoftverben alkalmazható elemek

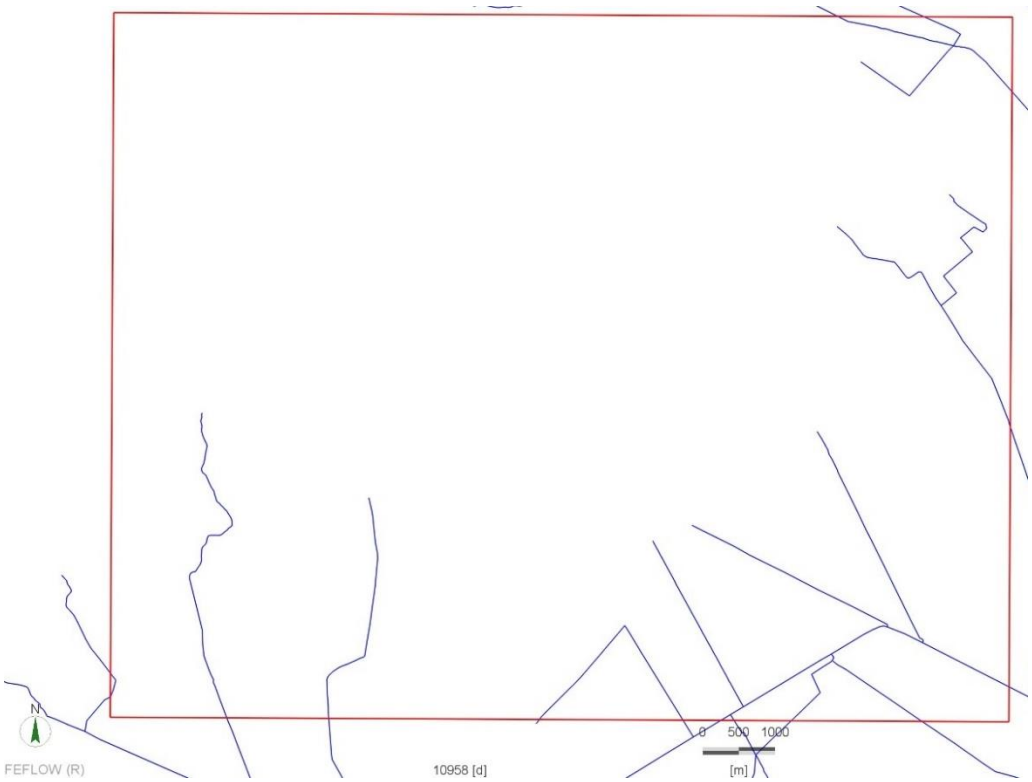
A hálókiosztás során a modellezett térrészt háromszög alapú prizmákkal definiáltuk (6-csomópontos háromoldalú lineáris prizmák). A rácsháló kialakításánál a következő elemekhez rendeltünk csomópontot:

- Pont elemek (***18. ábra***):
  - a lokális modell területén a karsztot, illetve a fedőt megcsapoló termelő objektumok, amelyekből van termelési adat
  - minden forrás a Smaragd-GSH Kft. által a projekt keretében 2019-ben végzett forrásfelmérés alapján
  - törzshálózati karsztvízszint észlelő monitoring kutak
- Vonal elemek:
  - egyszerűsített vetőhálózat
  - egyszerűsített folyó és kisvízfolyások hálózata

A vízfolyásokat egyszerűsített vonal elemekkel definiáltuk (***19. ábra***), hogy elkerüljük a felesleges pontokon való sűrítést. A vízfolyások hálózatát az OVF vízrajzi állományából szűrtük le méret, illetve a karsztárolóval való kapcsolat szerint. A regionális modellel ellentétben, a lokális modellben a kisebb vízfolyásokhoz is rendeltünk csomópontot.



18. ábra: Pont elemek

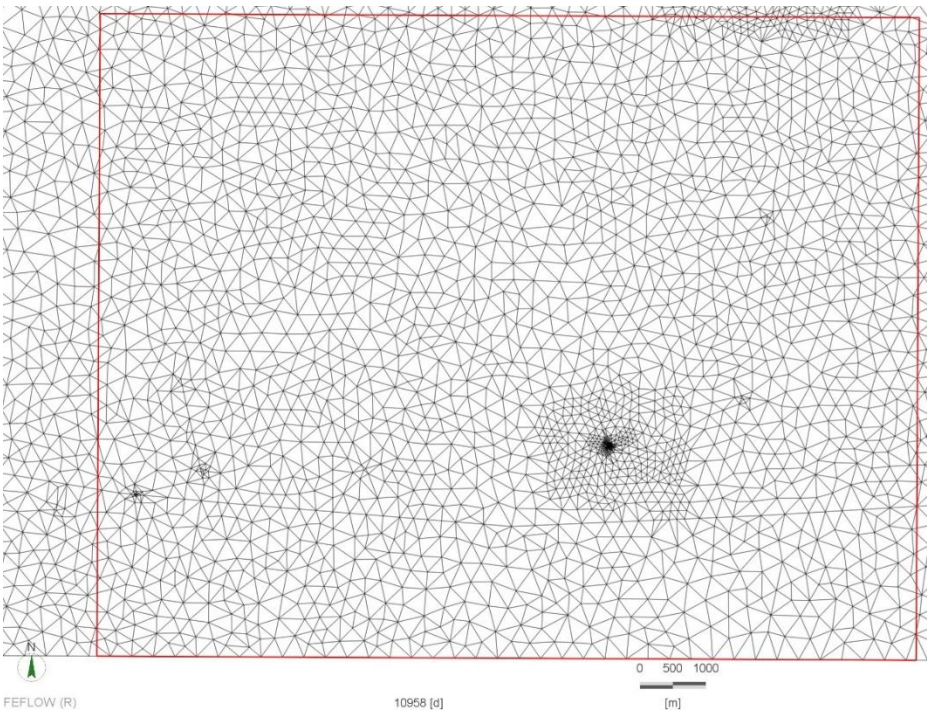


19. ábra: Egyszerűsített folyóhálózat

A vetőket az M= 1:500 000 prekainozoos földtani térkép [12] és a terület prealbai földtani térképe [13] alapján vettük figyelembe (***20. ábra***).

20. ábra: Egyszerűsített vetőhálózat

A mesh generálást a FEFLOW Triangle Mesh Generator funkciójával végeztük el. A három modellterületen együttesen (Bodajk-Fehérvárcsurgó-Csór) a rácsháló egy felületen összesen 9 312 db csomópontot és 18 361 db elemet tartalmaz. A teljes 8 rétegű numerikus modell, így összesen 83 808 db csomópontból és 146 888 db véges elemből áll. A ***21. ábrán*** a Csór lokális modellterületre eső rácsháló részlet látható.



21. ábra: A numerikus modell rácshálójának Csór lokális modellterületre eső részlete

3.3 A numerikus modell hidraulikai paraméterezése

3.3.1 Szivárgási tényező értékek a numerikus modellben

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

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

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

ahol h: a hidraulikus emelkedési magasság [m]

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

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

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

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

A lokális modellezés egyik célja az volt, hogy a numerikus számítás hibája kisebb legyen, mint regionális modellben. Ennek megvalósítására, a terület parametrizálása első lépésben a hidrosztratigráfiai egységek alapján történt meg, figyelembe véve a regionális modell kalibrációja során kapott értékeket. Ezt követően került sor további pontosításra a lokális modell kalibrációja során. A pontosításhoz hozzá tartozik, hogy a porózus fedőképződmények részletesebb bontásra kerültek. A regionális modellterületen az átlagos szivárgási tényezővel jellemzett porózus pannon összletet a lokális numerikus modellben tovább bontottuk az agyag- és homoktartalom alapján. Ezekre a kőzetekre jellemző K-tényező értékeket a T-JAM projekt eredményei (*Fodor et al. 2011*) [10] szerint vettük figyelembe.

A regionális modellezés során alkalmazott alapkoncepciót, a lokális modellezés során is alkalmaztuk, miszerint a szivárgási paraméterek meghatározásakor a felszínen megtalálható, jobban karsztosodott, repedezett, mállott képződmények nagyobb értékkel rendelkeznek, mint ugyanezen képződmények fedett helyzetben. A főkarszt felszíni kibúvásainak szivárgási tényezőjét hasonlóképpen, mint a regionális modellben, a bányászati víztelenítés során számolt és mért transzmisszivitás értékekből becsültük (*Schmieder – Szilágyi 1988*) [9]. A karbonátos vízadó paraméterezését a kalibráció során pontosítottuk – értékét és területi eloszlását tekintve is – annak érdekében, hogy a modellezett vízszint és forráshozam értékek, a valós mért értékeket minél jobban leképezzék.

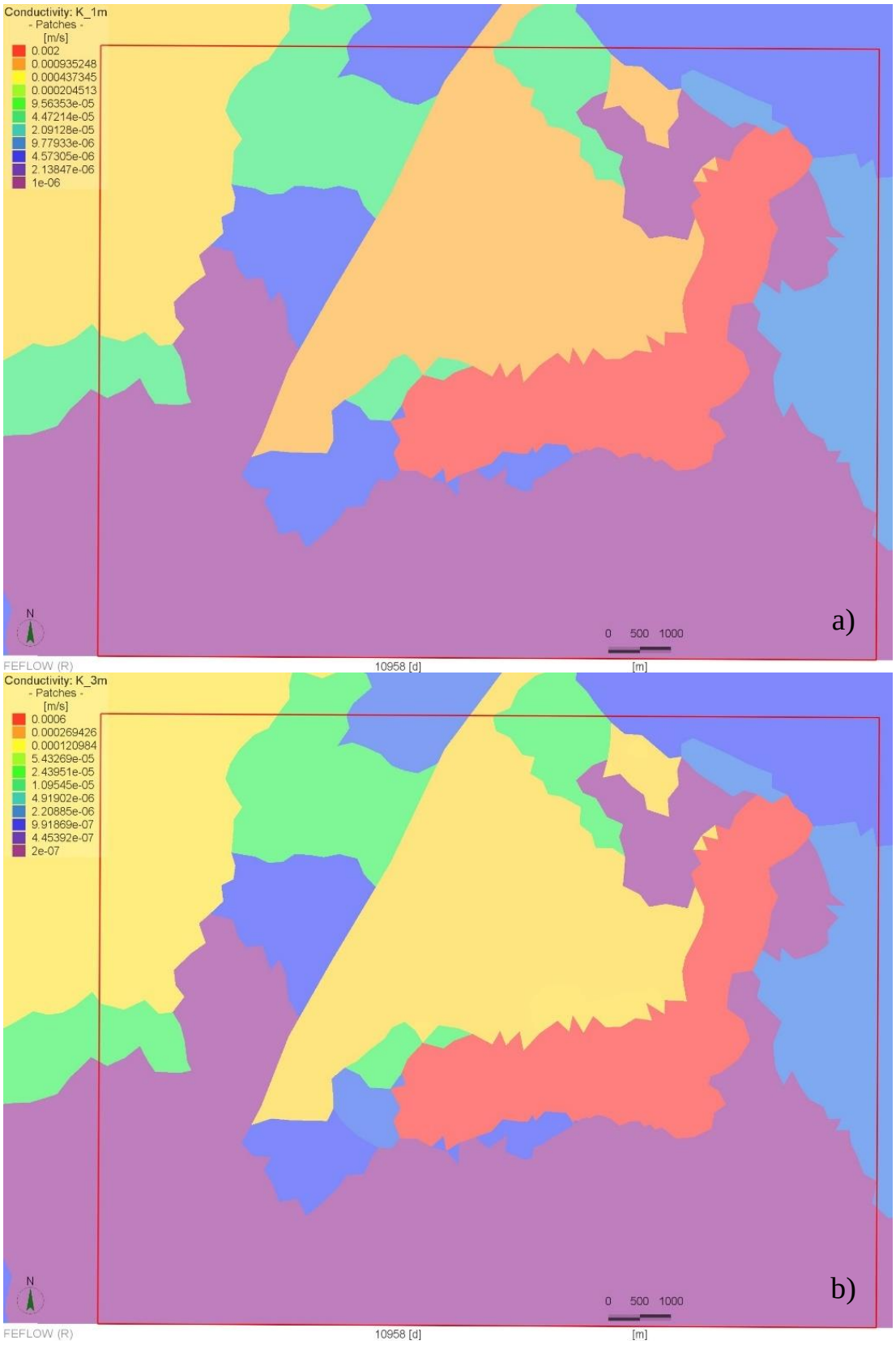
A numerikus rétegekben, a kalibrálás után elfogadott K-tényező eloszlást a ***22-29. ábrák*** mutatják, a különböző hidrosztratigráfiai egységek, illetve kőzettestek szivárgási tényező értékeit a ***4. táblázat*** szemlélteti. A lokális modellek elkészítése során egyre nagyobb szerepet kaptak a kisebb léptékben is előforduló földtani különbözőségek. Ez alapján előfordult, hogy azonos hidrosztratigráfiai

egységhez sorolt képződményeket, területenként eltérő hidraulikai paraméterekkel láttunk el. A ***4. táblázat***ban az egységekhez az alkalmazott értékek teljes intervalluma került feltűntetésre. A táblázatban bemutatott szivárgási tényezők nem a teljes rétegre, csak az adott formáció valós elterjedési területeire vonatkoznak.

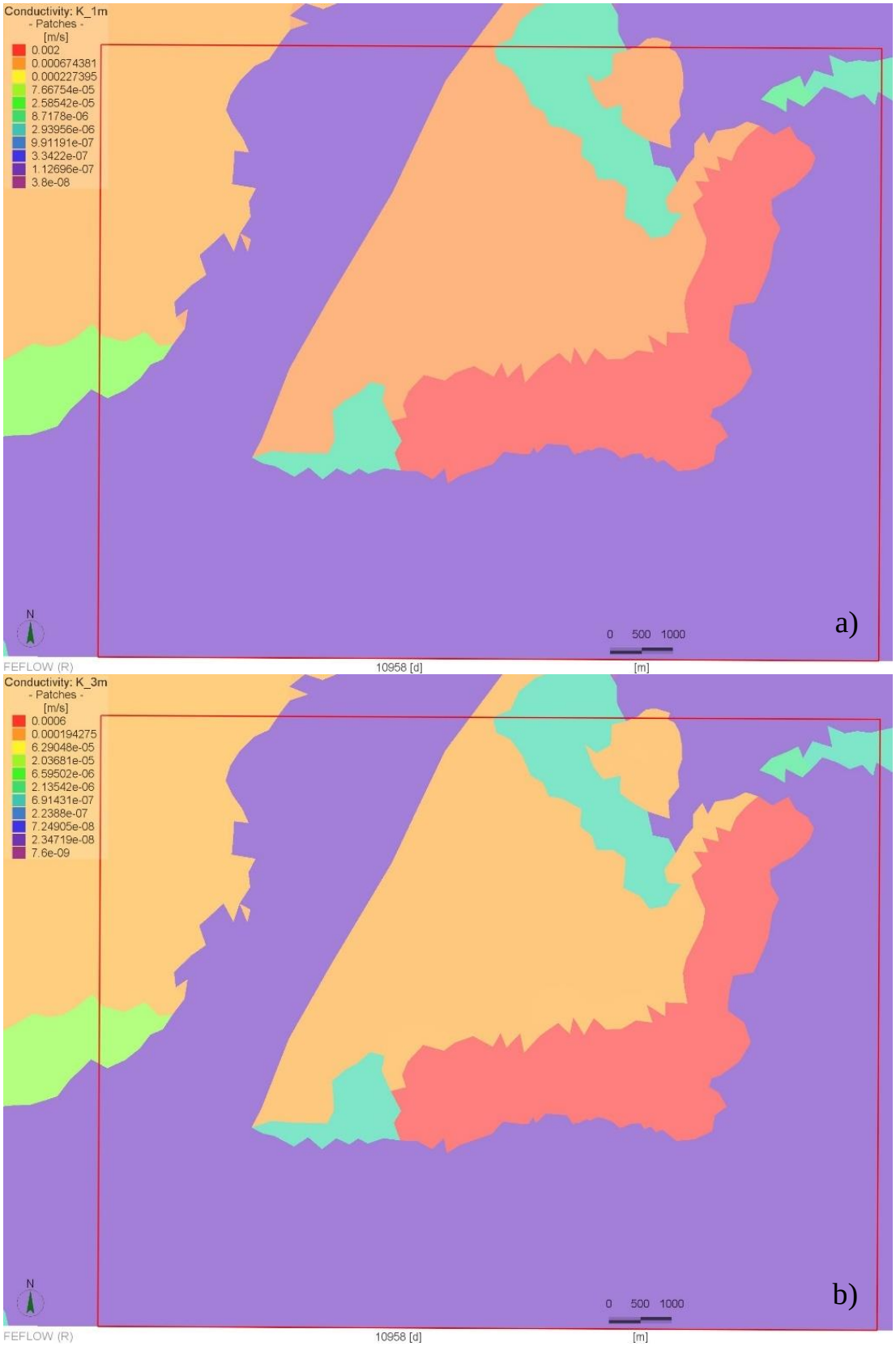
A modellben a konduktivitási mező rétegenként inhomogén és anizotróp. Ez azt jelenti, hogy a vertikális szivárgási tényező meghatározásánál, minden képződménynél feltételeztünk anizotrópiát, ez képződményenként eltérő mértékű. A horizontális szivárgási tényezőknél csak a karsztban definiáltunk anizotrópiát,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

A Csór lokális modellterületen, Csór településétől északra viszonylag nagy kiterjedésben nyílt karsztos terület jelenik meg, amely az 1-8. rétegekben nyomon követhető, változó szivárgási-tényező értékekkel. Ezt a területet kőzetek képződési kora alapján további két részre osztottuk: a felső-triász Fődolomit Formáció képződményei valamivel rosszabb (8·10-4 m/s) vertikális hidraulikus vezetőképesség értéket kaptak, mint a tőle DK-i irányban elhelyezkedő idősebb triász képződmények (2·10-3 m/s), de mindkettő kiemelten jó vízvezetőnek tekinthető. Az 5-6. rétegtől továbbra is elkülönül a két képződmény, azonban a mélység növekedésével egyre kisebb paraméterértékekkel rendelkeznek. A Tési-fennsík karsztos képződményei ÉNy-i irányból lógnak be a lokális modellterület határára, mely az 1-4. rétegekben valamivel rosszabb horizontális vízvezető értékkel (6·10-4 m/s) rendelkezik, mint a másik karsztos terület.

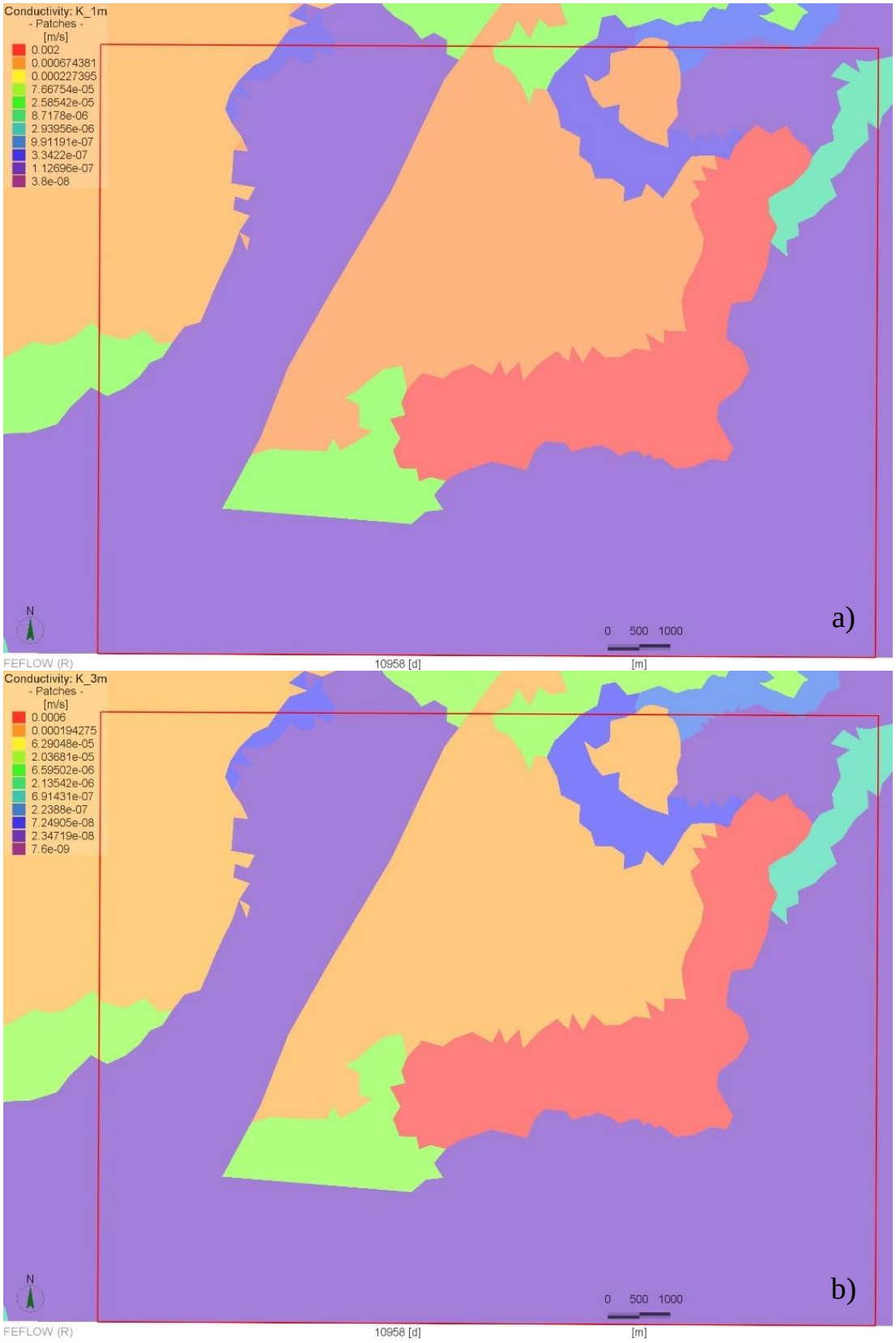
A karsztos területekről délre az 1-4. rétegben jellemzően alacsonyabb szivárgási tényezővel jellemezhető finomszemcsés sziliciklasztos képződmények találhatók meg, de kisebb területeken jobb vízadó homok, illetve édesvízi mészkő is előfordul. A 2. rétegtől tovább nő a finomszemcsés képződmények területi aránya, és horizontális hidraulikus vezetőképesség értékük is rosszabb ($1\cdot10^{-7}$ m/s), mint az 1. rétegben ($1\cdot10^{-6}$ m/s). A 3-4. rétegekben kis területen a jó vízadó eocén mészkövek ($5\cdot10^{-5}$ m/s) és a velük egykorú rossz vízadó márgák ($2\cdot10^{-7}$ m/s) is megjelennek.



