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

TÖBBLET LOKÁLIS MODELLEK
KINCSESBÁNYA
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	Többlet lokális modellek– Kincsesbánya (Rákhegy) lokális modell DRV fejlesztési változattal
Megrendelő	Országos Vízügyi Főigazgatóság 1012 Budapest, Márvány utca 1/D.
Vállalkozó	Smaragd GSH Kft. 1114 Budapest Villányi út 9.
Végrehajtás ideje	2021.03.26-2021.08.30.

Projekt és szakmai vezető, a jelentést készítette	Gondárné Sőregi Katalin okl. geológus Mérnöki kamarai nyilvántartási szám: 13-8286 VZ-T, SZKV-1.1., SZKV-1.3., SZVV-3.1. SZVV-3.9. SZVV-3.10.	Gondár Sőrj Katalin ……
Hidrodinamikai modellezést és a jelentést készítette	Molnár Mária okl. hidrogeológus mérnök Modrovits Kamilla okl. geológus	
Térinformatika, digitális térképek szerkesztése	Könczöl Nándorné térinformatikus mérnök	

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

Jóváhagyta:

SMARAGD-GSH Kft.
1114 Budapest, Villányi út 9.
Tel/Fax: 361-4341, 209-3622
Adószám: 10905573-2-43

Gondár Károly

……..
Gondár Károly Ügyvezető

TARTALOMJEGYZÉK

1. Feladat meghatározás 7
2. A lokális modell bemutatása 8
2.1 A lokális modell területe 8
2.2 A modellterület földtani felépítése 10
2.3 Hidrosztratigráfia 15
2.4 A numerikus modell geometriai felépítése, numerikus rétegek 17
2.5 A numerikus modell rácshálójának kialakítása 26
2.6 A numerikus modell hidraulikai paraméterezése 29
2.6.1 Szivárgási tényező értékek a numerikus modellben 29
2.6.2 Fajlagos tározás értékek a numerikus modellben 42
2.6.3 Beszivárgás a numerikus modell felszínén 46
2.6.4 A diszkrét elemek a numerikus modellben 48
2.7 Peremfeltételek a numerikus modellben 50
2.7.1 1. típusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel 51
2.7.2 3. típusú (Transfer)-Cauchy peremfeltétel 51
2.7.3 4. típusú (Well)-Kút peremfeltétel 52
2.8 A tranziens modellezés 55
2.8.1 A tranziens modellezés kezdeti feltételei 55
2.8.2 A tranziens modell időléptéke 56
2.8.3 A numerikus modell kalibrálása 56
3. A Többlet vízkivételek hatásának vizsgálata 60
3.1 A Kincsesbánya (Rákhegy II.) és a Csóri karsztakna tényleges vízkivételének hatása az 1950-2019 közötti időszakban 60
3.2 A 2003-2019 időszak tényleges víztermelése és a tervezett többlet vízkivétel 65
3.3 Az éghajlat változásának figyelembevétele a prognózis során 69
3.4 A többlet vízkivételek hatása 70
3.4.1 Karsztvízszintek változása 70
3.4.2 A többlet termelés hatása a forrásokra és vízfolyásokra 81
4. veszélyeztetettség 87
5. Felhasznált irodalom 89

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A lokális modellterület elhelyezkedése a Dunántúli-középhegység regionális modellterületén belül 8
2. ábra: A lokális modellterület és az azon található objektumok 9
3. ábra: Fedett földtani térkép a lokális modell területén (Magyarország fedett földtani térképe 1:100 000 Magyar Állami Földtani Intézet 2005 [17]) 11
4. ábra: A Kincsesbánya numerikus modellterület É-D-i irányú szelvénye (3,5x túlmagasítás) 20
5. ábra: A Kincsesbánya numerikus modellterület Ny-K-i irányú szelvénye (3,5x túlmagasítás) 20
6. ábra: Példa a főkarszt kibúvás geometriai leképezésére egy numerikus modellben (5x túlmagasítás) (forrás: *Smaragd GSH 2020 [3]*) 21
7. ábra: Az 1. numerikus modellfelszín [mBf] 22
8. ábra: Az 1. numerikus modellréteg vastagsága [m] 22
9. ábra: A 2. numerikus modellfelszín [mBf] 23
10. ábra: A 2. numerikus modellréteg vastagsága [m] 23
11. ábra: A 3. numerikus modellfelszín [mBf] 24
12. ábra: A 3. numerikus modellréteg vastagsága [m] 24
13. ábra: A 4. numerikus modellfelszín [mBf] 25
14. ábra: A 4. numerikus modellréteg vastagsága [m] 25
15. ábra: Az 5. numerikus modellfelszín [mBf] 26
16. ábra: A FEFLOW szoftverben alkalmazható elemek 27
17. ábra: Pont elemek 27
18. ábra: Egyszerűsített vízfolyáshálózat 28
19. ábra: Egyszerűsített vetőhálózat 28
20. ábra: A Kincsesbánya numerikus modell rácshálója 29
21. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 32
22. ábra: A 2. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 33
23. ábra: A 3. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 34
24. ábra: A 4. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 35
25. ábra: Az 5. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 36
26. ábra: A 6. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 37
27. ábra: A 7. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 38
28. ábra: A 8. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 39
29. ábra: A szivárgási tényező eloszlás É-D-i irányú szelvényen (2,5x túlmagasítás) 41
30. ábra: A numerikus modell Ny-K-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás) 41
31. ábra: K-tényező változása azonos rétegekben, Ny-K-i irányú szelvényen kinagyítva (2,5x túlmagasítás) 41
32. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 43
33. ábra: A 2. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 44
34. ábra: A 3. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 44
35. ábra: A 4. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 45
36. ábra: Az 5. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 45
37. ábra: A 6. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 46
38. ábra: A 2018-as év végére számolt beszivárgás a numerikus modellben 47
39. ábra: A különböző évekre számított beszivárgás értékek kapcsolása a tranziens modellben 48
40. ábra: A numerikus modellbe beépített vetők szivárgási tényező értékei és az 1D elemek elhelyezkedése az 5. rétegben 49
41. ábra: A numerikus modellben a források összekötése az 5. rétegig 1D elemmel Sötét szürkével az 5. réteg látható 50

42. ábra: A numerikus modellben szereplő 1.tipusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel 51
43. ábra: A numerikus modellben szereplő 3. típusú (Transfer)-Cauchy peremfeltétel 52
44. ábra: A főkarsztot (5. réteg) megcsapoló termelőkutak a numerikus modellben 53
45. ábra: A főkarsztot (6. réteg) megcsapoló termelőkutak a numerikus modellben 54
46. ábra: A vízkivételek modellbeli leképezése a Rákhegy II. vízakna példáján 54
47. ábra: A tranziens modell kezdeti (2000.01.01) vízszinteloszlása az 5. rétegben [mBf] 55
48. ábra: A numerikus modell számított karsztvízszint eloszlása 2019. január 01-i állapotra, rajta a kalibráláshoz felhasznált megfigyelőkutak elhelyezkedésével [mBf] 56
49. ábra: A numerikus modell kalibrálási görbéje a 2019-es januári állapotra 57
50. ábra: Csóri és kincsesbányai vízkivétel, valamint a karsztvízszint alakulása a monitoringkutakban mért adatok alapján 62
51. ábra: Kincsesbánya tágabb környezetében található források hozamidősorai (1950-2019) 64
52. ábra: A rákhegyi termelés és a területen található monitoringkutak vízszintjének alakulása 2003-2021 között (Adatforrás: OVF) 66
53. ábra: A rákhegyi vízkitermelés alakulása 2003-2021 között a 2018-ban engedélyezett kitermelhető vízmennyiséghez képest (Adatforrás: OVF) 66
54. ábra: A csóri termelés és a területen található monitoringkutak vízszintjének alakulása 2003-2021 között (Adatforrás: OVF) 67
55. ábra: A csóri vízkitermelés alakulása 2003-2021 között a 2018-ban engedélyezett kitermelhető vízmennyiséghez képest (Adatforrás: OVF) 67
56. ábra: A rákhegyi és csóri karsztaknákon történő vízkiemelés összevetve az egyéb víztermelésekkel a 2003-2021 közötti időszakban (Adatforrás: OVF) 68
57. ábra: A Csákberény-86/a monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora 71
58. ábra: A Csókakő-1 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora 72
59. ábra: Az Isztimér-3 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora 72
60. ábra: A Tés-1 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora 73
61. ábra: A Bakonykúti HgI-41 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora 73
62. ábra: A Bodajk HgI-43 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora 74
63. ábra: A Csór HgI-44 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora 74
64. ábra: Az Iszkaszentgyörgy Kp-248 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora 75
65. ábra: Az Iszkaszentgyörgy HgI-37 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora 75
66. ábra: Az Iszkaszentgyörgy HgI-38 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora 76
67. ábra: A Magyaralmás HgI-45 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora 76
68. ábra: A csóri karsztakna számított üzemi vízszint idősora különböző termelési szcenáriók mellett 78
69. ábra: A Rákhegy II. karsztakna számított üzemi vízszint idősora különböző termelési szcenáriók mellett 78

70. ábra: A bodajki Tó-forrás mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízhozam idősora (m^3/nap) 82
71. ábra: A Nádastavi-forráscsoport mért különböző termelési szcenáriók mellett számított vízhozam idősora (m^3/nap) 83
72. ábra: A Vízmű-forrás mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízhozam idősora (m^3/nap) 84
73. ábra: A fehérvárcsurgói Tó-forrás mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízhozam idősora (m^3/nap) 84

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat: A Kincsesbánya lokális modell sarokpontjainak koordinátái 8
2. táblázat: Az egyes képződmények K-tényező értéke a numerikus modellben 40
3. táblázat: Az egyes képződmények vertikális elterjedése a numerikus modellben 42
4. táblázat: A szerkezeti elemek hidraulikai paraméterei 49
5. táblázat: A mért és modellezett vízszintek a megfigyelőkutakban a kalibráció időpontjában 57
6. táblázat: A mért és modellezett üzemi vízszintek a fontosabb karsztaknákban a kalibráció időpontjában 59
7. táblázat: A lokális modellterületen található jelentősebb források, forráscsoportok adatai 63
8. táblázat: Távlati vízigények a Kincsesbánya lokális modell területén 69
9. táblázat: A lokális modellterületen található figyelőkutak vízszintváltozásai reális és maximális termeltetés mellett a 2019-es állapothoz viszonyítva 77
10. táblázat: A lokális modellterületen található jelentősebb források hozamváltozásai reális és maximális termeltetés mellett 85

TÉRKÉPMELLÉKLETEK

1. térképmelléklet: Modellezett karsztvízszint – 2019
2. térképmelléklet: Reális többlet termeléssel modellezett karsztvízszint – 2030
3. térképmelléklet: Maximális többlet termeléssel modellezett karsztvízszint – 2030
4. térképmelléklet A 2019-2030 közötti karsztvízszint változás mértéke a reális többlet termelés figyelembe vételével
5. térképmelléklet: A 2019-2030 közötti karsztvízszint változás mértéke a maximális többlet termelés figyelembe vételével

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*) [12].