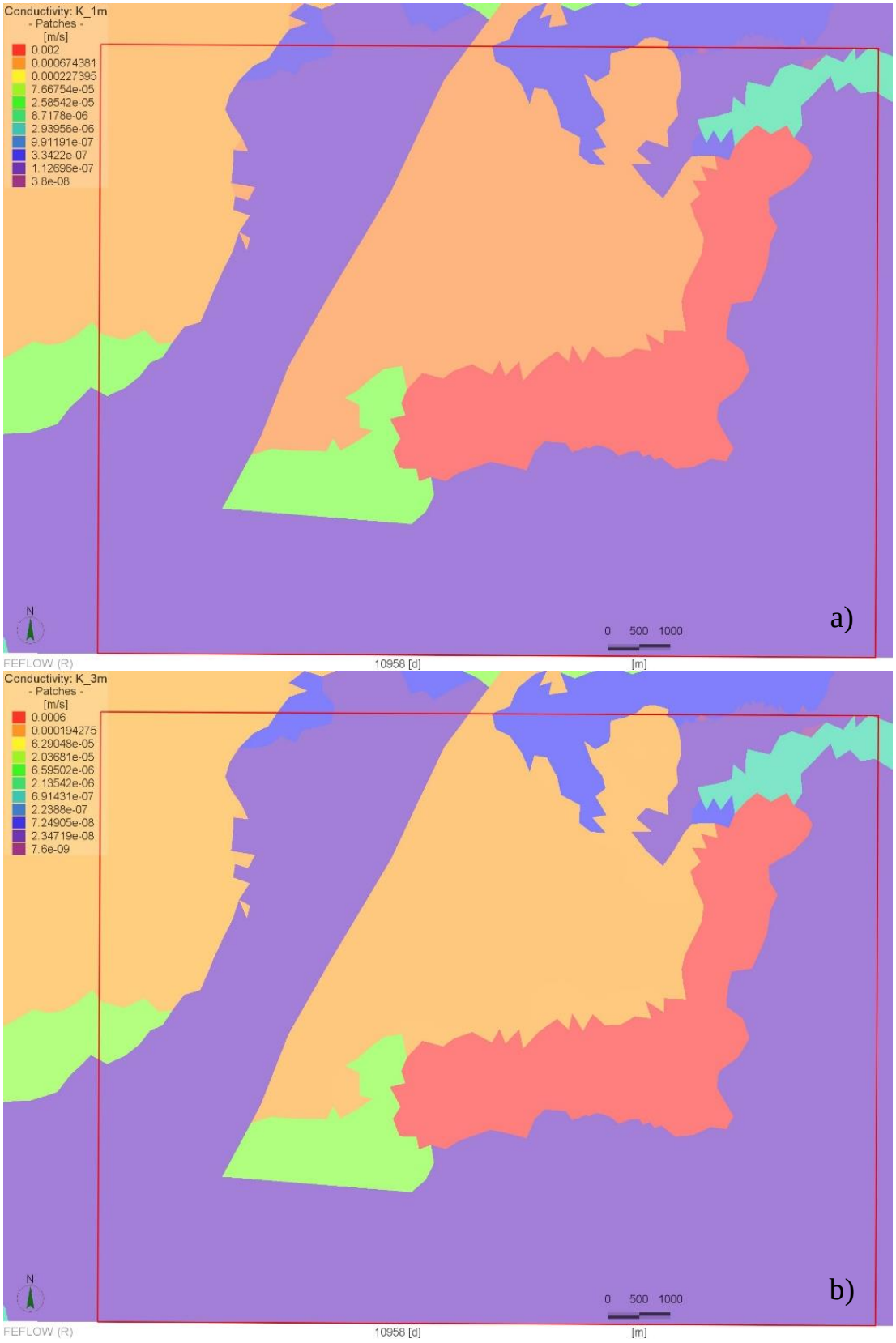
22. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



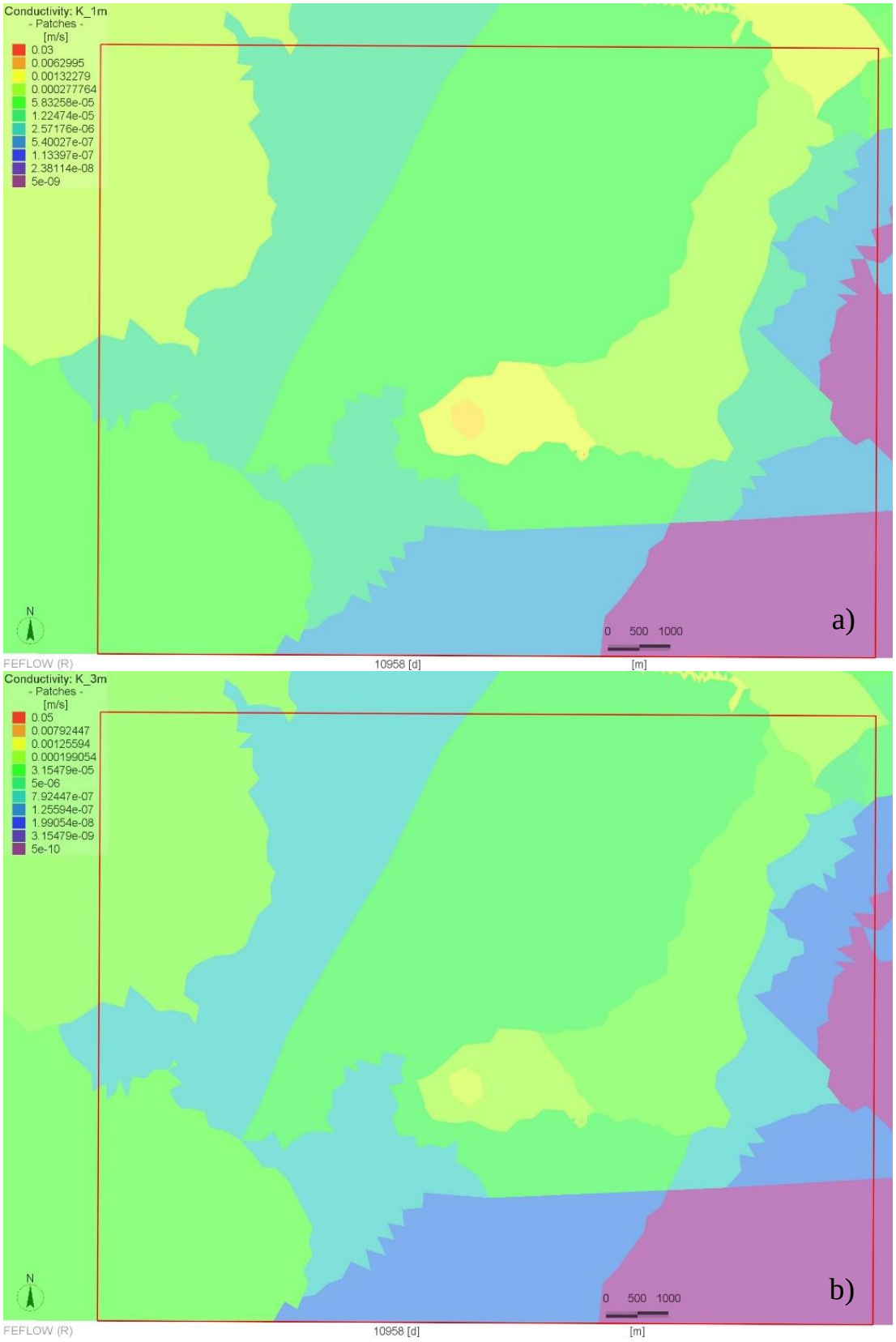
23. ábra: A 2. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



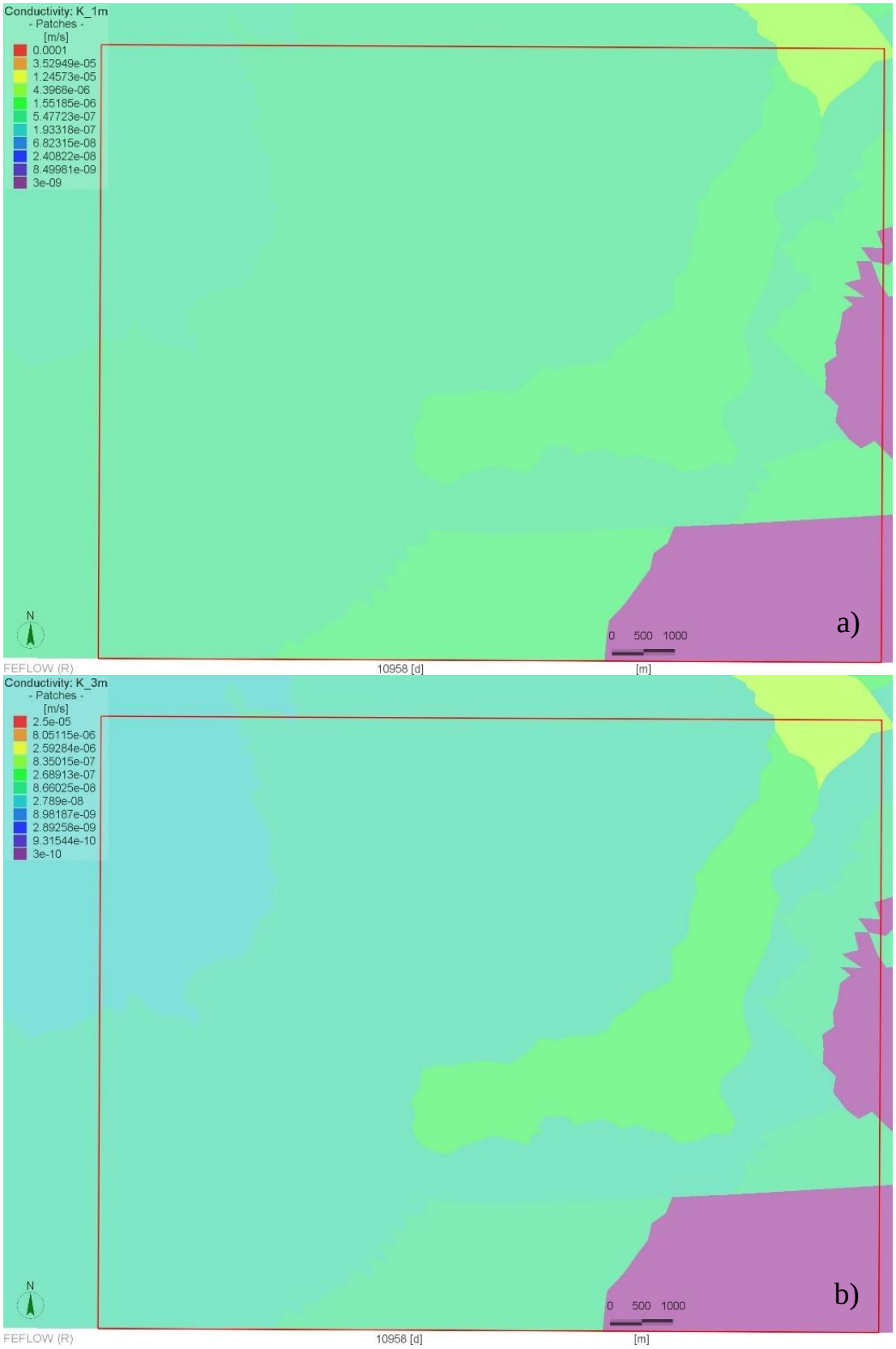
24. ábra: A 3. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



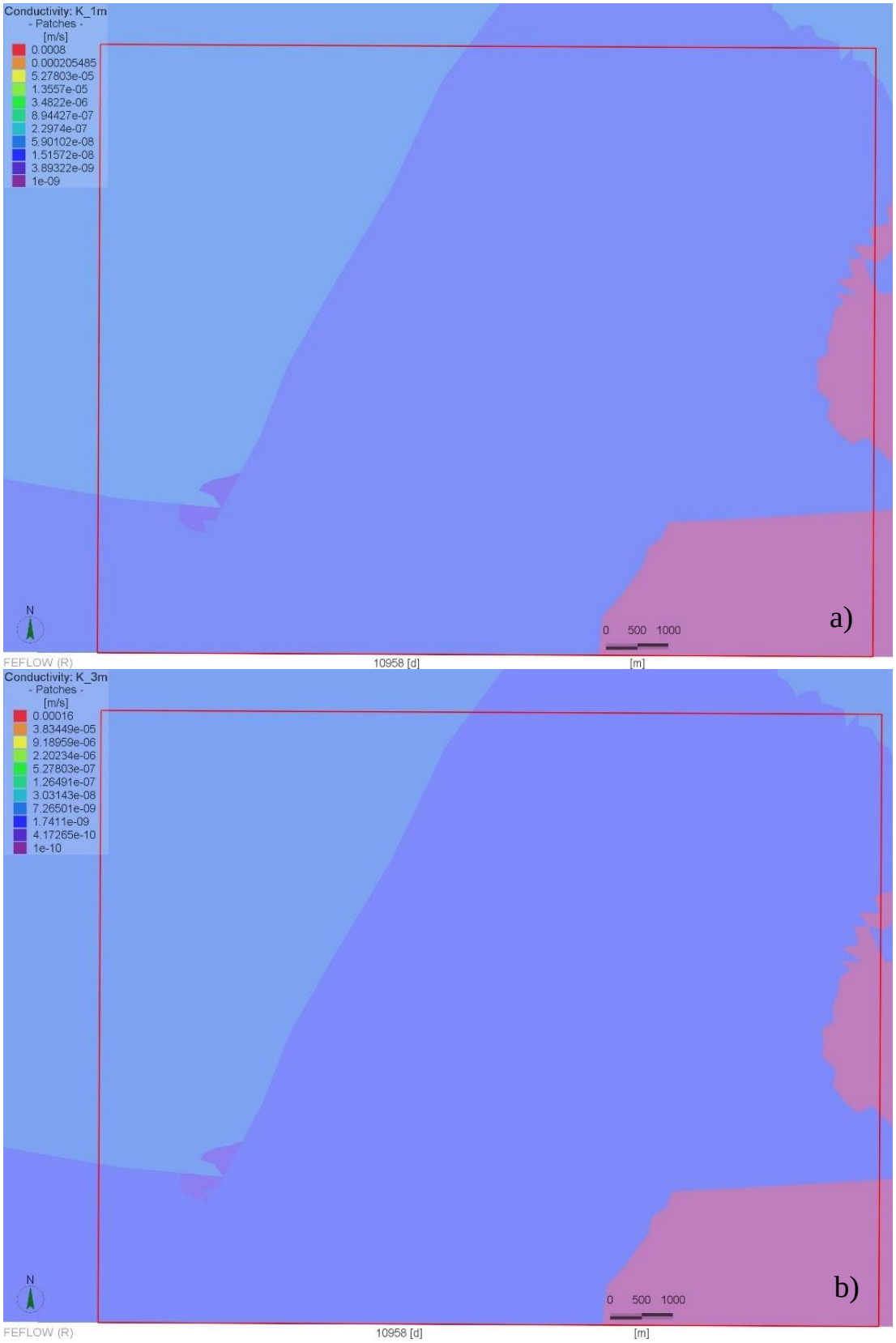
25. ábra: A 4. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



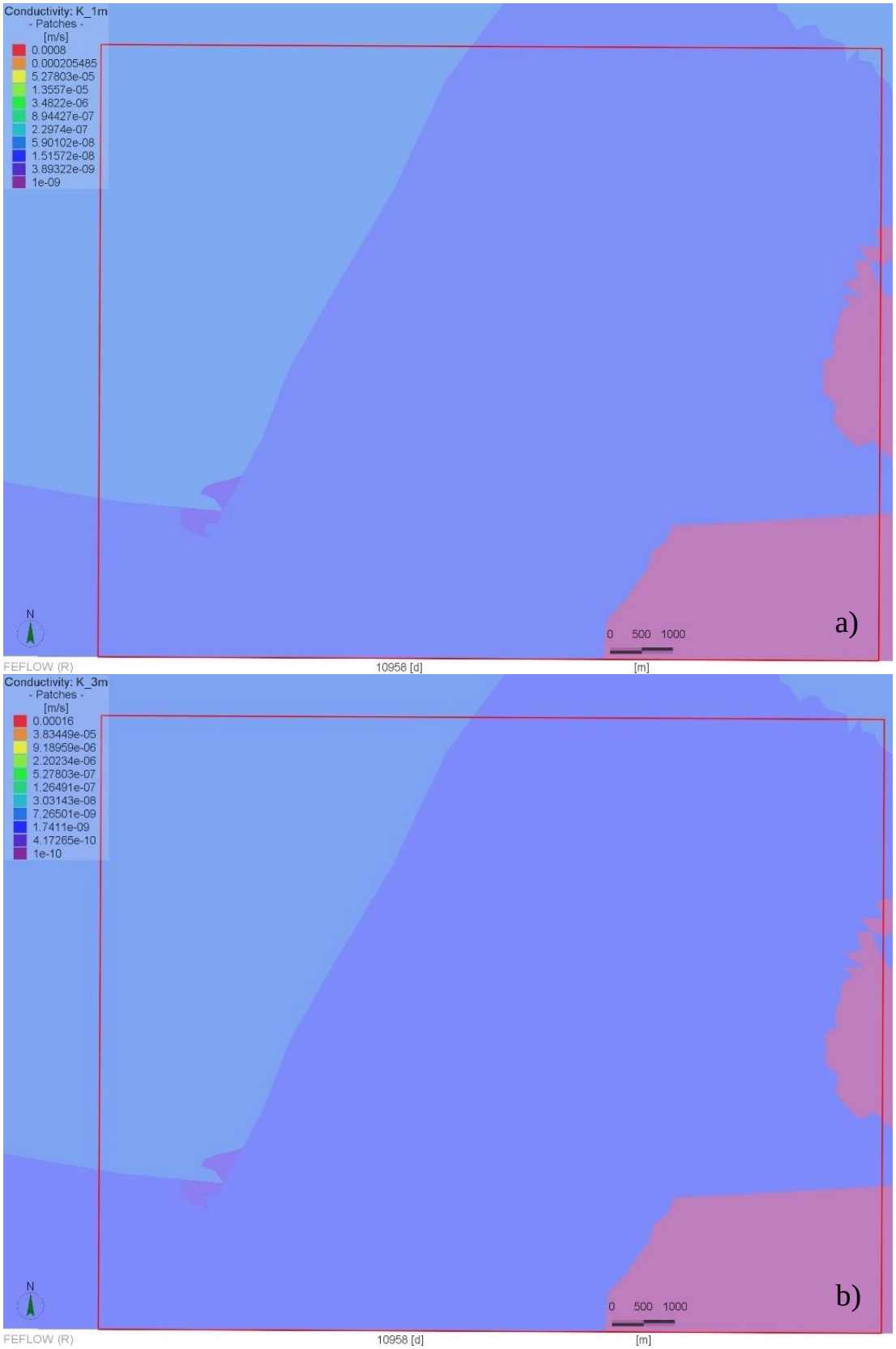
26. ábra: Az 5. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



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



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

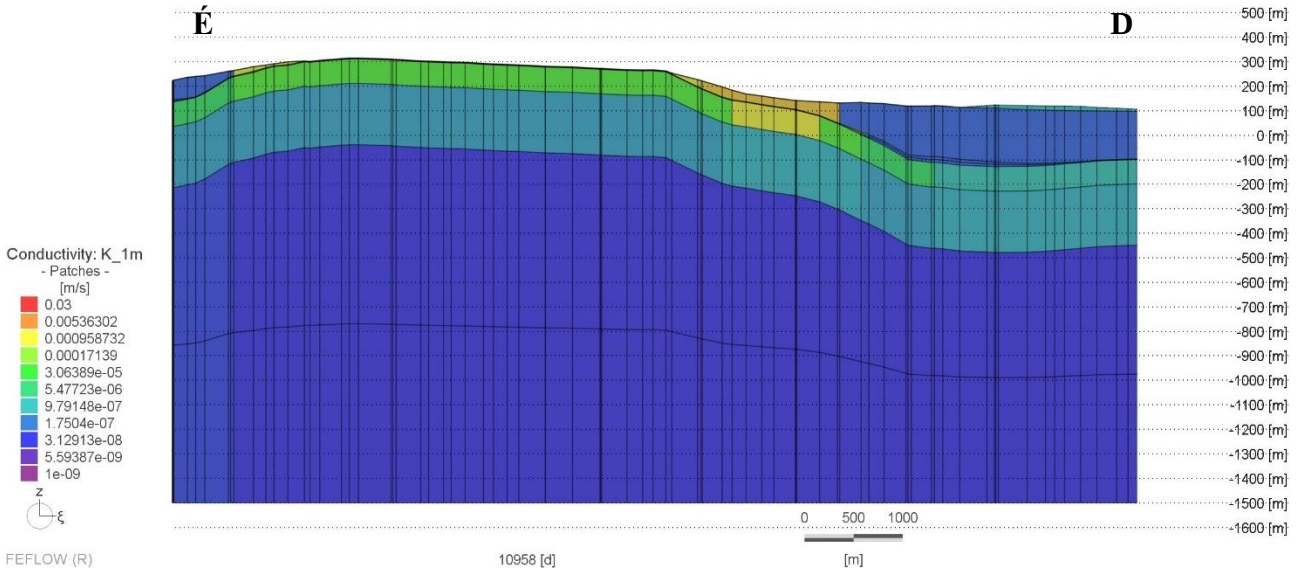


29. ábra: A 8. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás

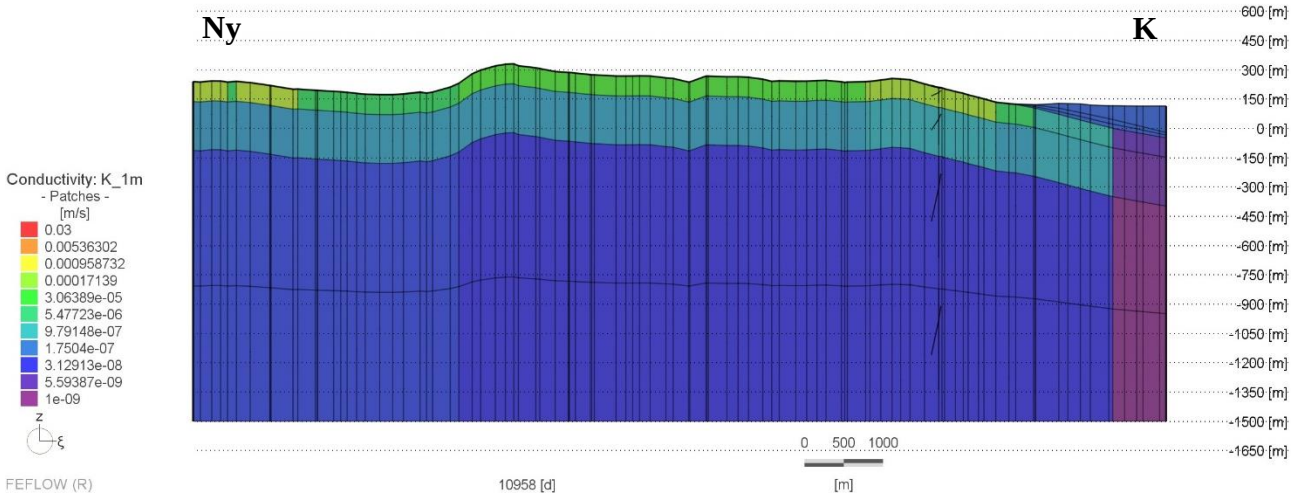
4. táblázat: Az egyes képződmények K-tényező értéke a numerikus modellben

Numerikus réteg		Nyílt karsztos területek								Medence területek											
		kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)
1	Q-Pa2	Pre-albai (T3 Fődolomit Fm.)	6E-04 - 8E-04	Kx*0.5	1,5E-04 - 1,7E-04	Pre-albai (T2-3 Vértesi Fmcs.)	2E-03	Kx*0.5	6E-04	Q-Pa2	1E-06 - 5E-05	Kx*0.5-1	2E-07 - 1,7E-05	Q-Pa2	1E-06 - 5E-05	Kx*0.5-1	2E-07 - 1,7E-05	Q-Pa2	1E-06 - 5E-05	Kx*0.5-1	2E-07 - 1,7E-05
2	Pa1-M-Ol													Pa1-M-Ol (Csákvári Agyagmárga, Ősi Tarkaagyag, Gyulafirátóti Fm.)	1,00E-07	Kx*1	2E-08				
3	Függőkarsztos rétegcsoport - mészkő									Függőkarszt (mészkő/márga)	5E-05/ 2E-07	Kx*0.5	1,6E-05/ 6,67E-08								
4	Függőkarszt rétegcsoport - vízrekesztő																				
5	Pre-albai*		4E-04 - 5E-05		1E-04 - 2E-05		3E-04 - 9E-04		7,5E-05 - 2,25E-04	Pre-albai (Fődolomit Fm.)	5E-05		2E-05	Pre-albai (Fődolomit/ Vértesi Fmcs.) Balatonfelvidéki Homokkő Lovasi Agyagpala	1E-05 - 2E-03 1.25E-06 5E-09	Kx*0.5-1	1E-06 - 5E-04 1.25E-06 5E-09	Pre-albai (Fődolomit/ Vértesi Fmcs.) Balatonfelvidéki Homokkő Lovasi Agyagpala	1E-05 - 2E-03 1.25E-06 5E-09	Kx*0.5-1	1E-06 - 5E-04 1.25E-06 5E-09
6	Pre-albai segédréteg		4E-07 - 5E-07		3,2E-08 - 5E-08		8E-07 - 4E-06		1E-07 - 1,7E-06		5E-07		5E-08		5E-07 - 4E-06 7,5E-07 3E-09		3,2E-08 - 1E-06 7,5E-08 3E-10		5E-07 - 4E-06 7,5E-07 3E-09		3,2E-08 - 1E-06 7,5E-08 3E-10
7	Pre-albai segédréteg	Pre-albai (Fődolomit/ Vértesi Fmcs.) Balatonfelvidéki Homokkő	5E-08 2,5E-08		5E-09 2,5E-09	Pre-albai (Fődolomit/ Vértesi Fmcs.) Balatonfelvidéki Homokkő	5E-08 2,5E-08		5E-09 2,5E-09		2,5E-08		2,5E-09		1E-08 - 5E-08 2,5E-08 1E-09		1E-09 - 5E-09 2,5E-09 1E-10		1E-08 - 5E-08 2,5E-08 1E-09		1E-09 - 5E-09 2,5E-09 1E-10
8	Pre-albai segédréteg																				

* 5. rétegben, Csór akna közvetlen környezetében: Kx=0,03; Ky=Kz=0,05

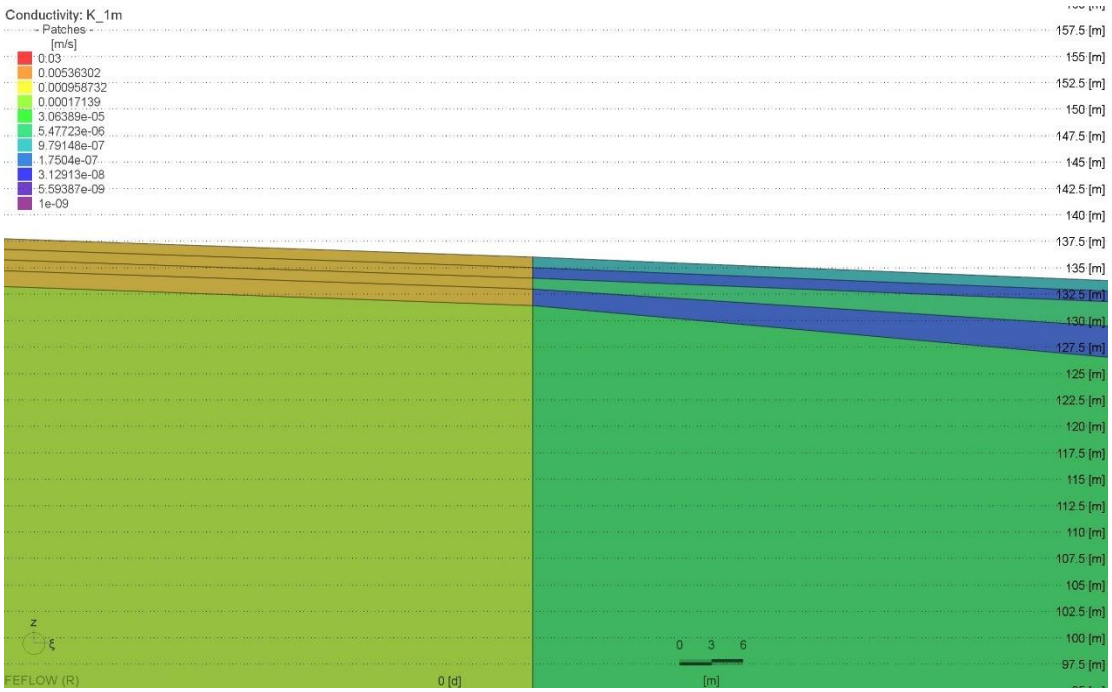


30. ábra: A szivárgási tényező eloszlás É-D-i irányú szelvényen (2,5x túlmagasítás)



31. ábra: A numerikus modell Ny-K-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás)

A valóságban, az idősebb karbonátos kőzetek és a fiatalabb üledékes kőzetek egymás mellett fordulnak elő, ezt a modellben, a geometriai megoldáson túl (***3.1. fejezet***), paraméterváltással lehet leképezni (***32. ábra***).



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

A különböző korú kőzettestek vertikális elterjedése sem azonos, ezt a modellezés során igyekeztünk leképezni. A ***5. táblázat*** mutatja, hogy az egyes képződmények melyik numerikus rétegben fordulnak elő.

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

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

3.3.2 Fajlagos tározás értékek a numerikus modellben

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

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

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

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

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

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

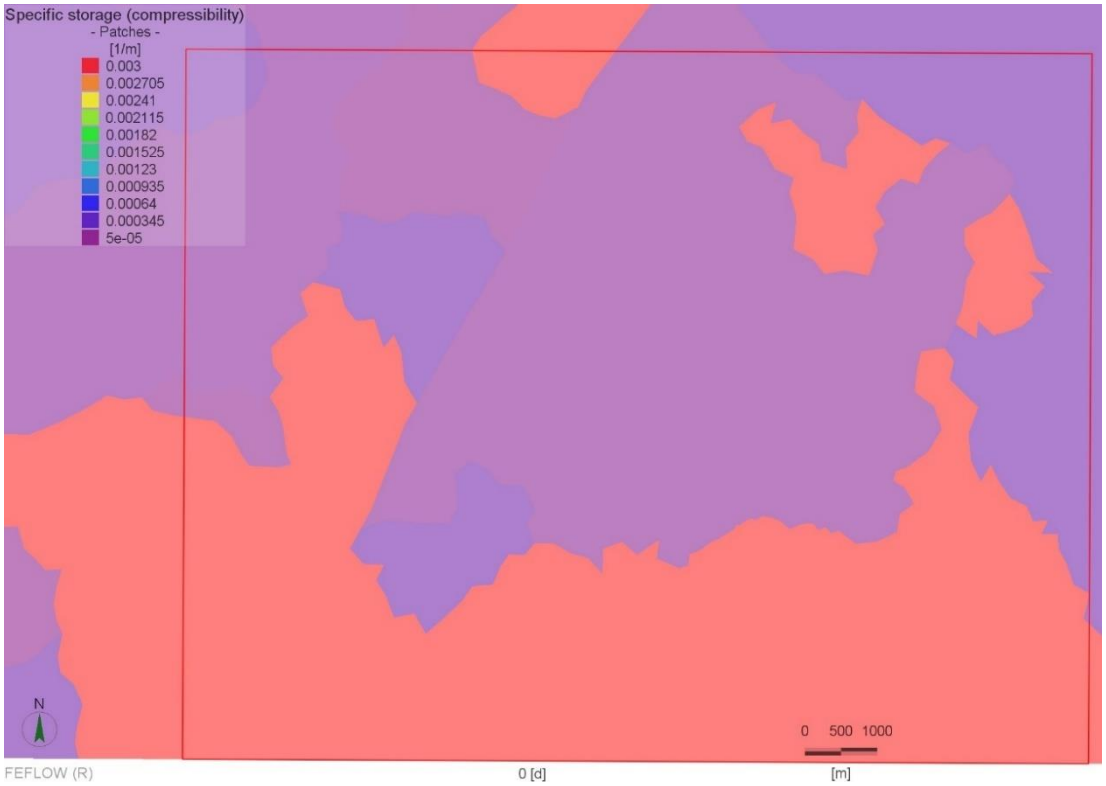
$$\frac{\partial}{\partial x}(K(x)\frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K(y)\frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K(z)\frac{\partial h}{\partial z}) = S_0\frac{dh}{dt}$$

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

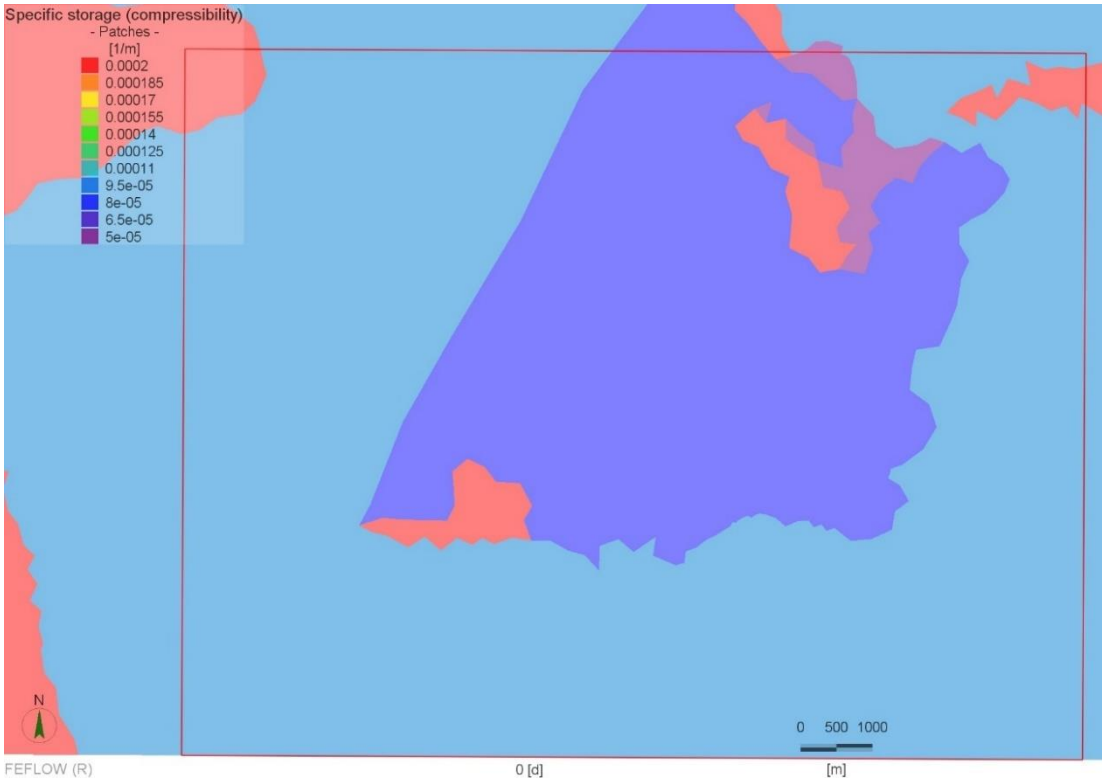
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T}\frac{dh}{dt}$$

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

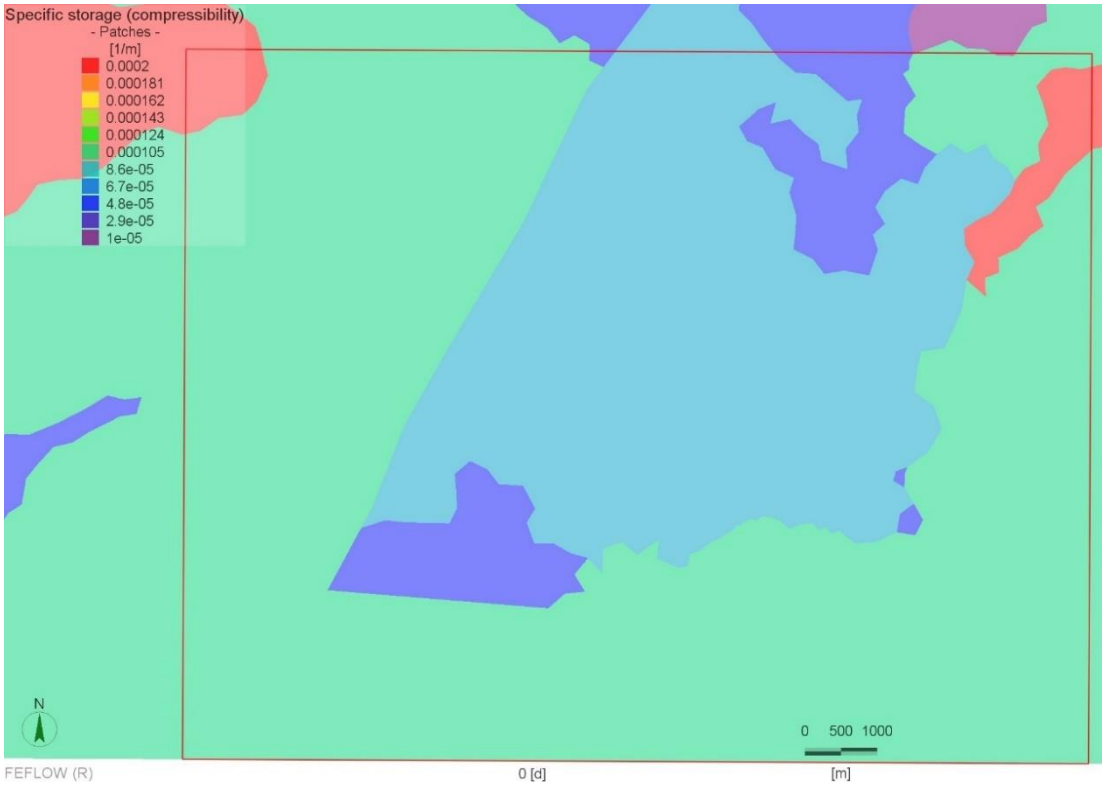
Első lépésben a fajlagos tározás értékeket irodalmi adatok alapján számoltuk ki a Dunántúli-középhegység regionális modell bemeneti paramétereihez [3]. A fajlagos tározás számításához szükséges, kőzetre jellemző teljes porozitást a T-JAM [10] alapján, míg a közeg kompresszibilitását (α) *Domenico & Schwartz, 1990* [6]szerint határoztuk meg. Ezeket a kalkulált értékeket használtuk fel később a lokális modell kezdeti értékeinek, majd a kalibráció során pontosítottuk azokat. A fajlagos tározás értékek elkülönítése részben hidrosztratigráfiai egységek alapján történt, azonban bizonyos esetekben – elsősorban karbonátos képződményeknél – adott képződménynél akár kis távolságon belül is valamelyest eltérő értékeket adtunk meg. Ennek oka, hogy a karbonátok fajlagos tározási képessége széles skálán változhat, hiszen az eltérő mértékű utólagos hatások (karsztosodás mértéke, szerkezeti mozgások, stb.) befolyásolják a kőzetestek hidraulikus tulajdonságát. A 7. rétegtől nincs képződménybeli elkülönítés a fajlagos tározásban. A numerikus modellben a kalibrálás után kapott tározás eloszlását a ***33-38. ábrák*** szemléltetik.