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 léptékű modellen túl a kritikus helyeken, ahol a legnagyobb vízkárok jelentkezhetnek lokális modellek is kialakításra kerültek: Bodajk, Tata, Csór, Fehérvárcsurgó és a Hévízi-tó – Keszthelyi hegység területén.

A projekt eddig elkészült dokumentációi a jelentés végén kerültek felsorolásra [1].

A regionális és a lokális modellezés során, a különböző szcenáriókban a 2018-as tény vízkivétellel, illetve a 2018-ban engedélyezett vízkivételekkel modelleztünk. A projekt kezdete óta eltelt időszakban azonban, különböző vízgazdálkodási okok miatt jelentős többlet vízkivételi igény keletkezett a régióban. A vízigények kielégítése főképpen a két nagy regionális vízellátást biztosító vízbázis: Nyirád és Kincsesbánya (Rákhegy II.) termelésének növelésével oldható meg.

Az eredeti szolgáltatási szerződés tartalmát kibővítve, így többletfeladatként két további lokális modell készült el. A nyirádi és a kincsesbányai lokális modellekkel azt vizsgáltuk, hogy a többlet vízkivétel milyen hatással van a karsztvízszintek és a nagyobb források hozamának alakulására.

A már elkészült lokális modellekhez hasonlóan a Vízügyi Igazgatóságok és az OVF-fel történő konzultáció alapján a lokális modellezés a 2003-2030 időszakra készült. A többlet vízigények a területen működő regionális vízművek igényeit figyelembe véve kerültek meghatározásra.

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 Kincsesbánya (Rákhegy II.) lokális modellezés eredményeit foglalja össze.

Mivel a távlati termelések csak becsült értékek, és nem teljeskörűek, jelen dokumentáció csak a regionális vízgazdálkodási koncepciók vizsgálatára és megalapozására szolgálnak. Sem a modellezés, sem a dokumentáció nem szolgálhat bármely hatályos jogszabály alapján elindított hatósági engedélyezési eljárás alapjául. Nem váltja ki az egyes konkrét termelő objektumhoz kapcsolható vízemelés kapcsán elvégzendő részletes vizsgálatokat!

2. A LOKÁLIS MODELL BEMUTATÁSA

2.1 A lokális modell területe

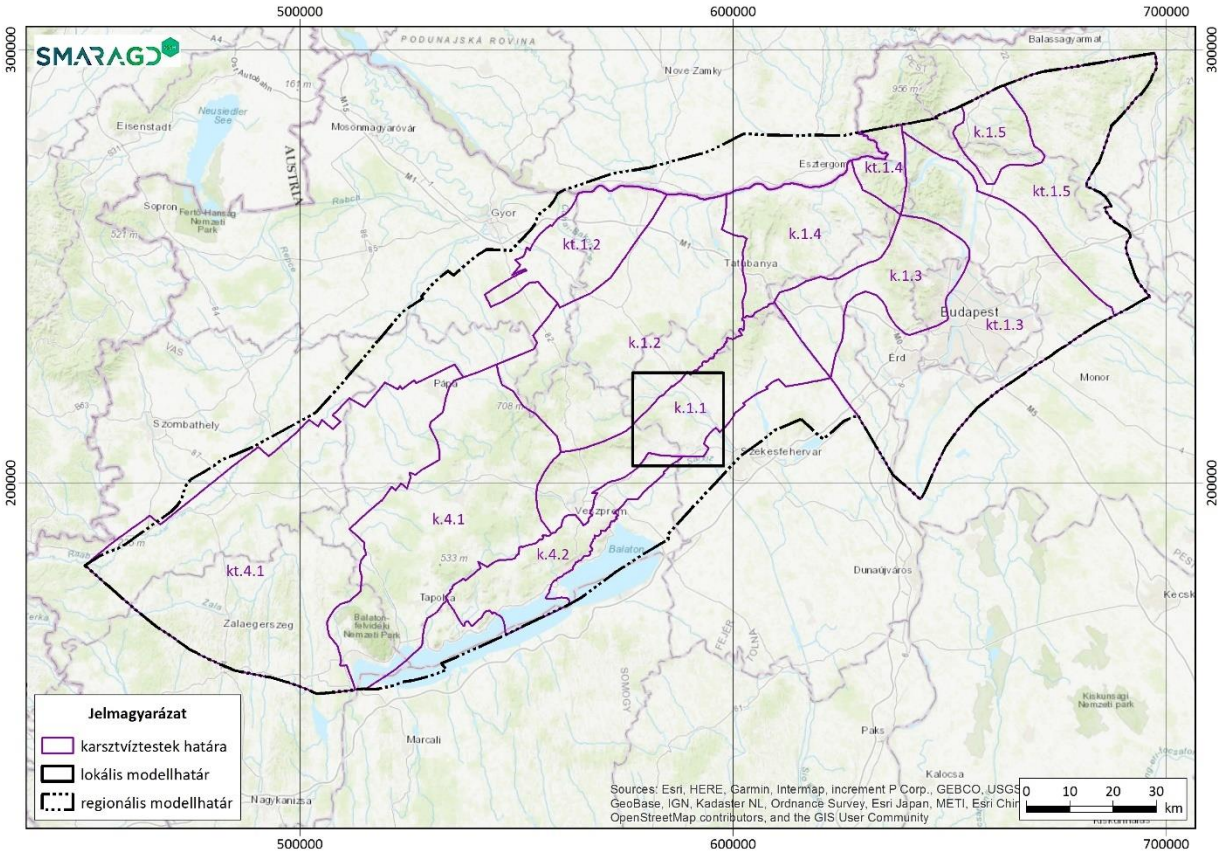
A modellezés fő célja volt azt vizsgálni, hogy a rákhegyi karsztakna különböző hozamú termelése milyen hatással lehet a környező vízszintekre/forráshozamokra. A lokális modellterület határát ezért a regionális modell alapján, a rákhegyi vízakna, mint jelentős vízkivételi központ utánpótlási területe alapján határoztuk meg (***1. ábra***). A lokális modell nagyrészt a k.1.1 Veszprém-Várpalota, Vértes D-i források vízgyűjtője karsztvíztestet, valamint kisebb részben a k.1.2 karsztvíztestet érinti, déli része kis területen átlóg a k.4.2 karsztvíztestre is.