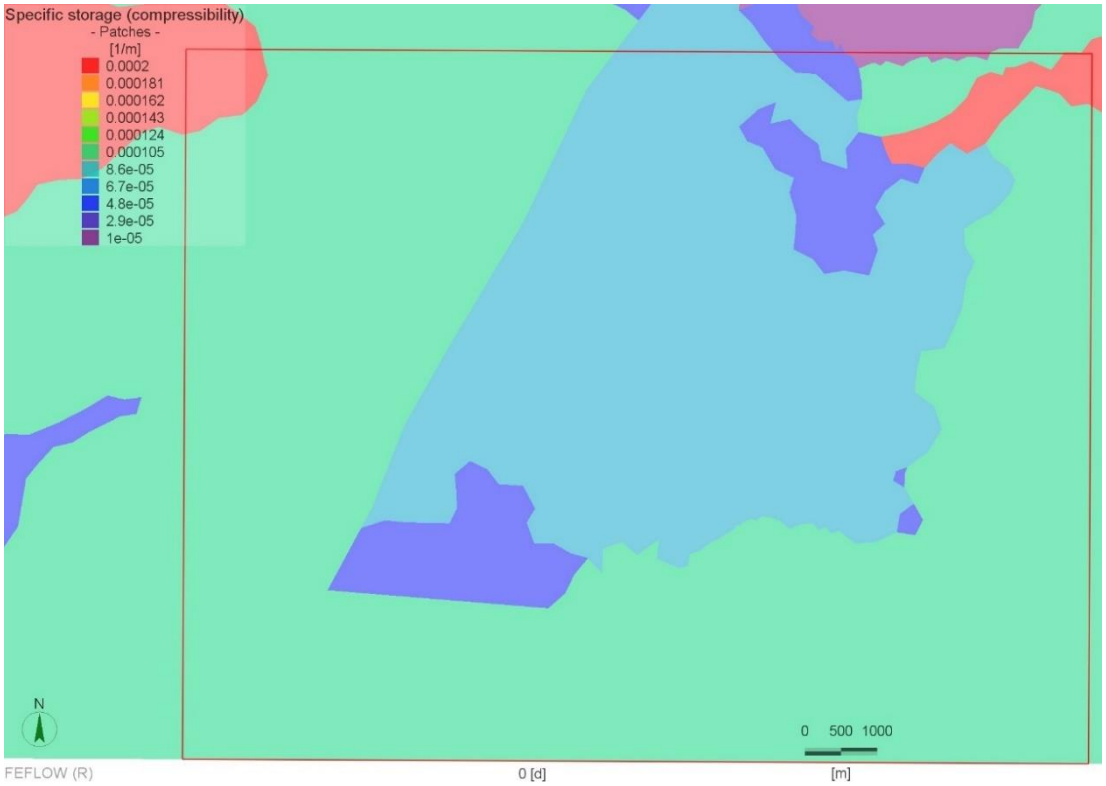
33. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



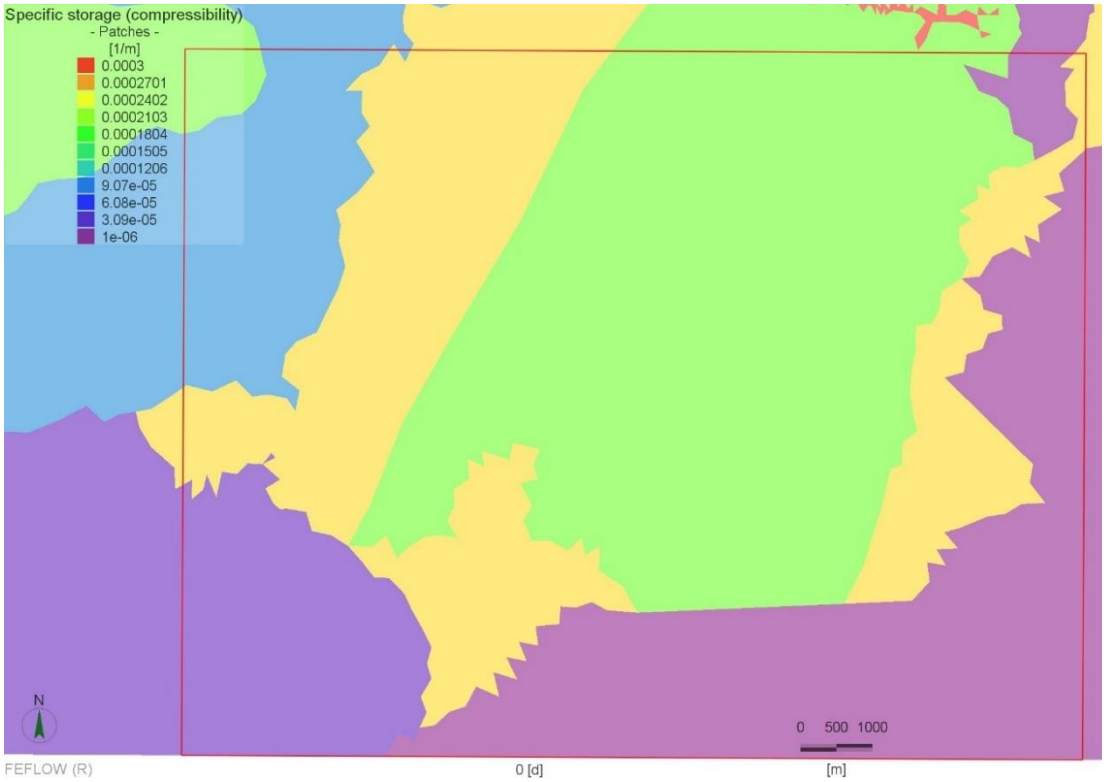
34. ábra: A 2. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



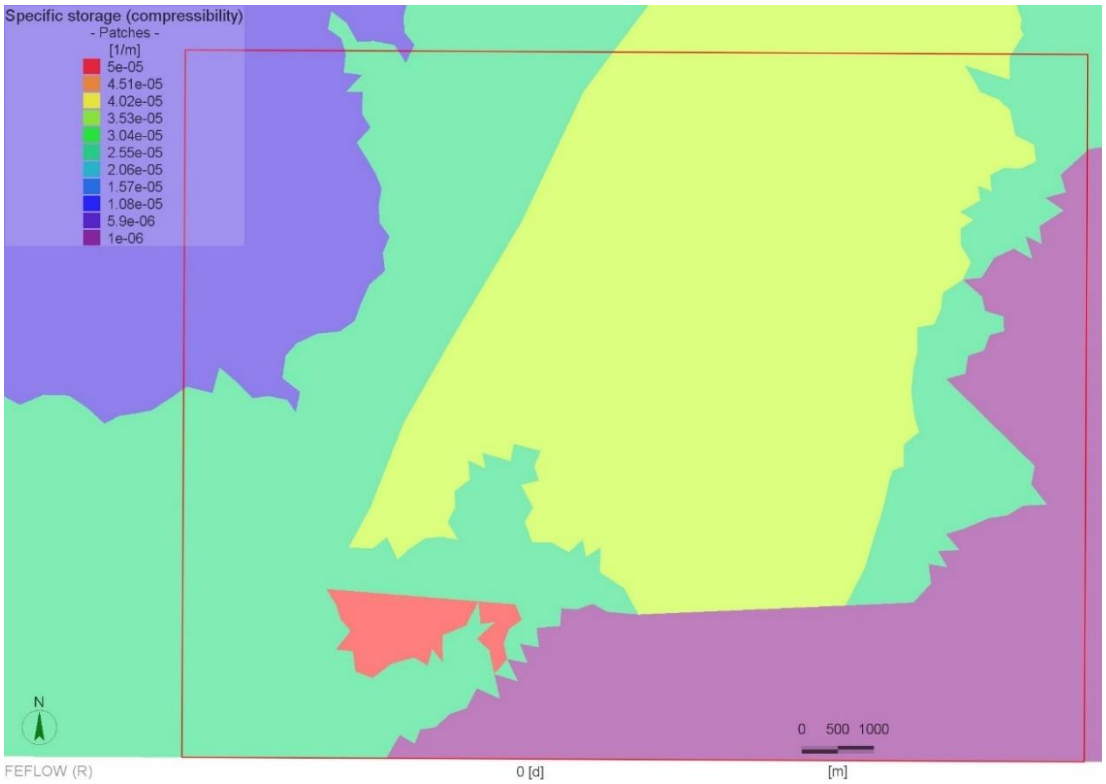
35. ábra: A 3. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



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



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



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

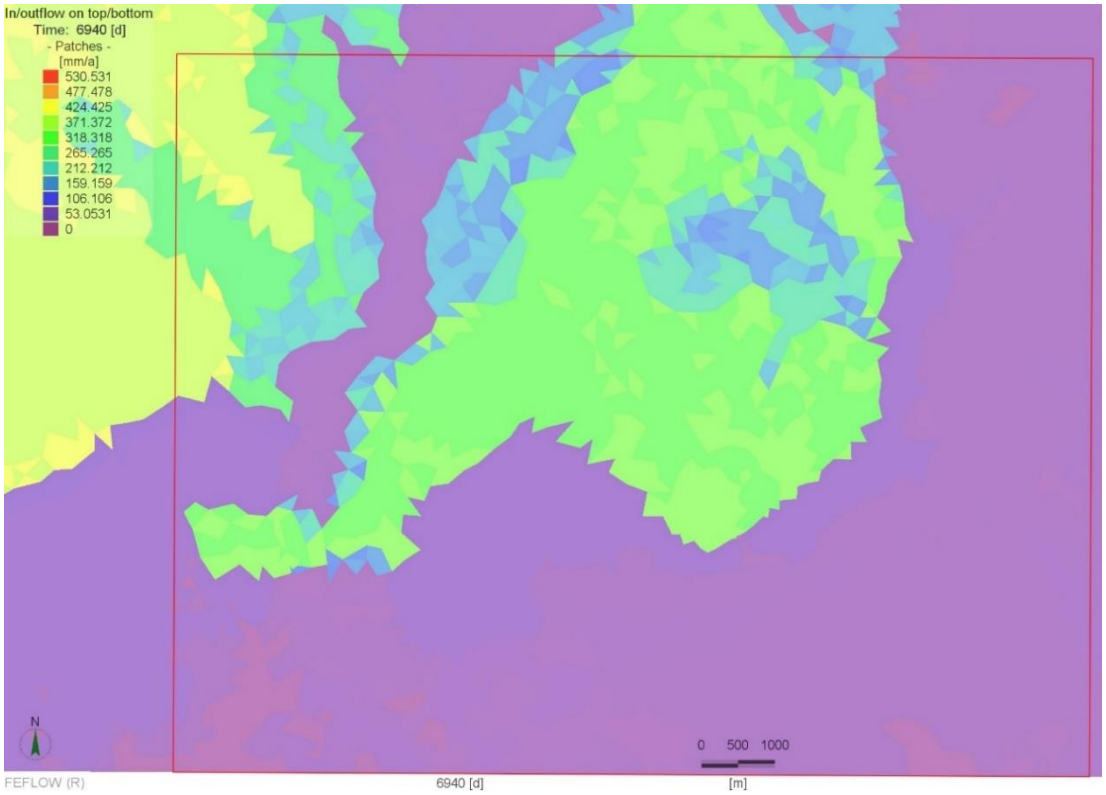
3.3.3 Beszivárgás a numerikus modell felszínén

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

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

A beszivárgás számítása a Dunántúli-középhegységben található csapadékállomások adatai alapján készült, melyek azonban nem reprezentálják teljes egészében a középhegység minden részegységének beszivárgási sajátosságait. Ez alapján a HELP szoftver által kapott értékeket kalibráció során arányosan változtatni kellett bizonyos területeken, ha a modellezett karsztvízszintek nem adták ki a területre jellemző mért értékeket. A Csór lokális modellterületen két fő beszivárgási terület található: a Csór és Fehérvárcsurgó között elhelyezkedő nyílt karsztos terület, valamint ÉNy-ról belóg a modellterületre a Tési-fennsíkot magába foglaló nyílt karsztos beszivárgási zóna. Ez előbbi a sólyi, míg utóbbi már a bakonynánai meteorológia állomás, a beszivárgás számításnál figyelembe vett zónájába tartozik. Ezen állomások adatai alapján a Tési-fennsíkot viszonylag nagy mennyiségű csapadék éri el, ezzel összhangban a területet megnövekedett beszivárgás jellemzi. A kalibráció során szükségessé vált a HELP szoftver által erre a területre számolt értékeket az itt található megfigyelő kutak vízszintértékei alapján tovább növelni. A beszivárgás emelést több lépcsőben végeztük el olyan módon, hogy először a Tési-fennsíkhoz tartozó teljes beszivárgási felületen (nyílt karszt) a megadott érték 120%-át vettük. Ezt követően pedig már nem az egész nyílt karszton, csak annak a magasan fekvő részei által körül határolt poligonon belül a kevésbé csapadékos évek (pl.: 2011) beszivárgás értékeit további 120%-kal növeltük.

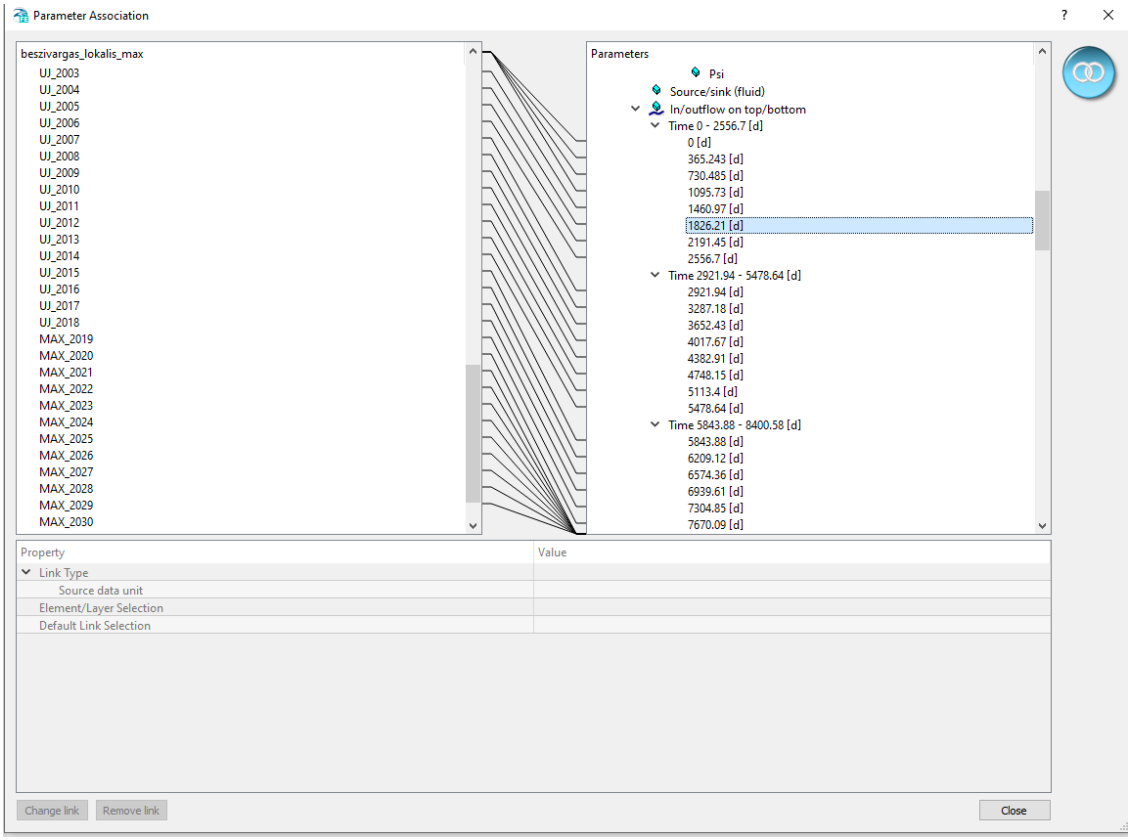
A beszivárgást az 1. numerikus felszínre adtuk meg, a cellák teljes területére, „inflow on top” paranccsal (***39. ábra***).



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

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

Az ***40. 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.



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

3.3.4 A diszkrét elemek a numerikus modellben

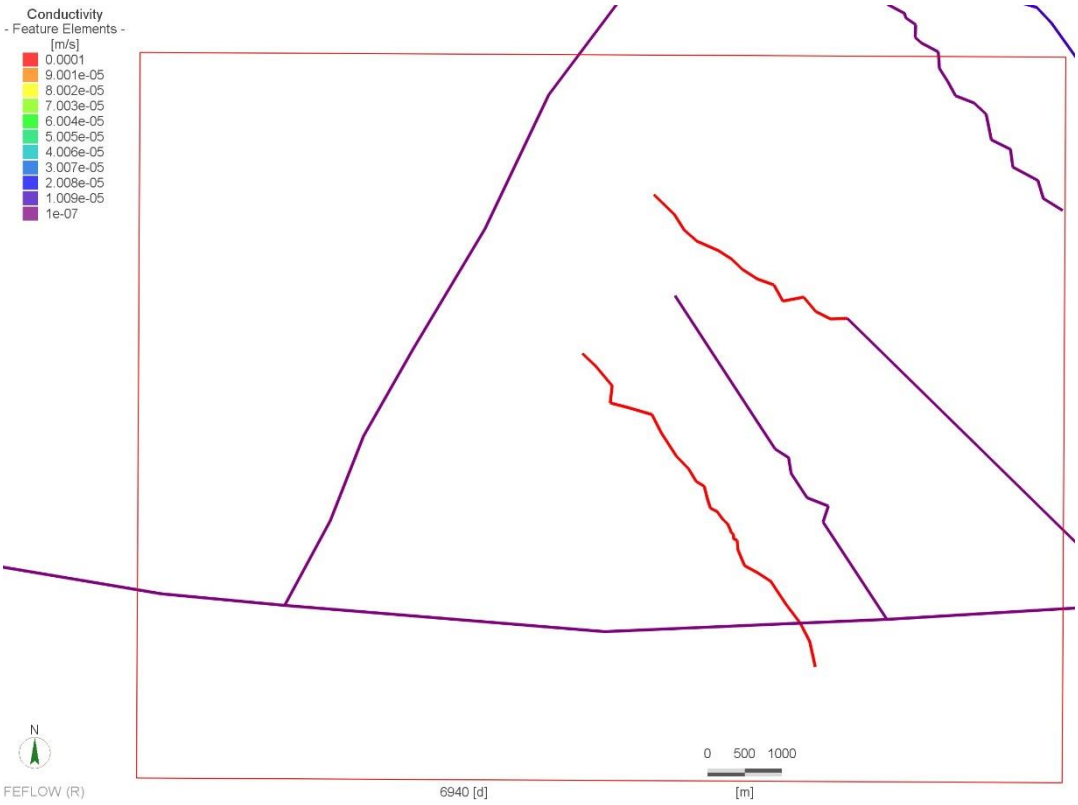
A dunántúli-középhegységi áramlások szimulációja nem készíthető el a térségre jellemző vetőrendszerek leképezése nélkül. A szerkezeti felépítéshez a MÁFI M=1:500 000 méretarányú Magyarország prekainoozos földtani térképét [12], valamint a pretercier földtani térképet [13] használtuk.

A vetők a teljes modellt átszelő 2D-s vertikális elemekkel adtuk meg. A paraméterezés első lépésben a ***6. táblázatban*** összefoglaltak alapján történt meg. Az 1D- és 2D-s elemek hidraulikai paramétereinek meghatározása, szintén kalibrációs feladat volt. Ennek eredményeként a vetők vastagság és szivárgási tényező értékei a megfelelő vízszinteloszlás kialakítása szerint változtak, így a különböző vetők vastagsága 1-10 méter között változnak.

A vetők hidraulikai szempontból rendkívül eltérő módon viselkedhetnek (akár egyazon szerkezeti elemen belül), így a kalibrált modellben a vetők szivárgási tényező értéke is széles skála között mozog. Hidraulikai szempontból megkülönböztetünk vezető és záró vetőket. Az elnevezés a kőzetvázhoz képesti viszonyukat jelöli. A vezető vetők koncentráltabb áramlást biztosítanak. A záró vető megoszthatja az egyébként hidraulikailag egységes részeket. A vetők viselkedése függ attól is, hogy az áramlási irányra párhuzamosak vagy merőlegesek. Nem csak a különböző vetők rendelkezhetnek különböző paraméter értékekkel, de egyazon vetőn a mélység függvényében is viselkedhet hidraulikailag eltérő módon, így ez alapján, ahol szükséges volt különböző paraméter értékekkel láttuk el a szerkezeti elemeket (***41. ábra***).

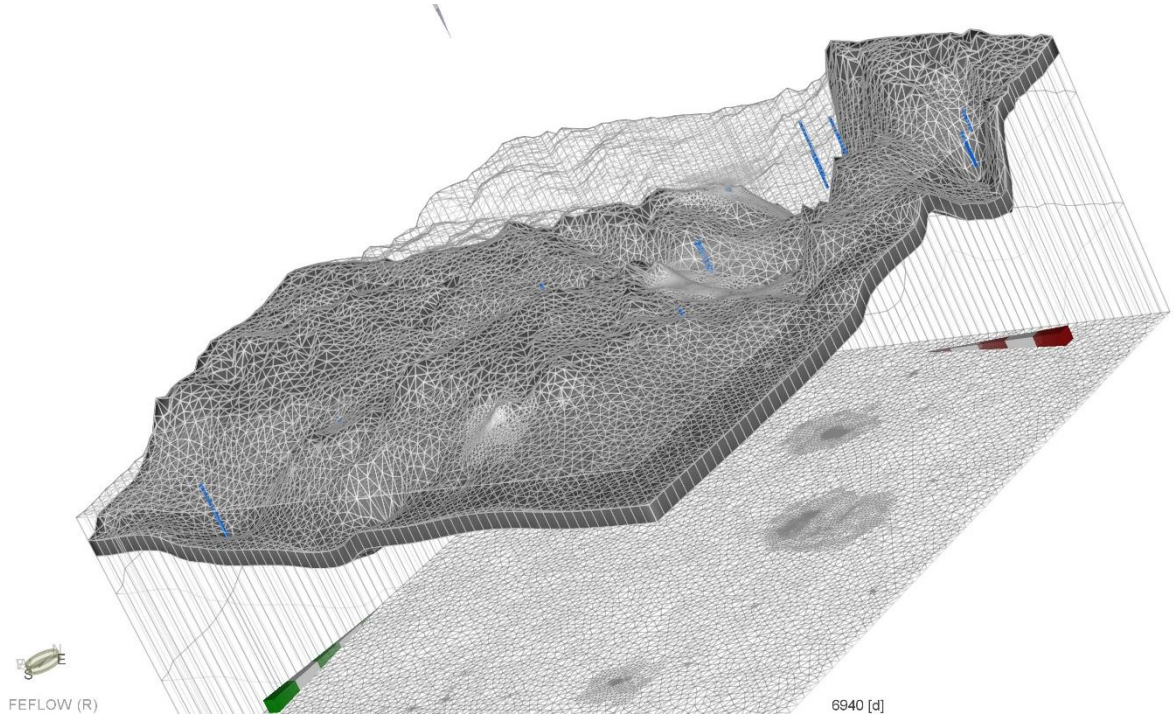
6. táblázat: A szerkezeti elemek hidraulikai paraméterei

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



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

A numerikus modellben modellezés technikai megoldásképpen 1D-s elemek használatával teremtettük meg a közvetlen kapcsolatot az 1. numerikus felszínre definiált források (***3.4.1. fejezet***) és a főkarsztot képviselő 5. réteg között (***42. ábra***).