Földrajzilag a lokális modell a Keleti-Bakony peremi részét, a Móri-árok területét és a Vértes DNy-i peremét foglalja magába. A modellterület DK-i részén a Sárrét területei is megjelennek (***2. ábra***).

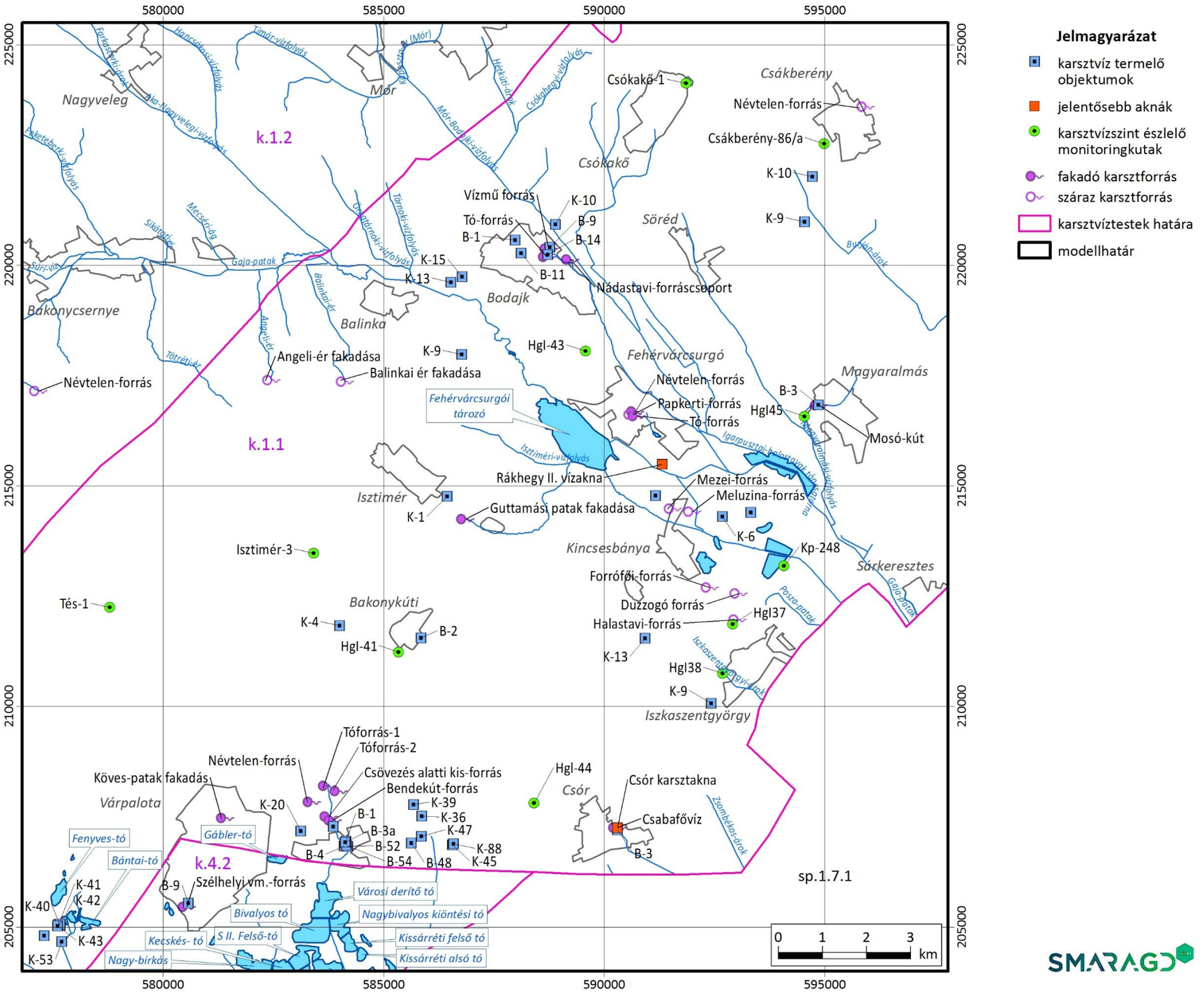
Határoló koordinátát az ***1. táblázat*** mutatja, területe 451,5 km^2.