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

3.4 Peremfeltételek a numerikus modellben

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

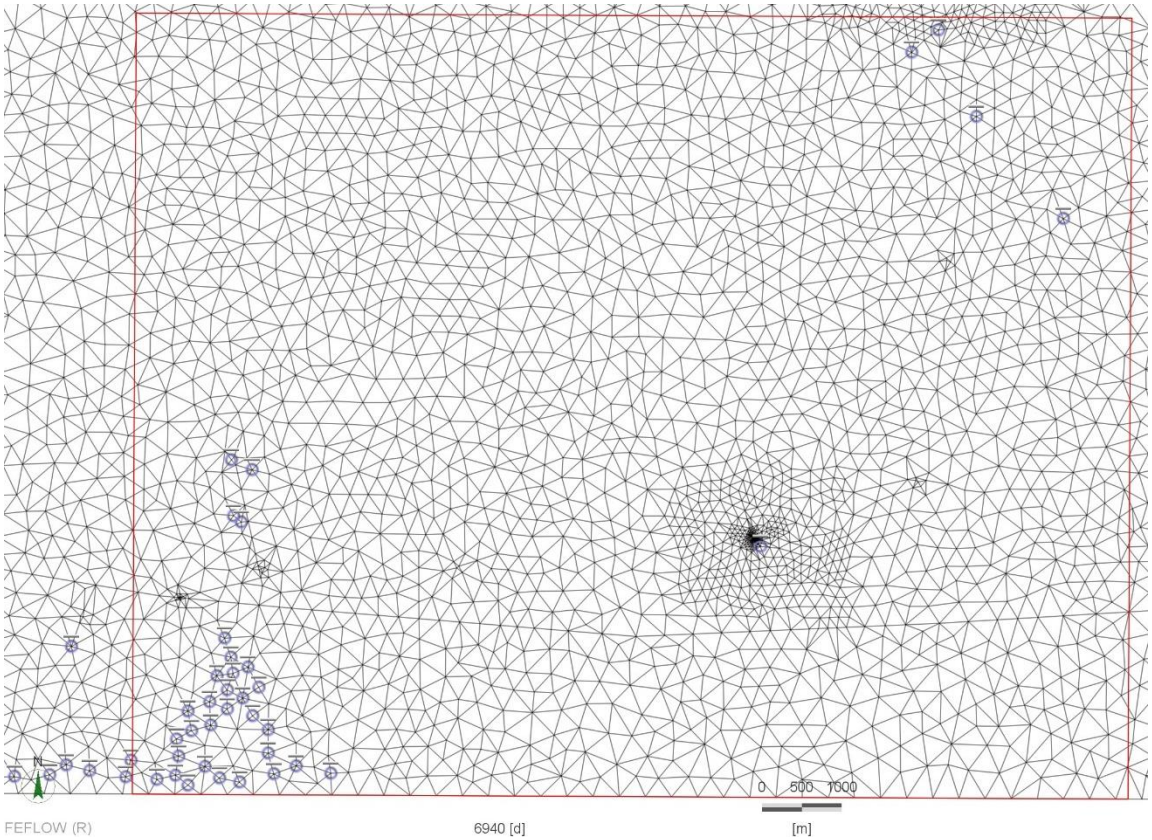
A modellezett területen természetes megcsapolók a források, vízfolyások, patakok, melyeket kötött peremként adtunk meg. Így a megcsapolódó vízhozamot a program számítja a vízszint, a fakadási szint és az átszivárgási együttható alapján. Mesterséges megcsapolóknak a kutas vízkivételeket tekintjük.

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

3.4.1 1. típusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel

A modellterület felmért forrásait fakadási szintjeikkel határoztuk meg az 1. numerikus felszínre, azzal a kitétellel, hogy mindenképp kifolyóként kell viselkedniük. A modellterületen lévő nagyobb állóvizes/vizenyős területként adtuk meg a várpalotai bányasüllyedékes tavak szintjét, amely a 10 m-es ddm alapján került meghatározásra. A termelő forrásvízműveket szintén fakadási szintekkel definiáltuk (***43. ábra***).

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

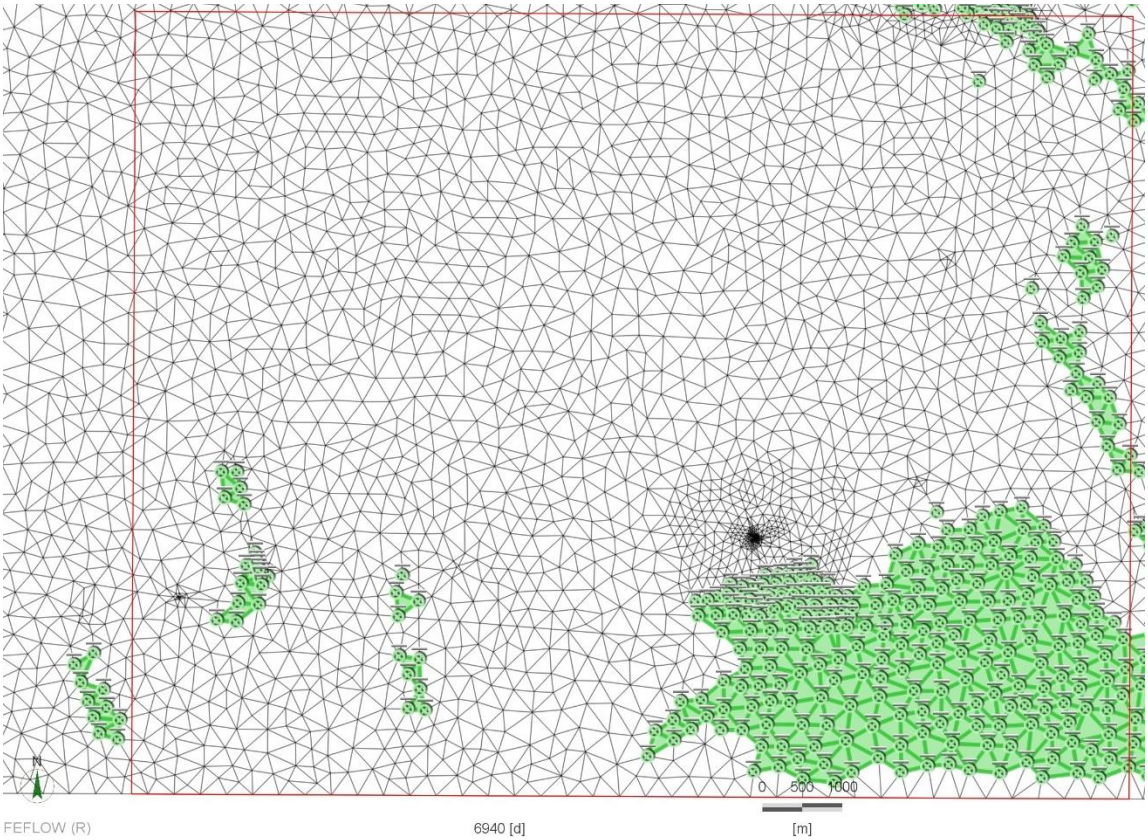


43. ábra: A numerikus modellben szereplő 1.tipusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel

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 DDM alapján adtuk meg. Hasonló módon, a 10 m-es ddm alapján került beépítésre a lokális modellbe Sárrét, mely nagy kiterjedésű mocsaras terület (***44. ábra***).

A kontrollálatlan hozambeáramlás miatt a peremfeltételt korlátoztuk, csak fakadást engedélyeztünk. Az átszivárgási együttható egységesen 0,04 1/nap.



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

3.4.3 4. típusú (Well)-Kút peremfeltétel

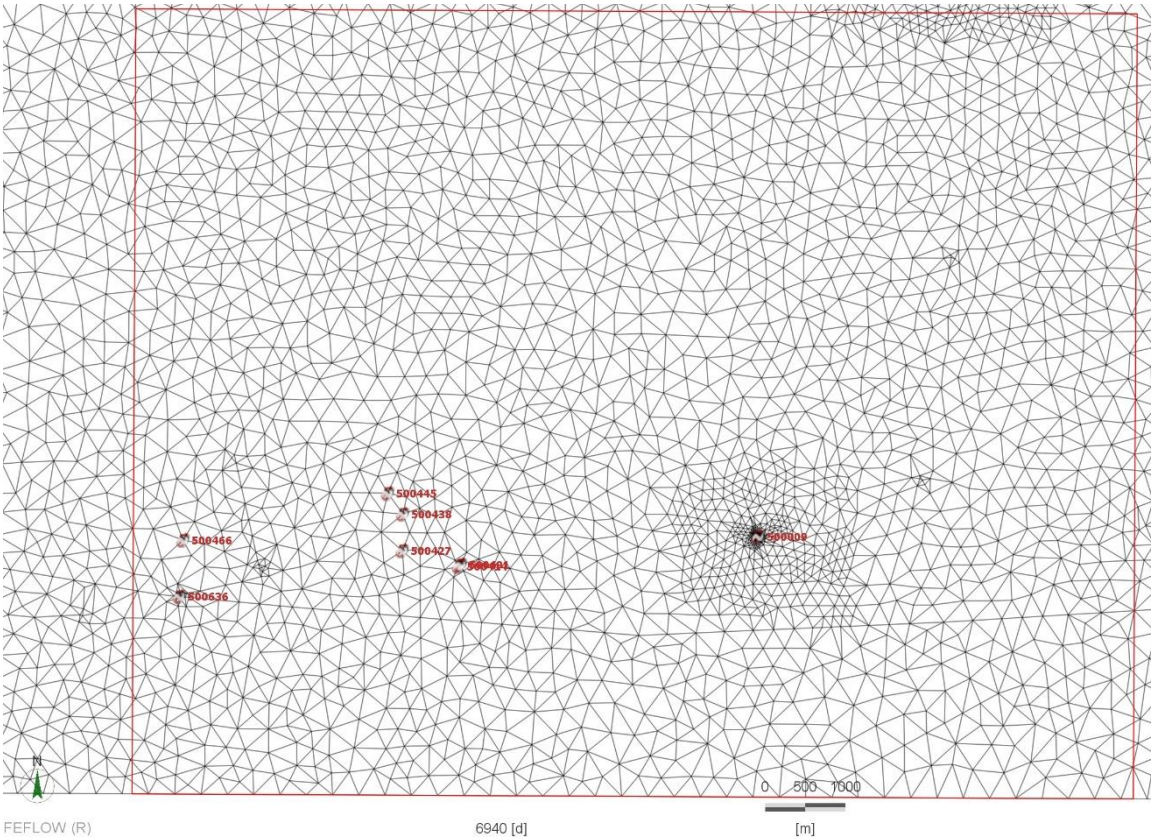
A termelő kutakat adott hozamú peremekként határoztuk meg (Well). A modellezés során az éves vízkivételeket m^3/nap-ra leosztva adtuk meg.

A numerikus modellben a következő termelőobjektumok szerepelnek:

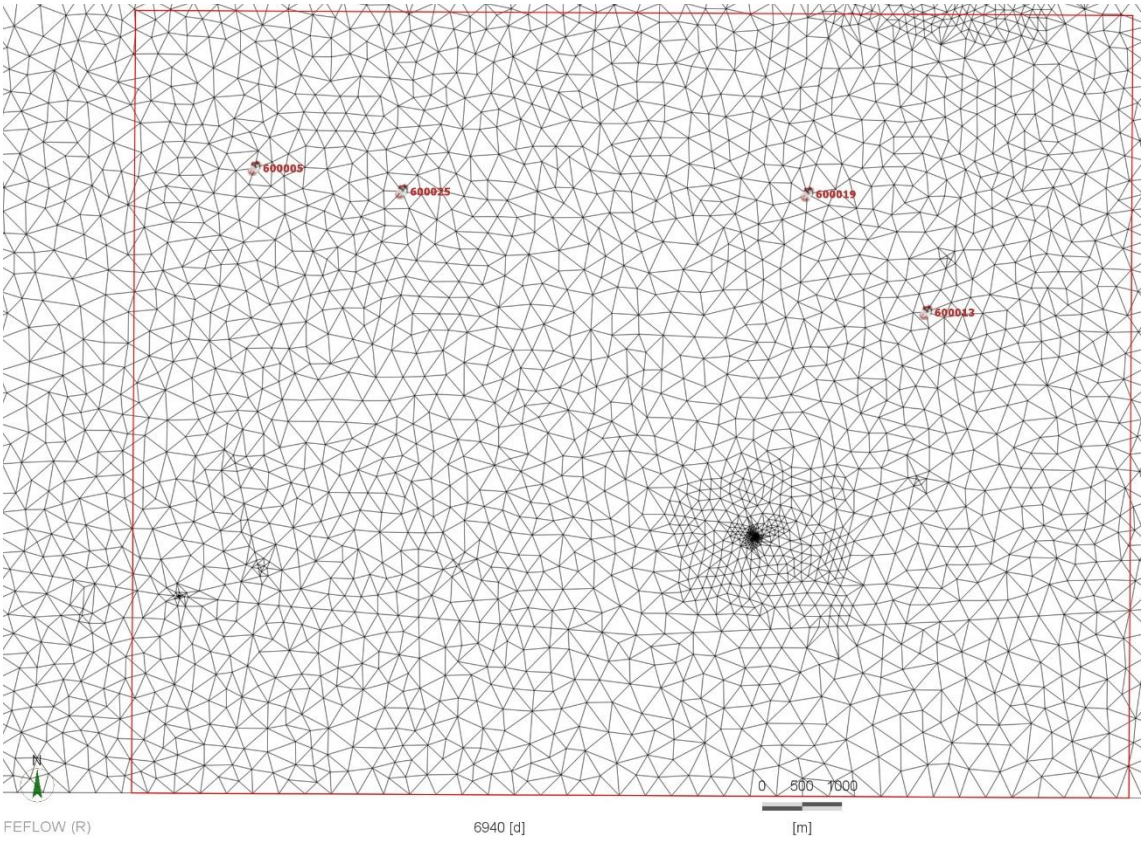
- A karsztot, illetve a fedőt megcsapoló termelőobjektumok, amelyekből van termelési adat 2003-2020 között.

A főkarsztvíztárolót megcsapoló objektumok termelését megadó peremfeltételek az 5 és 6. numerikus rétegekbe kerültek beépítésre (***45-46.*** ábra). A legtöbb vízkivétel az 5. rétegből valósul meg.

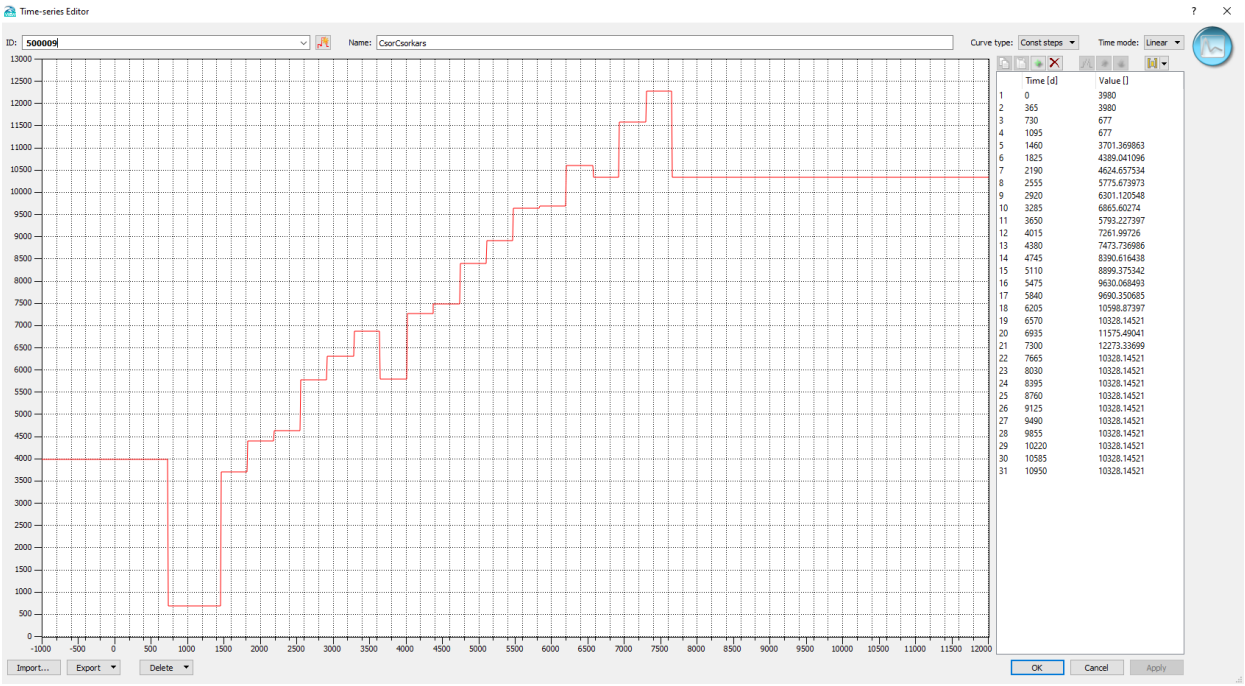
A tranziens modellben a vízkivételeket éves időlépcsővel, lépcsős függvénnyel definiáltuk (***47. ábra***). Ez azt jelenti, hogy az adott évre megadott termelést a rákövetkező évig tartja a modell. Azokat az időszakokat is figyelembe vettük, amikor a kutak nem termeltek. A regionális modellhez képest (a regionális modellnél a termelési adatszolgáltatás 2018 év végével zárult) termelési idősorokat kiegészítettük a VIZIG 2019-2020 adatszolgáltatásával, azonban a prognosztizált időszakra a kutak a 2018. évi tényleges vízkivételével kalkuláltunk, akárcsak a regionális modellben.



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



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



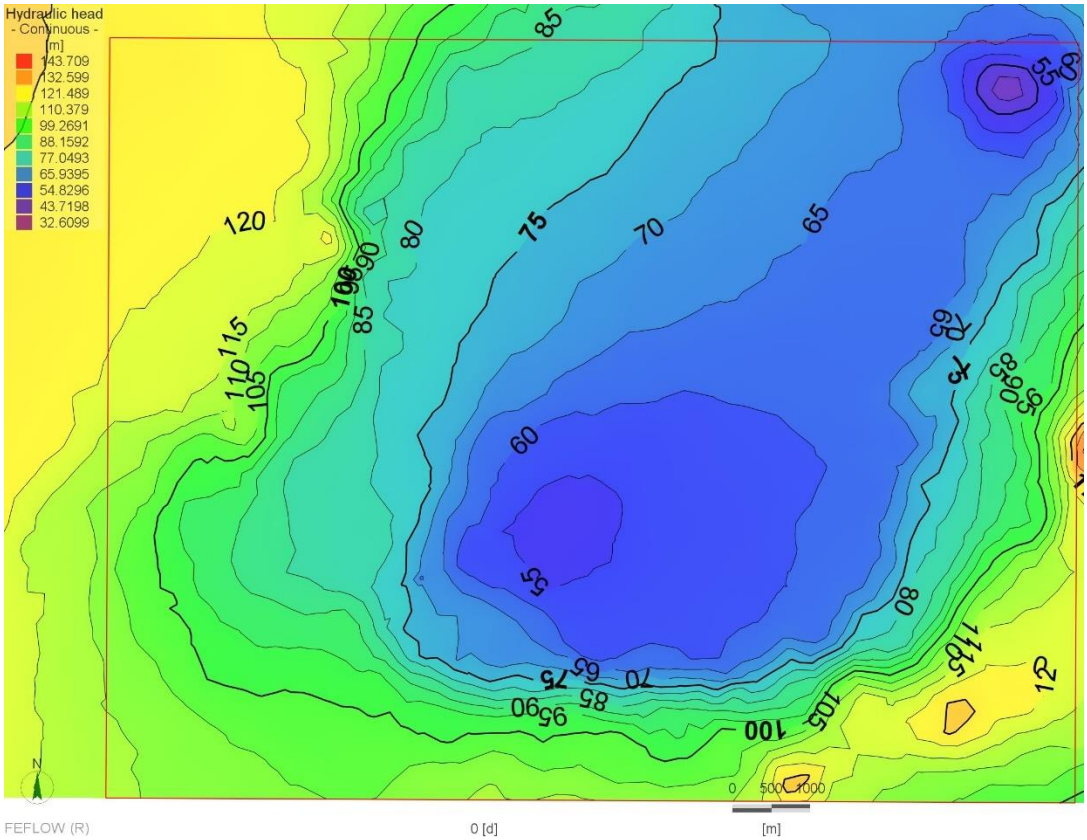
47. ábra: A vízkivételek modellbeli leképezése Csór karasztakna példáján

3.5 A tranziens modellezés

3.5.1 A tranziens modellezés kezdeti feltételei

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

A lokális tranziens modell kezdeti vízszintjeinek meghatározása az elkészült Dunántúli-középhegység regionális modell eredményeire épül. A kezdeti vízszintek a regionális modell kötött vízszintekkel futtatott verziójának 2000.01.01-re kinyert vízszinteloszlás értékeit tartalmazza (***48. ábra***). Ez alapján modellben megadott összes monitoring kút vízszintje a bennük mért vízszint értéknek felel meg, a közöttük lévő vízszinteloszlást a modell kalkulálja.



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

3.5.2 A tranziens modell időléptéke

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

3.5.3 A numerikus modell kalibrálása

3.5.3.1 A karsztvízszint kalibrálása a 2019 állapotra

A Csór-Fehérvárcsurgó-Bodajk összevont modellterületen 11 db karsztvízszint megfigyelő kút található. Ebből 6 db esik Csór lokális modellterület határán belülre, valamint 1 db kút (Tés-1, Királyszállás) található a modellterület határán kívül, de annak viszonylagos közelségében (***49. ábra***).