1. táblázat: A Kincsesbánya lokális modell sarokpontjainak koordinátái

EOV X_{min}	204000
EOV X_{max}	225500
EOV Y_{min}	576800
EOV Y_{max}	597800



1. ábra: A lokális modellterület elhelyezkedése a Dunántúli-középhegység regionális modellterületén belül



2. ábra: A lokális modellterület és az azon található objektumok

2.2 A modellterület földtani felépítése

A lokális modell felszínén található földtani képződményeket a fedett földtani térkép mutatja be (***3. ábra***).

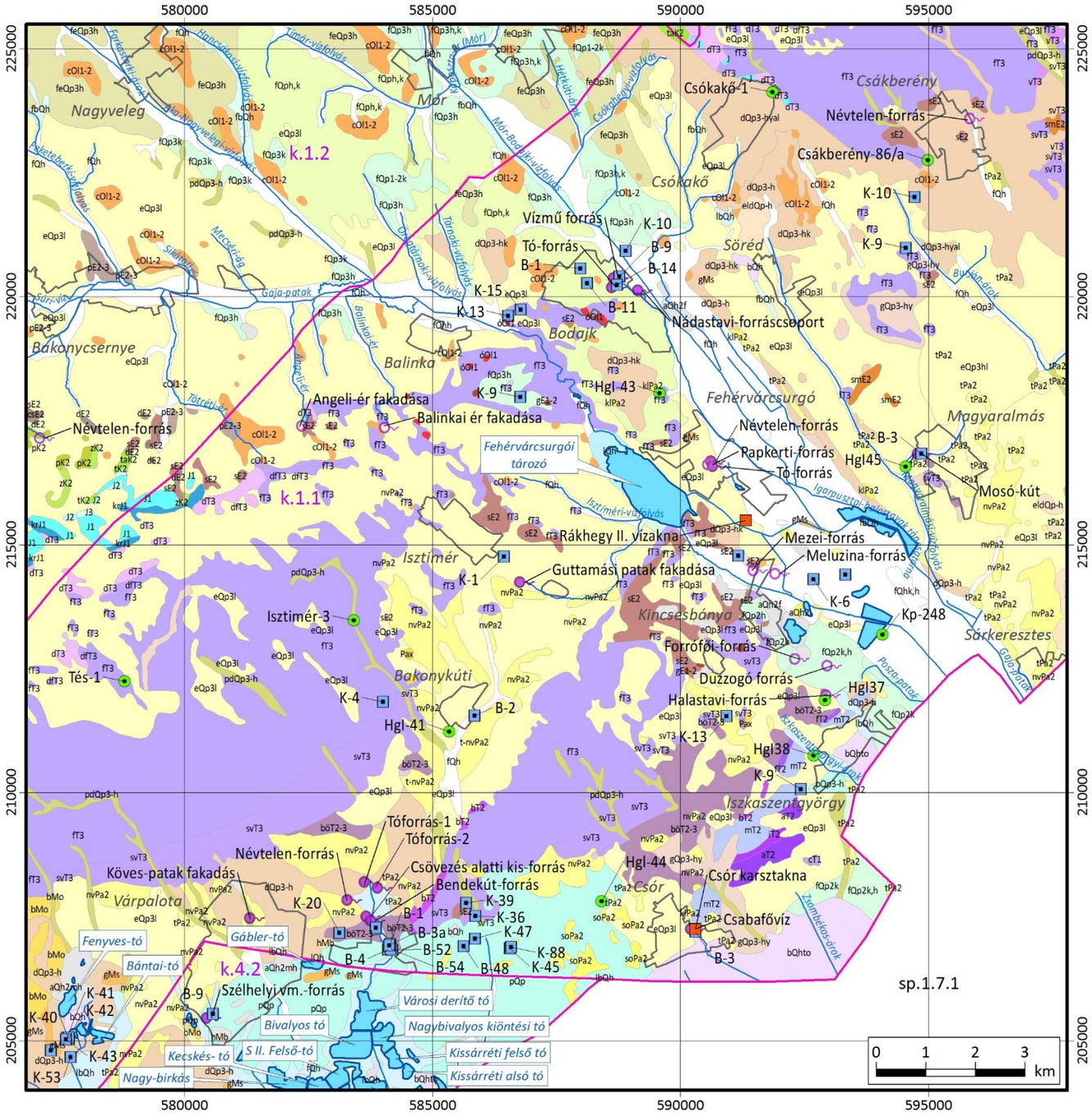
A Kincsesbánya modellterület prealbai aljzatát a legfelső képződményeik alapján ÉK-DNy-i irányban 3 részre oszthatjuk. A legidősebb képződmények a variszkuszi orogén ciklus idején képződött kovapala és homokkő betelepüléseket tartalmazó alacsony fokú metamorfózison átesett aleuritos agyagpala (Lovasi Agyagpala), amelyet a modellterület DK-i területein találjuk meg Ősi-Csór-Iszkaszentgyörgy-Moha vonaltól 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-Sárkeresztes 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 Moha-Sárkeresztes környékén 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 a viszonylag homogén „sejtes dolomit” (Aszófői Dolomit) a kora-triász képződmények fedőjében. Az Aszófői Dolomit felett található a 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 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 platformkarbonátok keletkeztek (Sédvölgyi Dolomit).



3. ábra: Fedett földtani térkép a lokális modell területén
(Magyarország fedett földtani térképe 1:100 000 Magyar Állami Földtani Intézet 2005 [17])

Jelmagyarázat

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

Földtani képződmények

aQh2mh	Feltöltés, meddőhányó	Holocén
fQh	Folyóvízi üledék	Holocén
flQh	Folyóvízi-tavi üledék	Holocén
fbQh	Folyóvízi-mocsári üledék	Holocén
lQh	Tavi üledék	Holocén
lbQh	Tavi-mocsári üledék	Holocén
bQh	Mocsári üledék	Holocén
bQhto	Tőzeg	Holocén
pQp3-h	Proluviális üledék	Pleisztocén
pdQp3-h	Proluviális-deluviális üledék	Pleisztocén
gQp3-hy	Lejtőtörmelék	Pleisztocén
gQp3-hy,k	Lejtőtörmelék kavics	Pleisztocén
dQp3-h	Deluviális üledékek	Pleisztocén
elgQp-hva	Eluviális-lejtőüledékes vörösagyag	Pleisztocén
eldQp-h	Eluviális-deluviális üledék	Pleisztocén
fQp3h	Folyóvízi üledékek	Pleisztocén
feQp3h	Fluvioeolikus homok	Pleisztocén
eQp3l	Lösz	Pleisztocén
eQp3hl	Homokos lösz	Pleisztocén
fQp2h	Folyóvízi kavics homok	Pleisztocén
fQph,k	Folyóvízi homok kavics	Pleisztocén
pQp	Proluviális üledék	Pleisztocén
nvPa2	Nagyvázsonyi Mészkő Formáció	Pannóniai
t-nvPa2	Tihanyi és Nagyvázsonyi Formáció összevontan	Pannóniai
tPa2	Tihanyi Formáció	Pannóniai
soPa2	Somlói Formáció	Pannóniai
kl-tPa2	Kállai és Tihanyi Formáció összevontan	Pannóniai
klPa2	Kállai Kavics Formáció	Pannóniai
cPa1	Csákvári Agyagmárga Formáció	Pannóniai
Pax	Áthalmozott bauxit bauxitos agyag	Pannóniai
gMs	Gyulafirátóti Formáció	Miocén
hMb	Hidasi Barnakőszén Formáció	Miocén
bMo	Bántapusztai Formáció	Miocén
cOl1-2	Csatkai Formáció	Oligocén
óOl1	Óbaroki Bauxit Formáció	Oligocén
pE2-3	Padragi Márga Formáció	Eocén
sE2	Szőci Mészkő Formáció	Eocén
smE2	Magyaralmási Tagozat	Eocén
csE2	Csernyei Formáció	Eocén
dE2	Dorogi Formáció	Eocén
gE1-2	Gánti Bauxit Formáció	Eocén
pK2	Pénzeskúti Márga Formáció	Kréta
zK2	Zirci Mészkő Formáció	Kréta
tK2	Tési Agyagmárga Formáció	Kréta
taK2	Tatai Mészkő Formáció	Kréta
J3	Felső-jura képződmények összevontan	Jura
J2	Középső-jura képződmények összevontan	Jura
krJ1	Kardosréti Mészkő Formáció	Jura
J1	Alsó-jura képződmények összevontan	Jura
J	Jura képződmények összevontan	Jura
dT3	Dachsteini Mészkő Formáció	Triász
dfT3	Fenyőfői Tagozat	Triász
fT3	Fődolomit Formáció	Triász
svT3	Sédvölgyi Dolomit Formáció	Triász
vT3	Veszprémi Márga Formáció	Triász
böT2-3	Budaörsi Dolomit Formáció	Triász
bT2	Buchensteini Formáció	Triász
fT2	Felsőörsi Mészkő Formáció	Triász
mT2	Megyehegyi Dolomit Formáció	Triász
iT2	Iszkahegyi Mészkő Formáció	Triász
aT2	Aszófői Dolomit Formáció	Triász
cT1	Csopaki Márga Formáció	Triász

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

Ez a DNy-ÉK-i irányú több kb. 12-13 km széles triász üledéksorozat jelenik meg - mint prealbai felszín - a modellterület jelentős részén. A kora-triásztól a késő-triászig tartó üledéksorozat azonban csak Kincsesbánya-Iszkaszentgyörgy vonaltól DNy-ra követhető ilyen jól. Ettől 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 keskenyebb sávban Várpalota és Fehérvárcsurgó között.

A prealbai aljzat említett hármas felosztásának harmadik részét a modellterület ÉNy-i sarkában (nagyjából a Mór-Bakonycsernye-Nagyveleg határolta területen) triásznál fiatalabb jura és kora-kréta képződményekkel fedett terület jelenti.