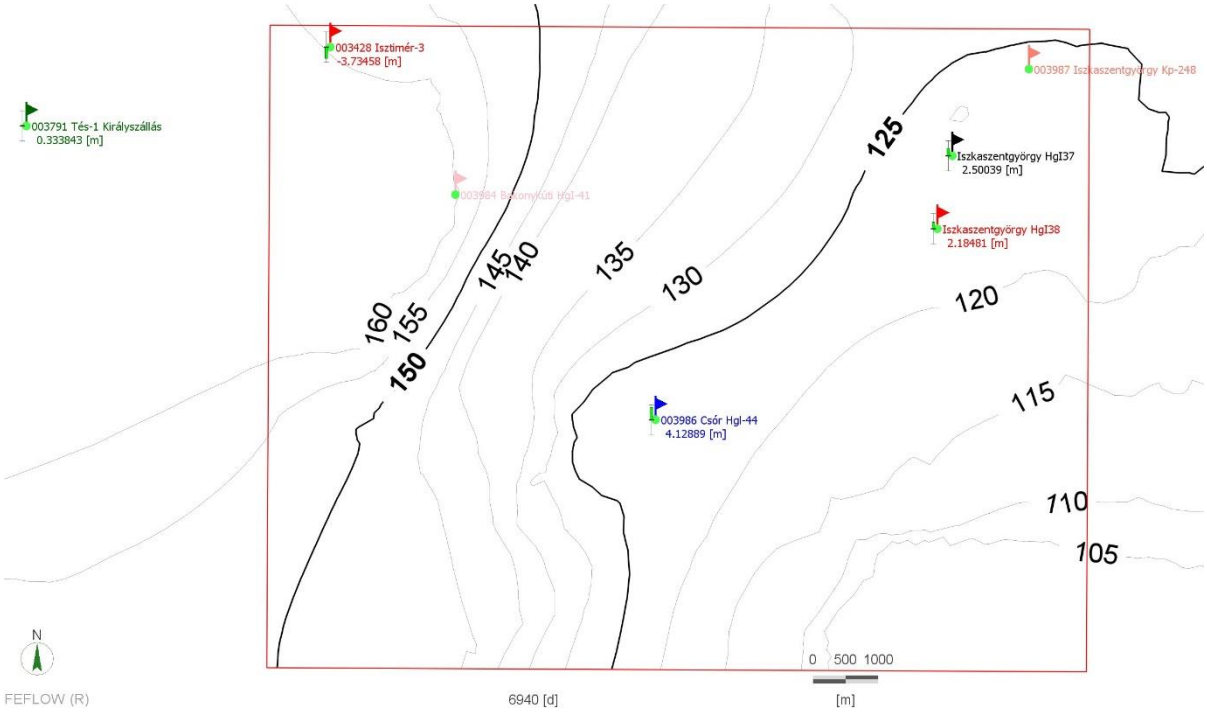
A Csór-Fehérvárcsurgó-Bodajk összevont modell, a három lokális modell (Csór, Fehérvárcsurgó, Bodajk) területét teljes egészében magába foglalja. Mivel 1-1 lokális modell területen meglehetősen kevés monitoring kút található, célszerűnek láttuk az összevont modell egységes kalibrálását az itt található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

A mért vízszinteket havi időlépcsővel hívtuk be a modellbe, minden hónap első mért értéke került be. A tranziens modell kalibrálását a 2019-es januári állapotra végeztük el. A területen található 2 db kútból (Bakonykúti HgI-41 és Iszkaszentgyörgy Kp-248) nem rendelkezünk 2019. januári eleji mért

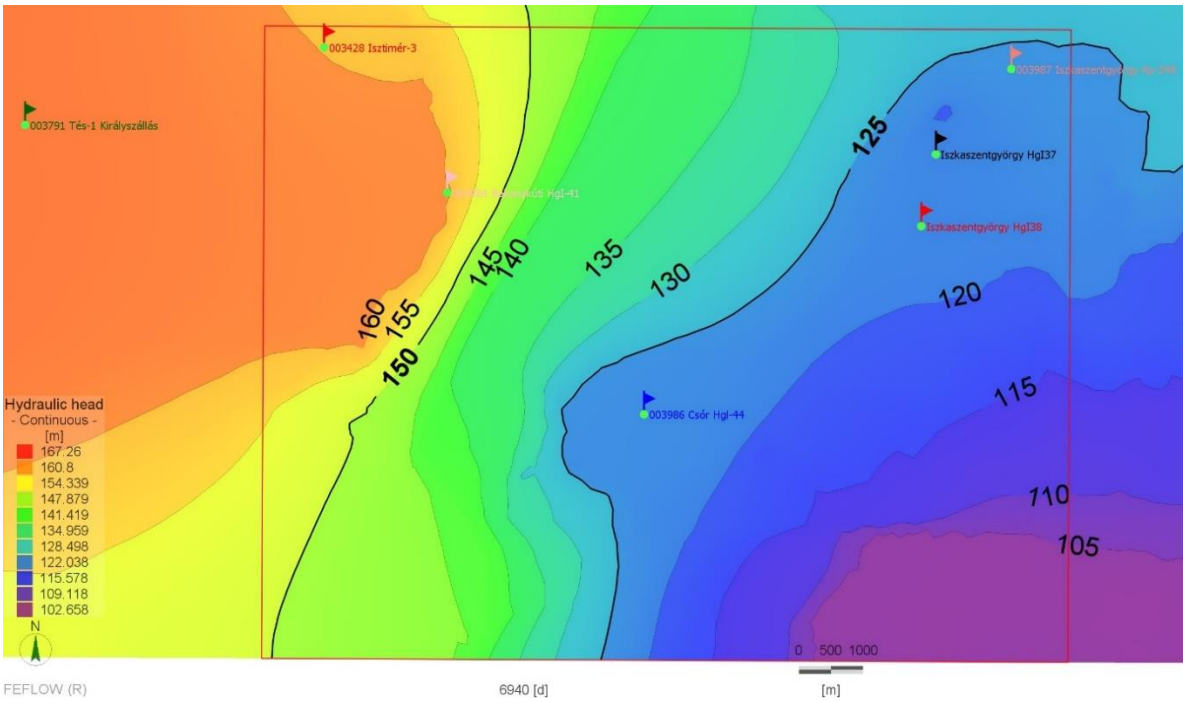
adattal, így azok kalibrációja 2018. novemberre történt meg. A továbbiakban a bemutatás 5 db kút esetén ez előbbi, míg a 2 db kút esetén ez utóbbi időpontra vonatkozik.

A 2019-es állapotra modellezett karsztvízszintet a ***50. ábra*** mutatja.

Az egyes monitoring kutakban mért és számított vízszint összehasonlítását a 2019-es állapotra a ***7. táblázat*** mutatja be. Ezek alapján Csór lokális modellterületen a modellezett karsztvízszint 5 m-es toleranciahatáron belül van.



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



50. ábra: A numerikus modell számított karsztvízszint eloszlása 2019. január 01-i állapotra (mBf)

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

Monitoring kút neve	Mért vízszint (mBf)	Modellezett vízszint (mBf)	Különbség (m)
3428 Isztimér-3	163,58	159,85	-3,73
3984 Bakonykúti HgI-41	159,91	160,83	+0,92
3986 Csór HgI-44	159,97	160,33	+0,36
3987 Iszkaszentgyörgy Kp-248	120,27	124,37	+4,10
Iszkaszentgyörgy HgI-37	118,73	121,23	+2,50
Iszkaszentgyörgy HgI-38	119,07	121,26	+2,18
3791 Tés-1, Királyszállás	164,05	164,38	+0,33

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

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

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

Összefoglalva az eltérés okai a következők lehetnek:

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

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

A projekt egyik legfontosabb feladata a prognózis, különböző hidrometeorológiai viszonyok bekövetkezése esetén kialakuló állapotok vizsgálata, összehasonlítása. Az ilyen komparatív vizsgálatok során a modellek korábban felsorolt jellegű állandó hibái okozta hatások kiesnek, ilyen módon a modell a felvetett kérdésekre várhatóan jó és jól értelmezhető válaszokat fog adni. A modell

„jóságát” az adja meg, hogy az eltérő jövőbeli állapotok esetére számolt eredmények milyen mértékben logikusak és milyen mértékben értelmezhetőek.

3.5.3.2 Az üzemi vízszintek kalibrálása a 2019 állapotra

A Csór lokális modellterület legfontosabb vízkivételi helye a csóri vízakna. A csóri vízakna üzemi vízszint adatait az OVF bocsátotta rendelkezésünkre 2005-2018 közötti időszakra az OSAP adatszolgáltatás alapján. Az utolsó mért üzemi vízszintadat 2018. decemberéből állt rendelkezésünkre, így a mért és számított adat összehasonlítása erre az időpontra történt meg. Az adatbázis alapján a mért üzemi vízszint 115,93 mBf volt, míg a modellel kalkulált érték 116,77 mBf. A mért és számított érték közötti eltérés 0,84 méter.

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

4. A LOKÁLIS MODELLEZÉS EREDMÉNYEI

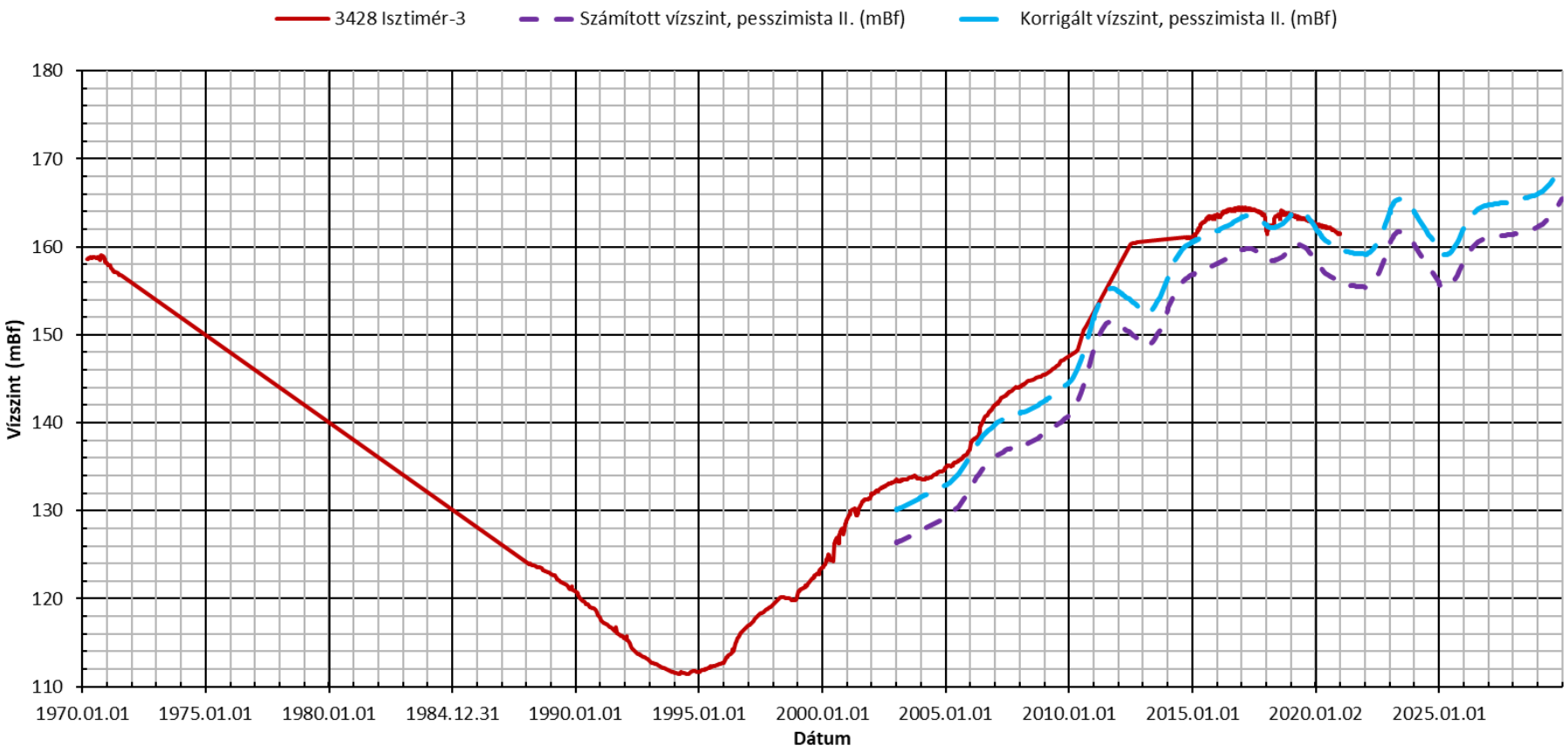
4.1 A 2019-es állapot

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

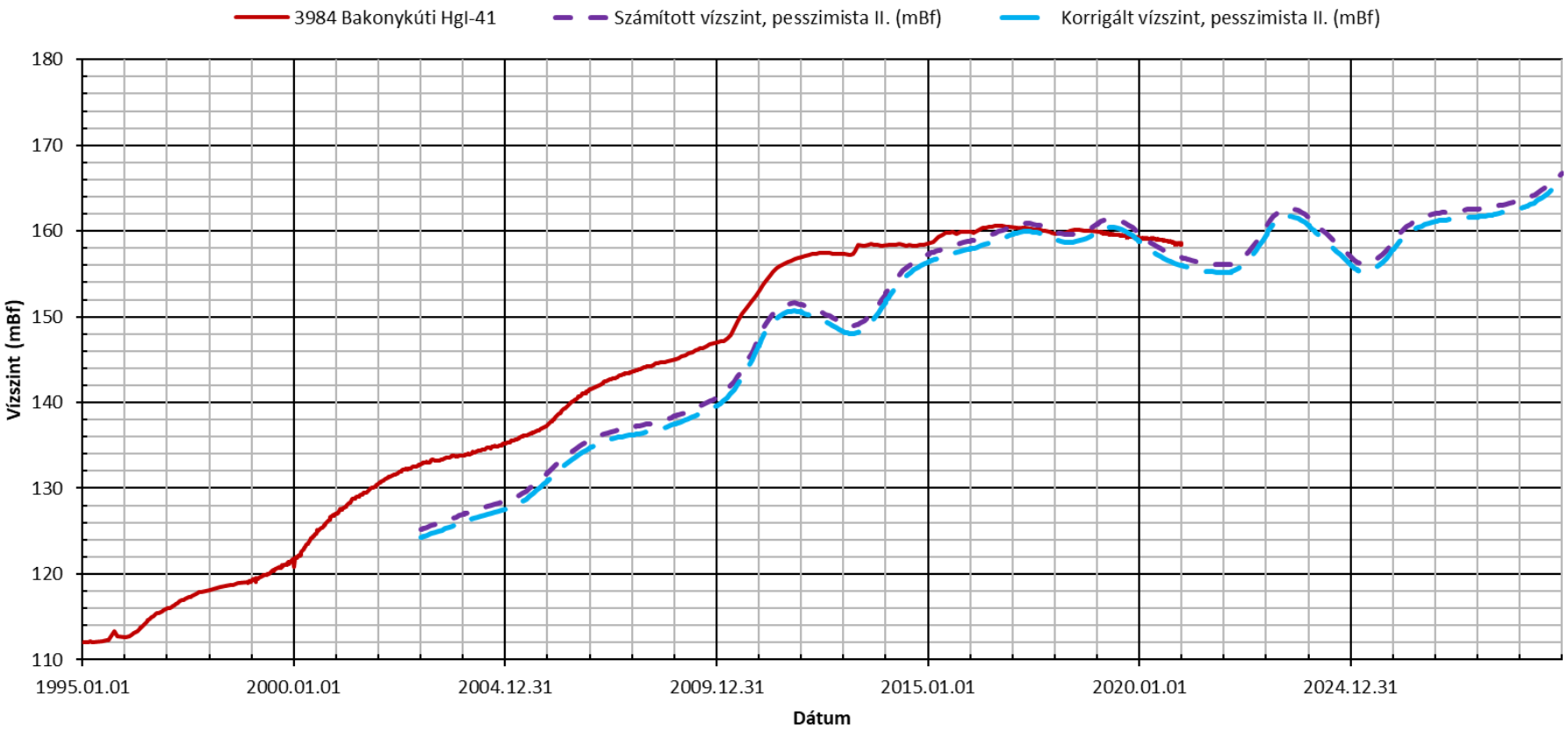
A Csór lokális modellterületen 6 db olyan megfigyelő kút található, melyből rendelkezünk mért vízszint adatokkal. Emellett Tés-1 kút is a terület viszonylagos közelében helyezkedik el. A modell által leképezett karsztrendszer működését jól szemléltetik a modellezett és mért vízszint idősorok összevetése. A modellezett számított és a törzshálózati kutakban mért vízszint idősorokat mutatja be az ***51. ábra-57. ábra***. Az ábrákon piros vonal szemlélteti a mért vízszint adatokat, míg a számított vízszintek lila szaggatott vonallal vannak jelölve. A 2030-ra előrejelzett vízszintek (lásd ***4.2. fejezet***) minél pontosabb meghatározása érdekében a számított vízszintek korrigálásra kerültek a 2019. januárra mért és modellezett vízszintek különbségének értékével, melynek eredményét kék szaggatott vonal jelöli.

A lokális modellezés időperiódusa rövidebb volt, mint a regionálisé, 2000-tól kezdődve már csak a visszatöltődés periódusát szimulálta. Az adatok feldolgozása 2003-tól történt meg. A modellezett és mért vízszinteken a visszatöltődés folyamata így is jól látszódik. A visszatöltődés folyamatára jelentős hatással volt a 2010-es extrém csapadékos év, amikor a visszatöltődésben jelentős ugrás következett be. Ez elsősorban azokban a kutakban szembetűnő, amelyekben a beszivárgás ingadozása markánsabb hatással van a karsztvízszintre, azaz a nyílt karsztos területeken található kutakban (pl.: Tés-1, Királyszállás). A fedett helyzetben elhelyezkedő megfigyelőkutak vízszint idősorára kevéssé jellemző a csapadéknak megfelelő fluktuáció, utánpótlódásuk nem közvetlenül történik a beszivárgott csapadékból (pl.: Csór HgI-44). A vízszint idősorok lefutása nagyobb időléptéket tekintve (a modellezési időszak 17 éve alatt) a mért és számított görbék esetén azonos jellegű. A kezdeti szakaszban még egy gyorsabb visszatöltődés figyelhető meg, a vízszintek emelkedése nagyobb ütemű, melyet követően az emelkedés fokozatosan lelassul és a vízszintek a 2010-es évek végére kezdenek egyensúlyi állapotra beállni. 2019-re, ami a regionális modellezés referencia időpontja, a lokális modellel lehatárolt karsztvíztároló részben a karsztvízszint visszatöltődése kvázi befejeződött.

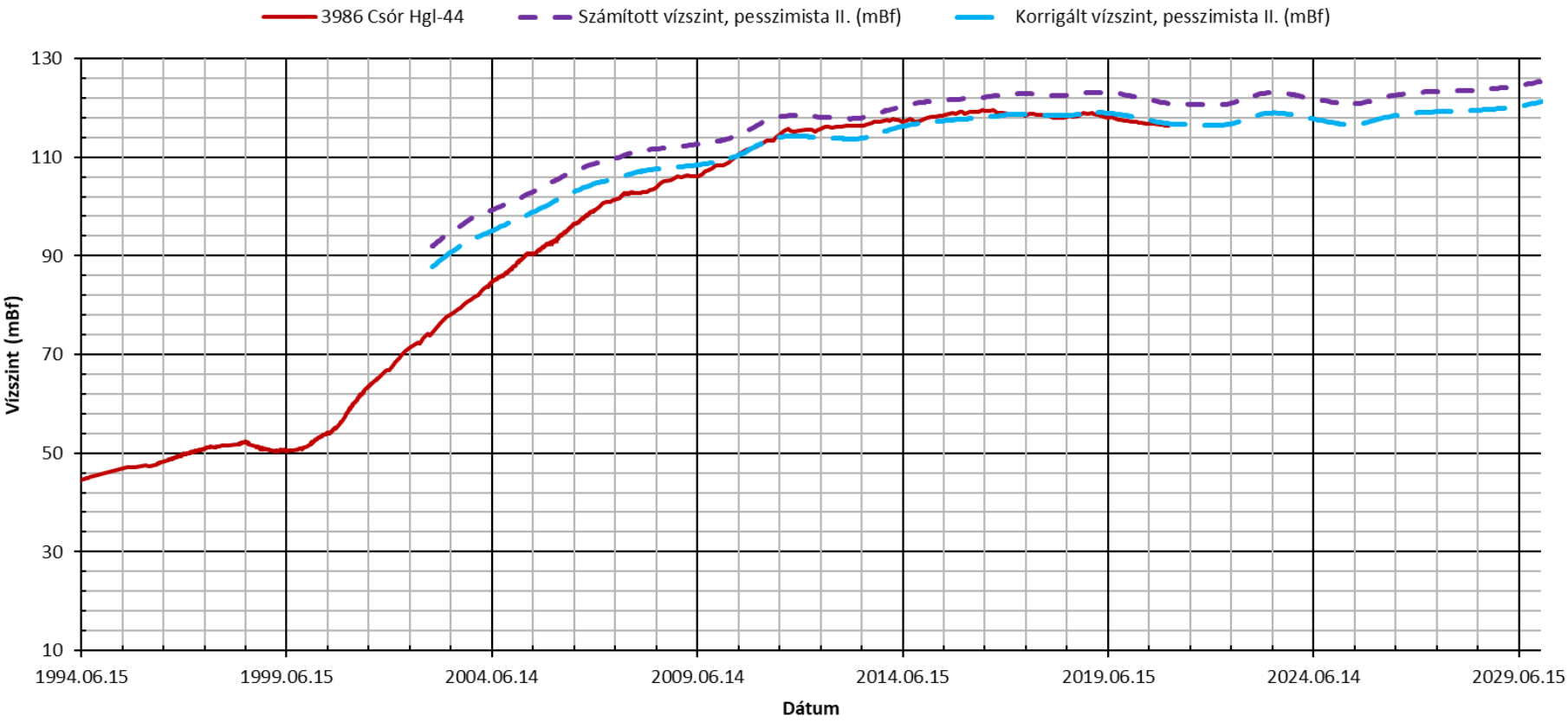
A vízszintek alakulását ezt követően várhatóan már nem a karsztvíz visszatöltődés jelensége, hanem a klimatikus viszonyoknak megfelelő csapadékesemények fogják befolyásolni, melynek hatása a fedetlen területeken várhatóan markánsabb lesz. Napjainkra új egyensúly alakult ki, ahol a feltöltődés folyamatát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



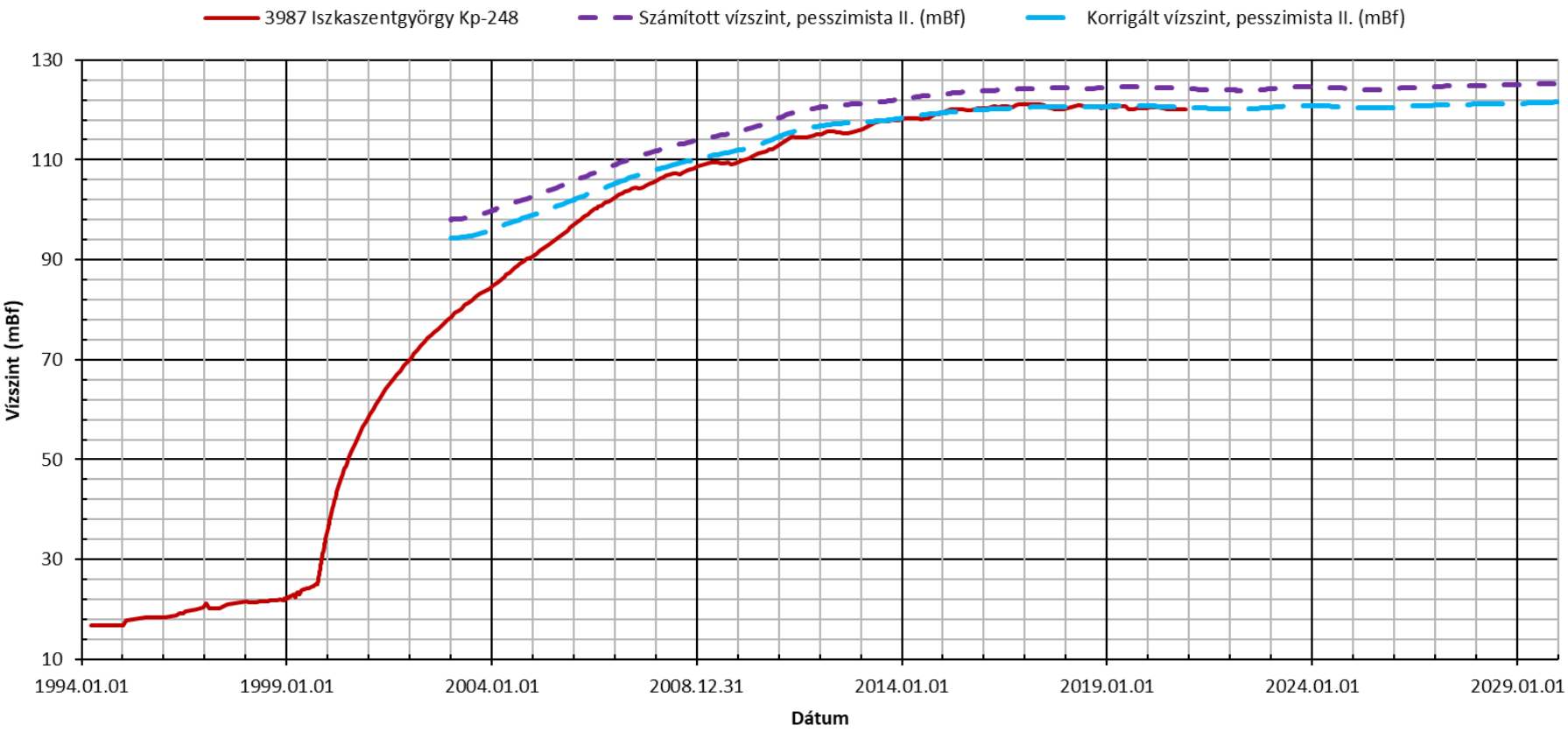
51. ábra: Az Isztimér-3 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió)



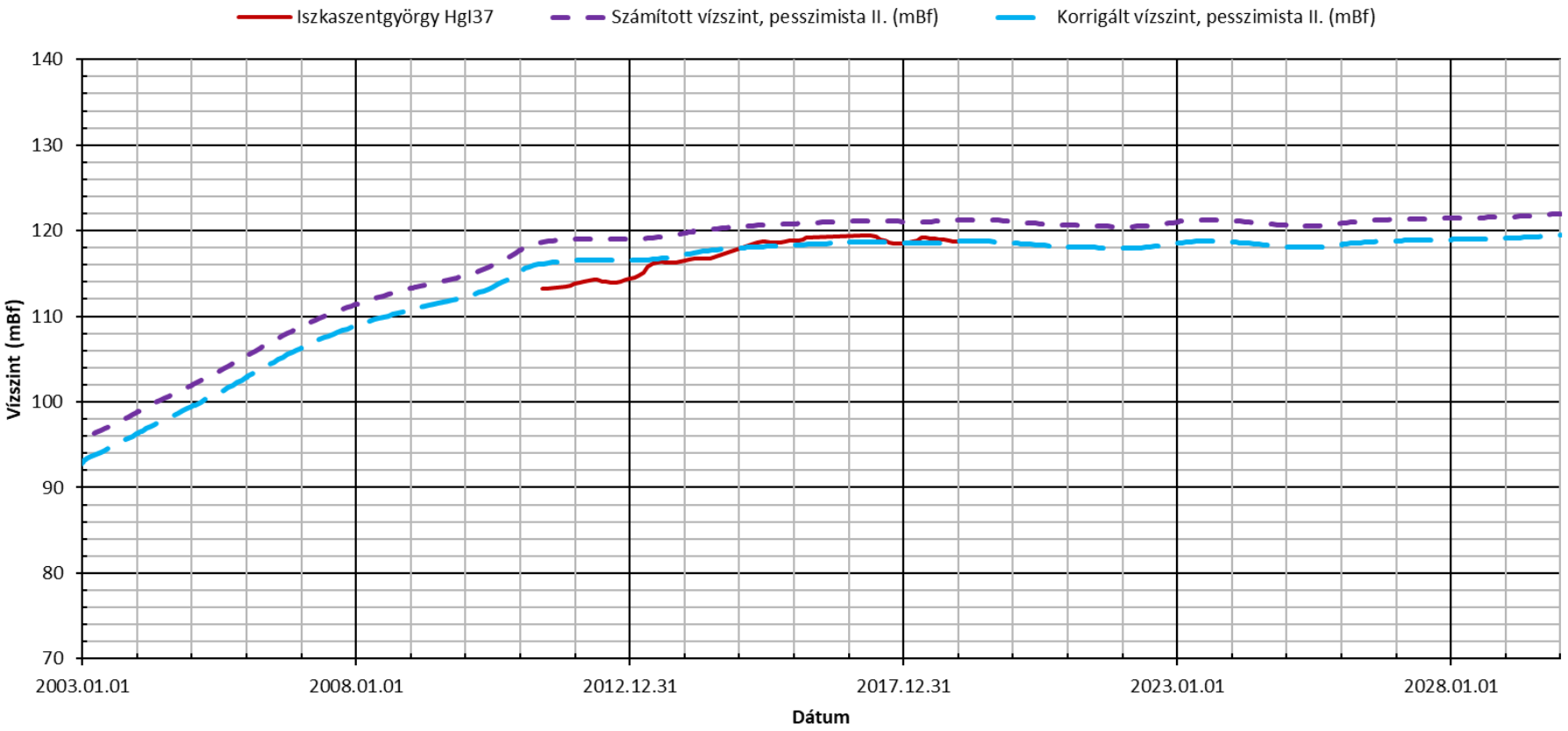
52. ábra: A Bakonykúti HgI-41 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió)



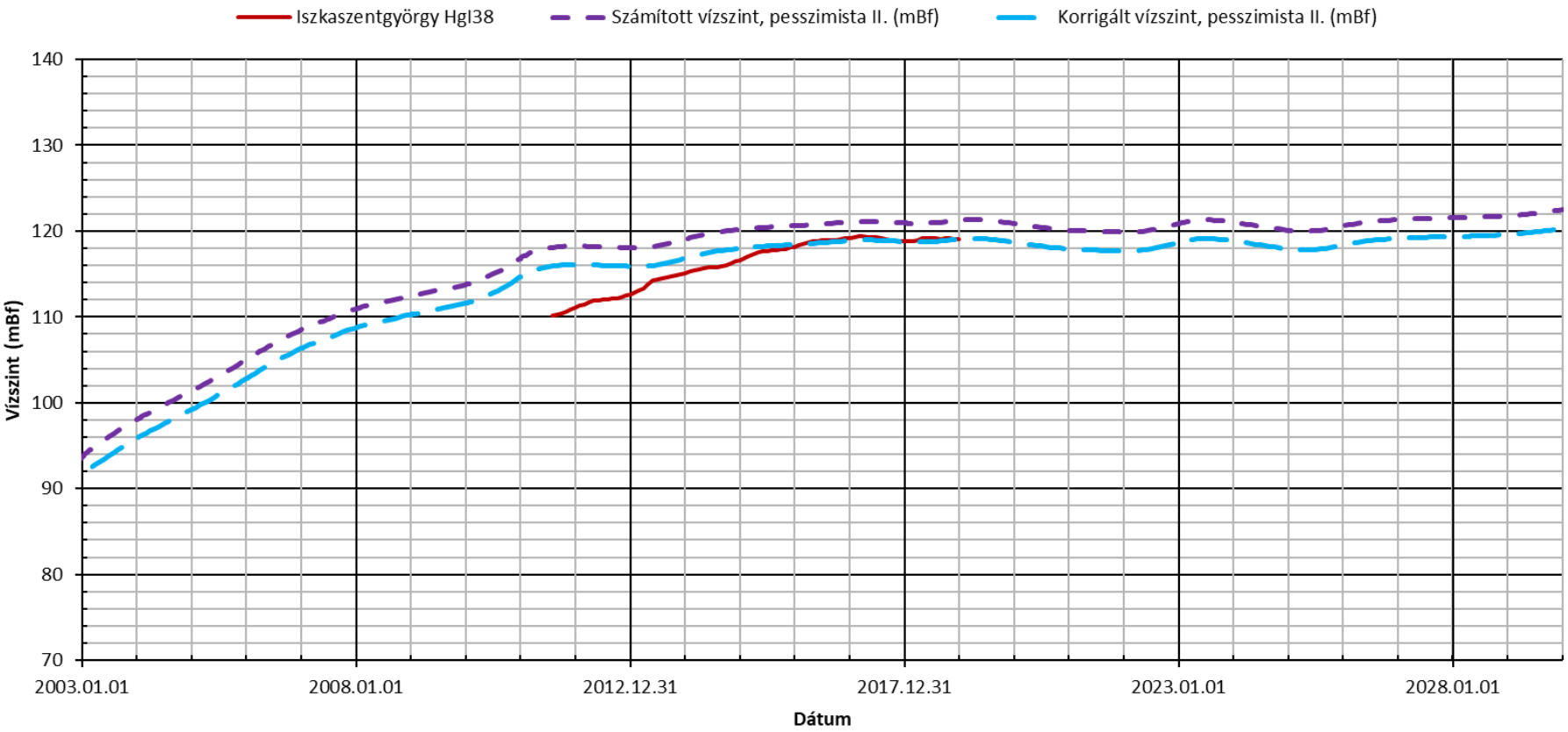
53. ábra: A Csór HgI-44 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió)



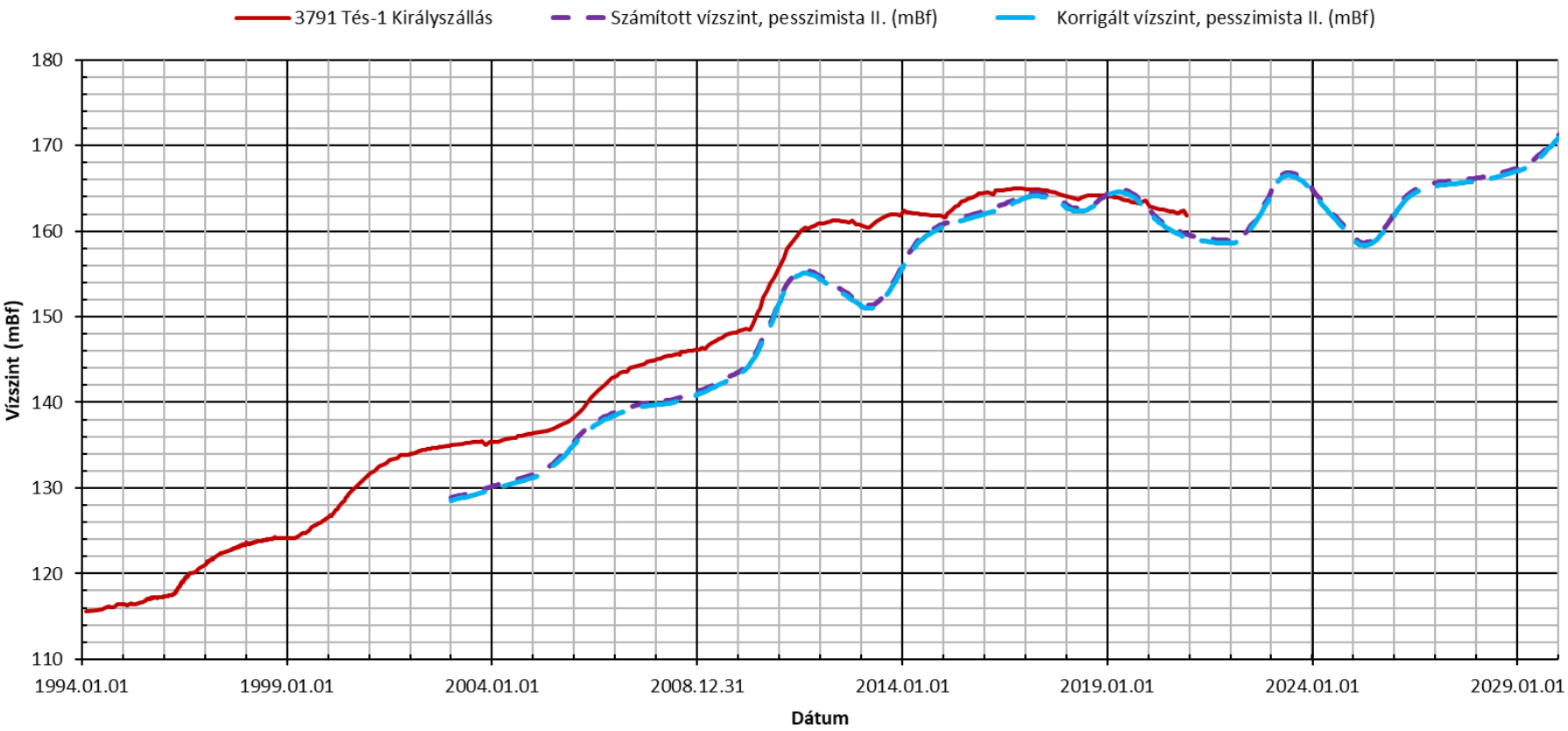
54. ábra: Az Iszkaszentgyörgy Kp-248 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió)



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



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



57. ábra: A Tés-1, Királyszállás monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett idősora (pesszimista 2. verzió)

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

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

A területen a vízáramlás Ny-ÉNy-i irányból, a Tési-fennsík felől történik. A terület DK-i része felé haladva a vízszintek egyre alacsonyabbak, Csór térségében 2019 elején 118-114 mBf körül alakulnak. A térség vízáramlására jelentős hatással van az azt DNy-ÉK-i irányban átszelő vető (Bakonykúti-feltolódás) amelynek vízrekesztő hatása miatt a hidraulikus gradiens a vető körüli sávban nagyobb (az izovonalak besűrűsödnek).

A visszatöltődés eredményeképpen az elapadt források újból működni kezdtek, illetve a hozamuk is egyre növekedett. Elsősorban lokális modellterület déli részén, Inota térségében jelentek meg kisebb hozamú források. Továbbá Csór térségében, Csabafővíz forrása számít jelentős forrásnak a területen, mely gyakorlatilag a csári vízmű területén található, így az itteni mindenkori vízkivétel nagyon erősen befolyásolja a forrás elapadását, illetve megindulását. A forrás hozama az 1950-es években még 15 000 m^3/nap körül alakult, jelenlegi hozama azonban a jelenleg is zajló vízkitermelés miatt ennél jóval alacsonyabb marad.

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

4.2 Prognózis 2030-ra

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

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

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

Az éghajlat változásának hosszútávú részletes elemzését, valamint a beszivárgás meghatározásának módszerét „A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése. KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Vízháztartási modellezés és

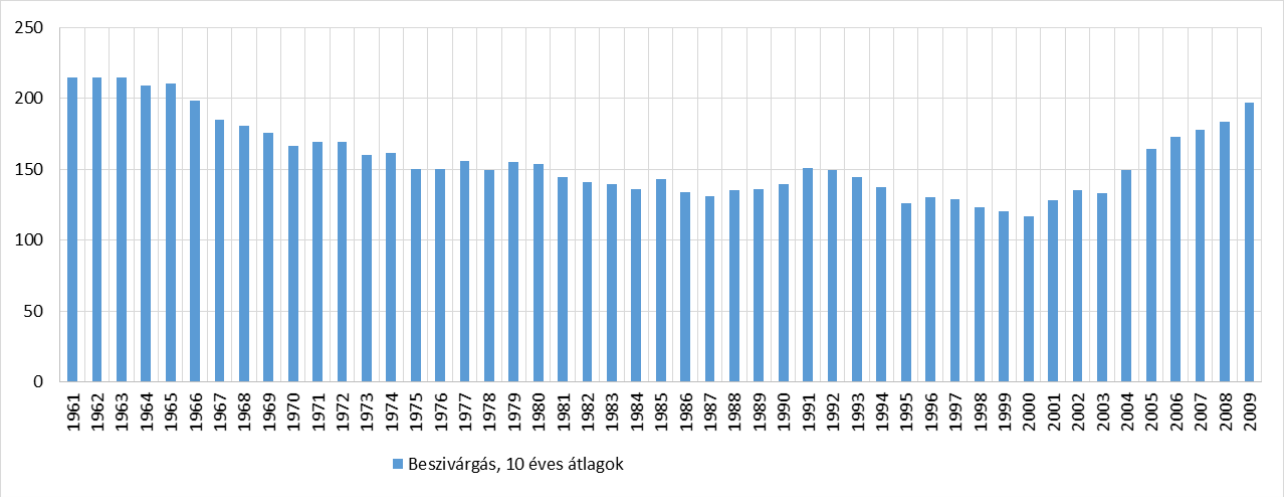
állapotértékelés – I. kötet. A vízháztartási modell alapjául szolgáló földtani modell és a vízmérleg elemeinek bemutatása, valamint a karsztvízszint hosszú távú alakulása" című jelentésben mutattuk be.

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

8. táblázat: A regionális modellezés során használt szcenáriók

	Pesszimista változat	Átlagos változat	Optimista változat
A változatok meghatározásának módja a módszertan szerint	10 éves legnagyobb beszivárgású időszak: 2006-2018	1980 – 2010 időszak éves átlag beszivárgás	10 éves legkisebb beszivárgású időszak: 1984-1993
A 2019-2030 időszakra ténylegesen modellezett beszivárgás	2007-2018 évek beszivárgásai	minden időlépcsőben a fenti módon számolt éves beszivárgás	1983-1994 évek beszivárgásai
Termelés figyelembe vétele a modellezésben	2018-as év tény vízkivétel	2018-as év tény vízkivétel	engedélyezett vízkivétel

A Csór lokális modellterület beszivárgás szempontjából a Sóly csapadékállomás körüli zónában helyezkedik el. A hosszútávon jellemző tízéves átlag beszivárgás értékeket az ***58. ábra*** mutatja



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

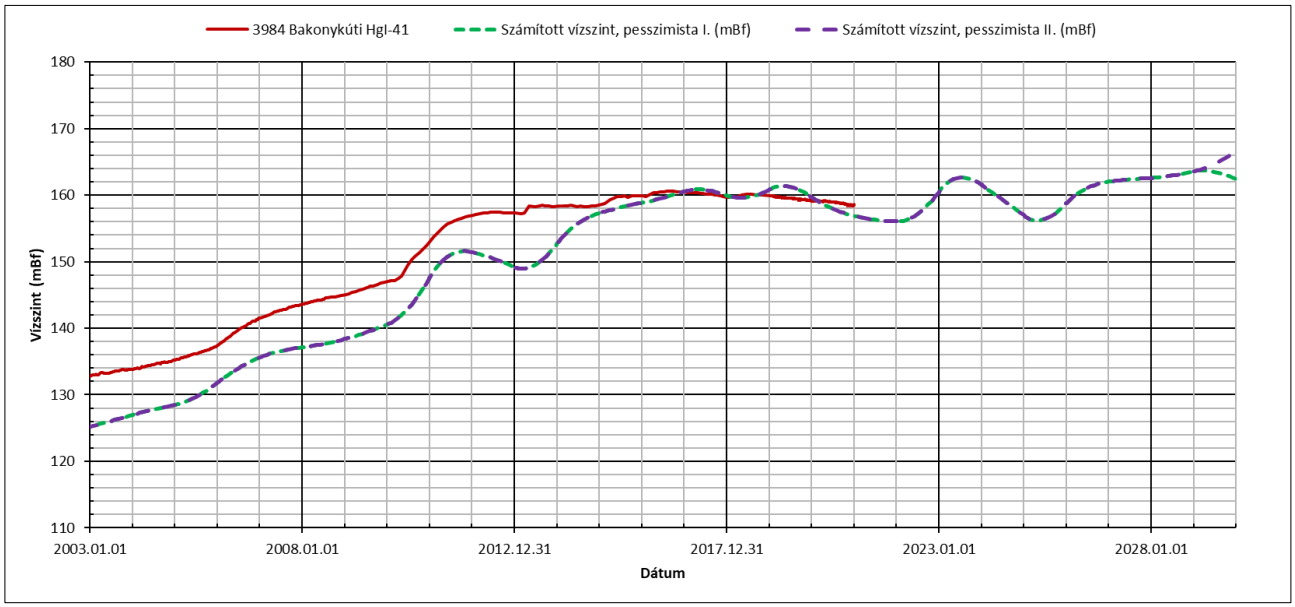
Mivel a lokális modellezés elsődleges célja a terület vízföldtani szempontból veszélyeztetettnek tekinthető térségeinek kijelölése, a lokális modellnél a pesszimista szcenárió vizsgálata lett előirányozva. A jövőben várható csapadékadatokra csak becsléseink lehetnek a korábbi évtizedek csapadékciklusainak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

kiválasztott évtizedeken belül alacsony beszivárgású évek is előfordultak, valamint a valóságban sohasem következik be a csapadékeloszlás ugyanúgy, ahogy már egyszer megtörtént.