A Dunántúli-középhegységi egység területén az ausztriai tektonikai fázis hatására ÉK-DNy irányú tengelyű szinklináris szerkezet alakult ki. A korábbi nagy kiterjedésű triász platformok feltöredeztek, egymáshoz képest eltérő szintekbe kerültek. A triász képződmények fölött a jura időszak elején még sekélytengeri képződmények rakódtak le a térségben (Kardosréti Mészkő), de később inkább pelágikus jellegű üledékek képződtek az alsó-jura során. A tenger mélyülésével megjelent a Kardosréti Mészkő felett az Isztiméri Mészkő. Az alsó-jura jellegzetes képződménye az ammonitico rosso, amelyet a térségben leginkább a Kisgerecsei Márga képvisel. A középső-jura képződmények közül az Eplényi Mészkő található meg nagyobb területeken Balinka és Bakonycsernye környékén, jellemzően kréta képződményekkel fedetten.

A krétában lezajló kompressziós tektonikai hatásokra a terület egy része sokáig szárazulattá vált. Az apti-albai korszak határán a korábbi kiemelkedést transzgresszió váltotta fel. Az így kialakuló medencében rakódtak le a Tatai Mészkő krinoideás rétegei. Az ausztriai orogén fázist követően az albai korszakban tengerelöntés indult meg. E folyamat kezdetén keletkezett a lagúna fáciesű Tési Agyagmárga, amely Bakonycsernye térségében a Dachsteini Mészkőre, Balinka környékén az alsó-jura Eplényi Mészkőre települve található meg. A tagolt térszín lassan kiegyenlítődött, teret adva a tengeri platformkarbonátok (Zirci Mészkő) képződésének. A kora-kréta végén bekövetkező tengerszint emelkedés eredményeként már pelágikus képződmények keletkeztek egészen a késő-kréta elejéig (Pénzeskúti Márga), amely a modellterület harmadik (ÉNy-i) részterületének jelentős részén megtalálható.

A prealbai képződmények a modellterület jelentős részén a felszínen is (vagy csak nagyon vékony kvarter fedő alatt) megtalálhatók (Várpalota-Bakonycsernye-Bodajk-Iszkaszentgyörgy között, Inota-Csór vonaltól É-ra, valamint Söréd-Csókakő-Csákberény térségében). Legmélyebben (-600 m mélységben) a Móri-árok területén Mórtól D-re van a prealbai felszín, de DNy-felé a vetők mentén rövidtávon belül a felszín közelébe emelkedik. A Rákhegy II. vízakna térségében a triász Fődolomit helyenként 200 m-nél is nagyobb felszín alatti mélységben található. Az aknától ÉK felé haladva az árok felé, a Fődolomit felszíne hamar nagy mélységbe kerül (2 km-en belül több mint 300 m-rel). A Móri-árok mellett leginkább a kréta képződményekkel fedett területek vannak mélyebben (-300 m körüli mélységben). Csór környékén a prealbai aljzatban egy Csórtól D-re húzódó vetőzóna mentén oldalirányban mintegy 2,5 km elmozdulás tapasztalható.

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 térszínre a Gánti Bauxit. A kora-eocén végén meginduló újabb mozgások során megindult DNy felől a transzgresszió. A vetőkkel szabdalt, töredezett térszín tagoltsága miatt a középső-eocén során még

ezen a viszonylag kis modellterületen is nagyon eltérő üledékképződési körülmények alakulhattak ki. A medencék területén a jelentős terrigén törmeléket tartalmazó Csernyei Formáció márgás, biogén törmelékes rétegei rakódtak le. Ezek a felszínen is megtalálhatók Bakonycsernye környékén, de fúrásokban szinte az egész modellterületen leírták. 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 modellterület több részén (Bakonycsernye, Isztimér, Kincsesbánya, Magyaralmás és Csákberény térségében) a felszínen is megtalálható. A szárazföldi üledékképződési környezetet a folyóvízi, tavi és lápi környezetben képződött, terrigén üledéket és szenes összleteket is magába foglaló Dorogi Formáció képviseli.

A harmadik eocén transzgresszió a priabonai korszakban indult meg. A sekélytengeri karbonátos rámpákon ekkor keletkeztek a jelentős biogén anyagot (kagylók, sünök, foraminiferák, bryozoák) tartalmazó Szépvölgyi Mészkő rétegei, melyeket Balinka környékéről ismerünk fúrásokban.

Az eocént követő infraoligocén denudáció eredményeként az eocén képződmények a teljes Dunántúli-középhegységi egység területén nagymértékben lepusztultak. Ekkor jött létre a nagy vastagságú folyóvízi törmelékes üledékösszlet (Csatkai Kavics), amely a modellterület É-i, ÉNy-i területein elterjedt leginkább és vastagsága is ÉNy felé növekszik, Bakonycsernye és Balinka térségében a Csernyei Formációra, a Padragi Márgára, sőt a Szépvölgyi Mészkőre is települve. Ebben a térségben a Csatkai Kavics fölött már csak legfeljebb 10-20 méter vastagságban kvarter képződmények (lösz és áthalmozott üledékek) találhatók.

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 Várpalota, Inota, Fehérvárcsurgó, Balinka és Csákberény térségében nagy területeken fordul elő. A kárpáti korszakban a tengerszint emelkedésének eredményeként finomabb szemű törmelékes üledékképződés zajlott (Garábi Slír Csór környékén, Perbáli Formáció Fehérvárcsurgótól K-re), majd ezt követően durvább szemű pectenes, ostreás, bryozoás, balanuszos üledéksorozat keletkezett (Bántapusztai Formáció), amely a modellterület DNy-i részén (Várpalota és Csór környéke) fordul elő.