Ez alapján a tranziens lokális modell előrejelzési időszakára (2019-2030) az alábbi két modellszcenárió készült el (***8. táblázat***):

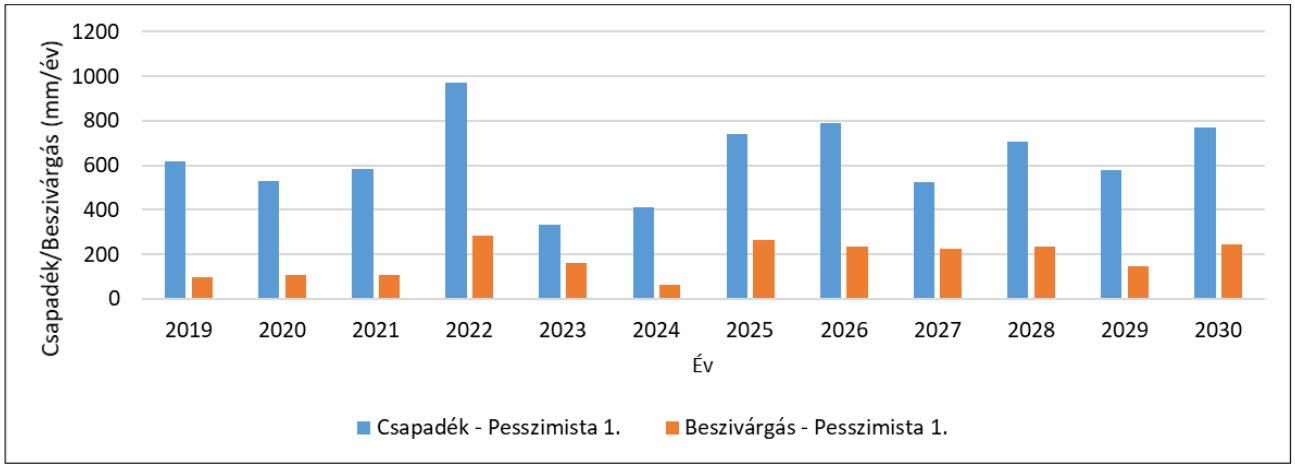
- *Pesszimista 1.*: Ebben a verzióban a regionális modellből már ismert beszivárgás adatokkal dolgoztunk, azaz az előrejelzési időszakban a legnagyobb beszivárgás mennyiséggel jellemzett 10 év (2009-2018) adatait használtuk fel. Továbbá a teljes időszakra 2018. év tény vízkivételei lettek megadva.
-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

A két szcenárió között a különbség gyakorlatilag az utolsó, 2030-as év csapadékadatiban mutatkozik meg, amely a vízszintekben úgy jelentkezik, hogy pesszimista 1. verzió esetén az utolsó modellezett évben a vízszintek csökkennek, míg pesszimista 2. verzió esetén 2030-ban emelkedő vízszinteket láthatunk (***59. ábra***). Ez alapján azt láttuk célszerűnek, ha a pesszimista 2. verzió modellezett vízszintek értékeit tüntetjük fel a ***51-57. ábrasorozatban***.

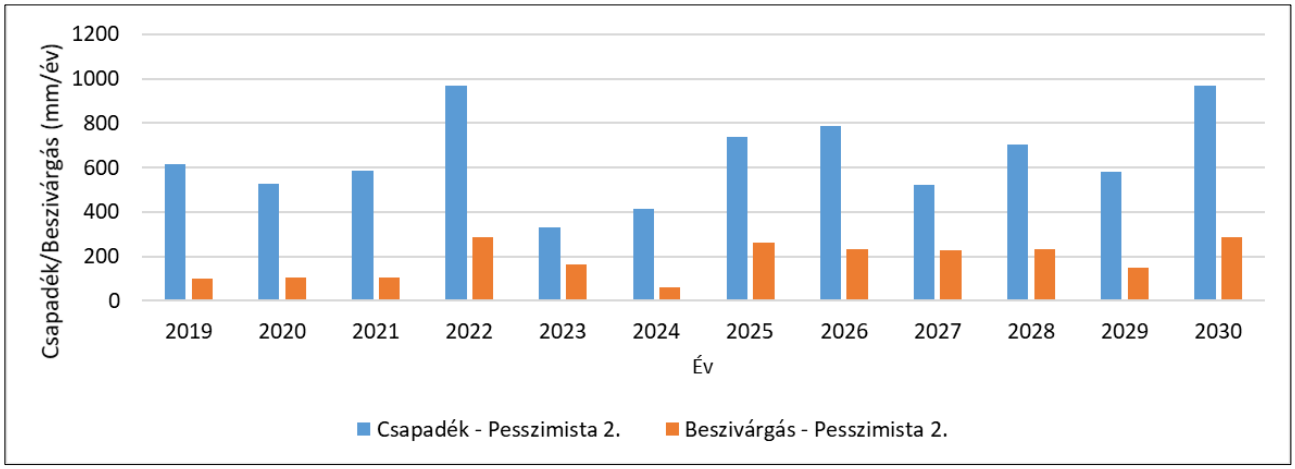


59. ábra: Mért és kétféle modellszcenárióval (pesszimista 1/2.) modellezett karsztvízszintek Bakonykúti HgI-41 kút példáján

A két modellszcenárióra, a sólyi meteorológiai állomás adatai alapján számolt beszivárgás- és csapadékmennyiség az ***60-61 ábrán*** látható.



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

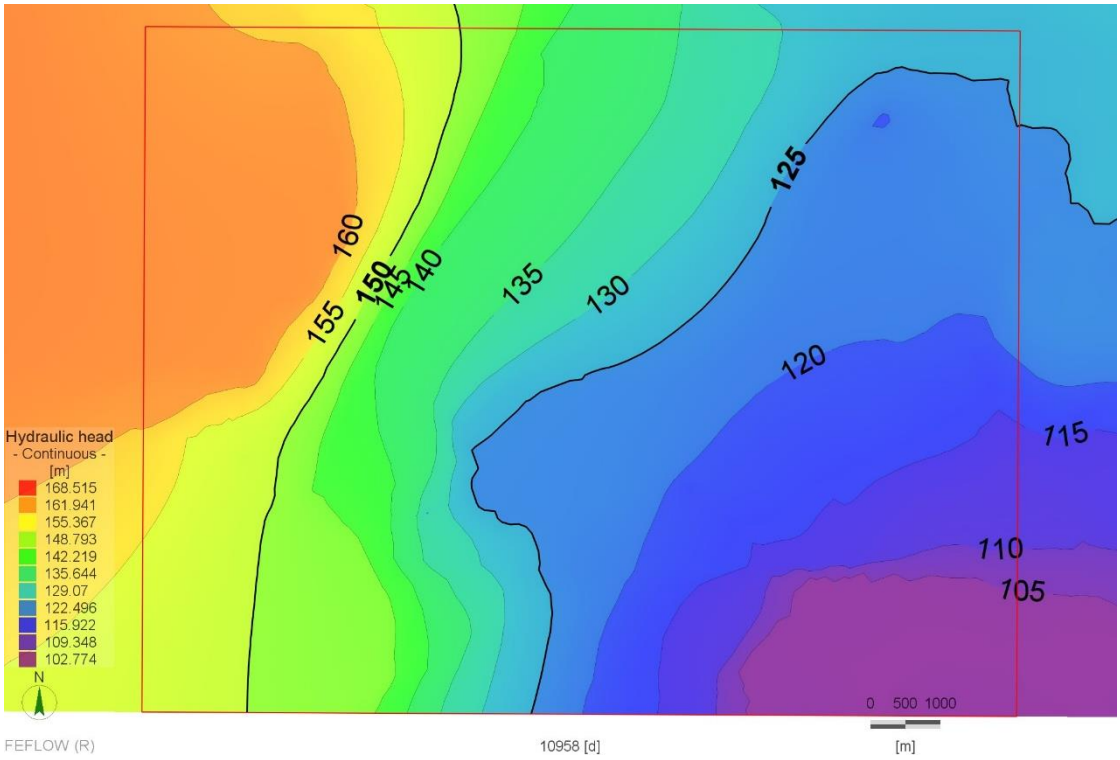


61. ábra: A pesszimista 2. szcenárió esetén figyelembe vett éves csapadék mennyiség és a beszivárgás mennyisége a sólyi meteorológiai állomáson mért adatok alapján

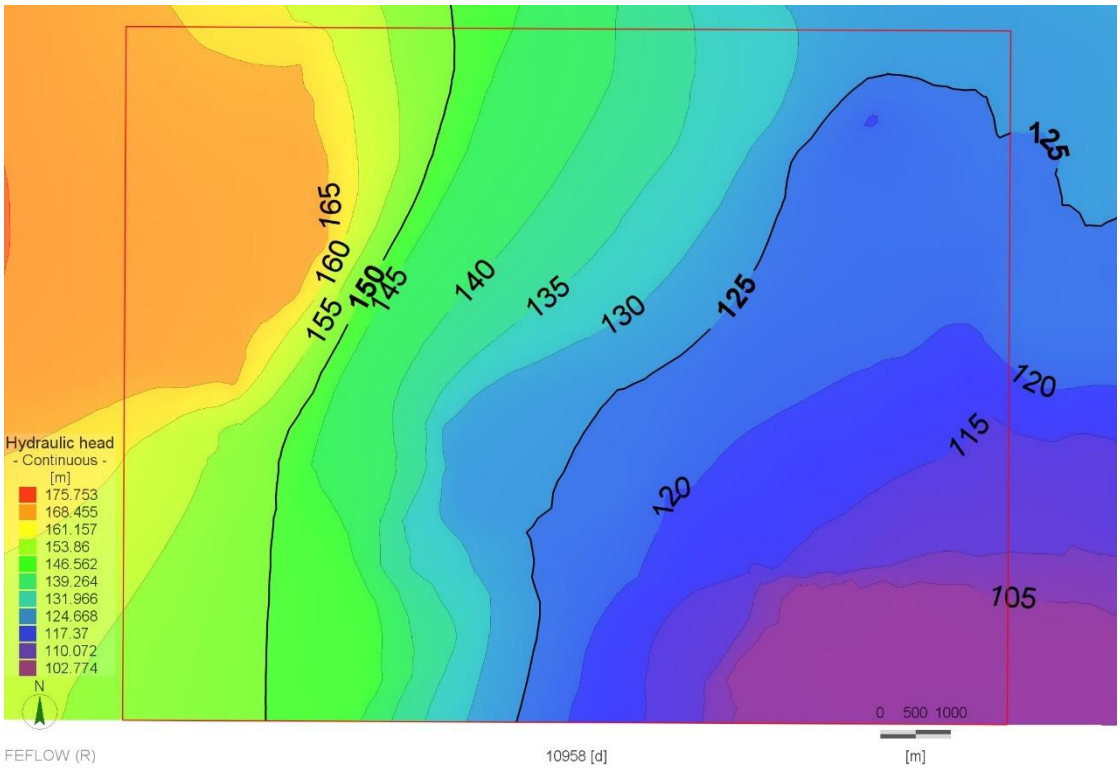
A numerikus modellben 2030-ra kétféle szcenárióval prognosztizált vízszinteket a ***62-63. ábra*** mutatja.

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

A vízszintek térbeli eloszlása nem változik jelentősen a modellezési időszakban, az utánpótlódás ÉNy felől (a Tési-fennsík irányából) történik, DK felé egyre csökkenő vízszintekkel. Az extrém csapadékesemény a 2030-as vízszinteket elsősorban a beszivárgási terület környezetében emeli meg, szélsőséges esetben itt akár 8-9 méterrel magasabb vízszintek is várhatók 2030-ban, mint 2019-ben. Az amúgy alacsonyabb vízszintekkel jellemzett, fedett karsztos térrészen, mint amilyen Csór térsége is, kiugróan csapadékos időszakok esetén sem várható 1-2 méternél nagyobb vízszintemelkedés a 2019-2030 közötti időszakban.



62. ábra: A lokális modellben a pesszimista 1. szcenárió alapján 2030-ra prognosztizált karsztvízszintek (mBf)



63. ábra: A lokális modellben a pesszimista 2. szcenárió alapján 2030-ra prognosztizált karsztvízszintek (mBf)

5. VESZÉLYEZTETETTSÉG

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

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

A veszélyeztetett területek lehatárolásának módszertanát részletesen a ”Smaragd-GSH Kft. 2021: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Veszélyeztetett területek lehatárolása” című jelentés tartalmazza.

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

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

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

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

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

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

5.1 A karsztvíztároló fedőjének földtani értékelése a veszélyeztetett területeken

Inota térsége

Inota térségében az uralkodó kvarter üledékek (proluviális, deluviális és tavi-mocsári képződmények) mellett a Gyulafirátóti Formáció, Hidasi Barnakőszén Formáció és a Nagyvázsonyi Mészkő Formáció képződményei jelennek meg a felszínen, de ÉK-re az eocén Szőci Mészkő is a felszínre bukkan.

A modellezés alapján kijelölt két nagyobb veszélyeztetett terület között a felszínre bukkannak a triász alaphegységi képződmények (Buchensteini Formáció, Budaörsi Dolomit és a Sédvölgyi Dolomit). A veszélyeztetett térrészre nem esik olyan fúrás, amelynek felső 50 méterében a karsztvíztároló valamely képződménye feltárulna, ilyet csak Inotától K-re találunk.

Az Inotától K-re található Csór-16 fúrásban a karsztvíztárolóhoz tartozó Megyehegyi Dolomit Formáció képződményei 14 méter mélységben tárulnak fel, melyet vékony talaj (1 m) és 13 méter vastag Csákvári Agyagmárga Formációba sorolható fedő takar, amely finomszemcsés összetétele (elsősorban aleurit, márga) miatt rossz vízvezetőnek tekinthető. A tőle mindössze 400 m-re található Csór-14 fúrásban a triász képződmények felszíne már195,7 m mélyen van a felszín alatt, fedőjében aleuritos, agyagmárgás képződményeket (Ősi Tarkaagyag, Csákvári Agyagmárga, Csóri Aleurit) találunk.

A Csór-14 fúrástól újabb 640 m-re K-re mélyült a Várpalota K-47 jelű fúrás, amelyben triász képződmények már közvetlenül a 27 m vastag kvarter üledékek alatt megjelennek. E fúrás környékét is veszélyeztetettnek tekintjük a területi modellezés eredményeinek értékelésekor.

A veszélyeztetettnek jelölt területektől É-ra található I-20 jelű fúrásban 82,7 m-es felszín alatti mélységben jelenik meg a triász Fődolomit. Fedőjében a felszínig a Tihanyi Tagozat és a Nagyvázsonyi Mészkő Formáció képződményeit találjuk. A Tihanyi Tagozat agyagos, aleuritos képződményei rossz vízvezetőnek tekinthetők.

Csór térsége

A Csór környéki területeken a regionális modellezés során jelzetthez képest két kisebb területre korlátozódott a veszélyeztetett terület nagysága. Az egyik a településtől D-re, a másik már kissé távolabb K-re a 8-as számú úttól D-re.

Csórtól, illetve a veszélyeztetett területektől D-re mindenhol kvarter tavi-mocsári képződmény (tőzeg) van a felszínen. Az északra eső területeken a kvarter képződmények közül lösz, lejtőtörmelék és proluviális-deluviális, illetve a K-i veszélyeztetett területrész körül folyóvízi kavicsos üledékek is megjelennek. A triásznál fiatalabb felszíni képződmények a kis kiterjedésben megjelenő Tihanyi és Somlói Tagozat jellemzően finomszemcsés (aleurit, finomszemű homok, agyag betelepülésekkel) képződményei, valamint az édesvízi mészkő (Nagyvázsonyi Mészkő) foltjai.

A veszélyeztetett területektől északra egy kis foltban megjelenő legidősebb triász képződmény a kora-triász Csopaki Márga. A középső-triász, már a karsztvíztárolóhoz tartozó képződmények közül az Aszófői Dolomit, az Iszkahegyi Mészkő és a Megyehegyi Dolomit, kissé északabbra a középső-, késő-triász Budaörsi Dolomit is nagyobb területen a felszínre bukkan. A veszélyeztetett területrészekre nem esik olyan fúrás, amelynek felső 50 méterében a karsztvíztároló valamely képződménye feltárul. A keleti veszélyeztetett területrész területén mélyült Csr-7 jelű fúrásban 50 m-es felszín alatti mélységben jelenik meg a kora-triász Arácsi Márga, fedőjében a Kállai Kaviccsal, valamint a Somlói és Tihanyi Tagozat rétegeivel.

A Csórtól Ny-ra mélyült Csór-15 jelű fúrásban a Budaörsi Dolomit Formációt 25,5 méter mélyen érték el, melyet majdnem 10 méter vastag Somlói Tagozat és 16 méter vastagságban változatos összetételű kvarter üledék fed. A Somlói Tagozat aleurit és finom-aprószemű homok váltakozásából épül fel, mely alapján rossz vízvezető képességgel rendelkezhet, így védettség szempontjából kedvező.

Csórtól délre mélyült Csór-18 jelű fúrásban 56 méteres felszín alatti mélységben érték el a középső-triász képződményeket, melyet változatos, de elsősorban finomszemcsés képződményeket tartalmazó képződmények (Somlói Tagozat, Csóri Aleurit Formáció, Csákvári Agyagmárga Formáció) fednek.

5.2 A modellezett veszélyeztetett területek összevetése az állapotértékelés során tapasztaltakkal

A modellezés és az állapotfelmérés a veszélyeztetettség megállapítására kétféle megközelítést alkalmaz. Az egyik egy számított érték, a másik a tényleges állapoton alapul. A modellezéssel jelzett területeken nem mindenhol van tényleges probléma. Ugyanis a fedő kőzetek jelenleg védelmet nyújthatnak, sok esetben valamilyen emberi beavatkozás eredményezte a veszélyeztetett állapotot. A karsztvíz csak akkor okoz tényleges problémát, ha a fedő sérül. Ilyen beavatkozás lehet a nem szakszerűen kivitelezett vagy le nem zárt pozitív kút, külszíni bányászati tevékenység, rézsűk megbontása, megváltoztatása, épület alapozás, stb.

Inota térségében már a regionális modellezés során is jeleztünk veszélyeztetett területeket. A területi modellezés során pontosítottuk a veszélyeztetett területeket. Ezek részben megegyeznek a regionális modellezés során jelzett területekkel, de ezek mellett a településtől É-ra kettő illetve K-re egy kisebb terület is veszélyeztetett kategóriába került a modellezési eredmények alapján.

Inota környékén a modellezés nagyobb területen jelzett potenciálisan veszélyeztetett területet, mint a korábbi ismeretek illetve a projekt során elvégzett állapotfelmérés mutatott. Ugyanakkor a modellezés jelezte területek lefedik azokat a területeket, amiket korábban is ismertünk, mint például az Inotától É-ra megszólaló és növekvő hozamú források környezete, a források növekvő

vízhozamának átvezetése a településen, illetve a településen mutatkozó vizesedések. A modell eredményei alapján a karsztvízszint nyomásszintjének emelkedése azonban az eddigieknél nagyobb településrészt érinthet. Ezek mellett a volt erőműtől É-ra levő területeken (a Készenléti lakóteleptől Ny-ra) is jelentkezett veszélyeztetett terület, de ez egyelőre lakott településekre nem jelent veszélyt.

Úgy gondoljuk, a településrészen továbbra is a vizesedés és a vízátvezetés kezelése (amihez hozzátartozik az Inota fölött kialakított víztározó karbantartása, üzemeltetése) a legfontosabb feladat a veszélyelhárítás szempontjából.

A Csór környéki területeken a regionális modellezés során jelzetthez képest két kisebb területre korlátozódott a veszélyeztetett terület nagysága. Az egyik a településtől D-re, a másik már kissé távolabb K-re a 8-as számú úttól D-re.

A csóri településrész veszélyeztetettsége a mostani nyomásszintek és a karsztakna jelenlegi víztermelése esetén megfelelően kezelhető, különösen úgy, hogy a karsztakna körüli vízelvezetést megnyugtatóan megoldott. Abban az esetben azonban, ha a karsztvíz nyomásszintje emelkedik, újra megjelenhetnek fakadások a kertekben, vizesedhetnek az épületek. Éppen ezért a karsztvízszint monitoringozása fontos feladat.

Csór környékén a korábbiakban ismert veszélyeztetett területen kívül (a karsztakna környék: Magyar utca, Alsótabán utca és Felsőtabán utca, Rákóczi utca) a modellezés a településtől K-re, nagyrészt a 8-as számú út D-i oldalán is jelzett veszélyeztetett területet. Ennek a területnek nagyobb része a Sárréti tájvédelmi körzet része, már a múltban is vizenyős, nádas, mocsaras terület volt, így azt az esetleges plusz vízfakadás nem veszélyezteti. Ugyanakkor az érintett terület áthúzódik a 8-as számú főút É-i oldalára is, és emiatt egy jelentősebb fakadás, vizesedés magát a főutat veszélyeztetheti. Ezen a területen legfontosabb feladat a 8-as főút alatti vízátvezetés illetve az attól D-re futó vízelvezető árkok jó állapotban tartása a legfontosabb feladat.

5.3 Javaslatok

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

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

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

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

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

A projekt előző jelentései

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

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

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

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

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

Felhasznált irodalom

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

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

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

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

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

Felhasznált térképek

[11] 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

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

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