A bádeni korszak közepén tengeröblökben kialakult parti mocsarakban jött létre a Hidasi Kőszén (Fehérvárcsurgó környékén a Padragi Márgára, 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. A késő-miocén elején lassan kiszáradó lagúnákban keletkezett az aleuritos, huminites Ősi Tarkaagyag, sekélytengeri környezetben a Csákvári Agyagmárga és a Csóri Aleurit (Csórtól DNy-ra). 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 (Várpalota és Isztimér között nagy területeken), a hullámveréses parti zónában az abráziós kavics (Diási Kavics), és a partszegélyi homok (Kállai Kavics). Ezt a homokot bányásszák Fehérvárcsurgó, Kincsesbánya térségében. A késő-miocén során a folyók deltafrontján a homokos kifejlődésű Somlói Tagozat, a partmenti lagúnákban pedig az aleuritos Tihanyi Tagozat képződményei rakódtak le nagy területeken (a modellterület DK-i részén Csór-Moha-Sárkeresztes-Magyaralmás vonalban és attól DK-re).

A felszínt nagy területen borítják kvarter képződmények. Közülük a lösz, Várpalota-Csórtól D-re a tavi-mocsári képződmények, illetve a kiemelt helyzetű területek peremeit szegélyezve különféle áthalmozott üledékek a legfontosabbak. Folyóvízi üledékeket leginkább a Móri-árok mentén találunk.

A prealbai aljzat fedőképződményeinek elterjedése a modellterületen igencsak heterogén. A Bodajk környéki területen, annak DNy-i részén a felszínen is triász Fődolomit van, de egy majdnem É-D-i irányú vető mentén a K-i oldalon a triász kissé mélyebben, már fedő alatt helyezkedik el. A triász Fődolomit felszínére diszkordánsan a Csatkai Formáció rétegei települnek, melyek fedőjében vékony

negyedkori üledék (lösz) található. Bodajktól D-re azonban a Fődolomit felszínére már a Gyulafirátóti Riolittufa települt jelentős vastagságban, fedőjükben kvarter deluviális homokos kaviccsal, illetve keletebbre folyóvízi üledékekkel.

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

A modellterület déli részén, Csór környékén már a felszínre emelkednek (Csórtól 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 környezetében gyakran közvetlenül a triász fölött jelennek meg, általában finomabb szemű formában (Ősi Tarkaagyag, Csákvári Agyagmárga, Csóri Aleurit), vastagságuk elérheti a 60-70 métert. 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.

2.3 Hidrosztratigráfia

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 kincsesbányai 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. A kincsesbányai modell esetén az eocén képződmények nagyobb elterjedésben a Csákberény-Isztimér/Kincsesbánya közötti területeken, valamint a modell nyugati részén, Bakonycsernyétől délre jelennek meg. Ez utóbbi területen az eocén mellett kréta korú képződmények is előfordulnak. Karbonátok közül az eocén Szépvölgyi és Szőci Mészkő, valamint kréta Zirci Mészkő jó vízadók, de nagy területen jelennek meg agyagos-márgás kifejlődésű eocén (pl.: Dorogi Formáció, Gánti Bauxit Formáció, Padragi Márga Formáció) és kréta (Pénzeskúti Márga Formáció) képződmények is, melyek kifejezetten rossz vízvezetőnek tekinthetők. Az eocén karbonátok és márgák gyakran több rétegben, egymással összefogazódva jelennek meg, amely vízadó képességüket befolyásolja.

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

A főkarsztvíztároló fedőjének nagyvastagságú és elterjedésű képződményei tartoznak ebbe a csoportba. A modell területén ezek különböző hidraulikai tulajdonságú formációkként jelennek meg. A hidrosztratigráfiai egység részben nagy vastagságú miocén finomszemcsés képződmények (Ősi Tarkaagyag, Csákvári Agyagmárga, Gyulafirátóti Formáció) formájában jelenik meg, melyek rossz vízvezető képességgel bírnak. Továbbá nagy vastagságú és kiterjedésű Csatkai Formációt is előfordul, amely változatos szemcseméretű porózus képződmény, de összességében jó vízadó tulajdonságú kőzetnek tekinthető.

Kvarter – Felső-pannon porózus képződmények hidrosztratigráfiai egysége:

A főkarsztvíztároló fedőjének képződményei tartoznak ide. Ebbe a képződménycsoportba tartozik az édesvízi kifejlődésű Nagyvázsonyi Mészkő, mely jó vízadó képződménynek tekinthető és jellemzően a modellterület középső részén jelenik meg nagy kiterjedésben. Továbbá ide tartozik még a jó vízadó Kállai Kavics és Somlói Formáció. A vízrekesztő képződmények közül a Tihanyi Formáció finomszemcsés üledékei fordulnak elő nagyobb kiterjedésben. A kvarter üledékek rendkívül változatos litológiával jelennek meg, a kavicstól az egészen finomszemcsés üledékig, amelyet elsősorban az őket kialakító képződési/osztályozási folyamatok határoznak meg.

A lokális modellterületen 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 modellterületen 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 ***2.4. fejezetben*** mutatunk be.

2.4 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 kincsesbányai 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 modellterületen 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 modellterületen található összes olyan fúrás (378 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 ***2. 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.

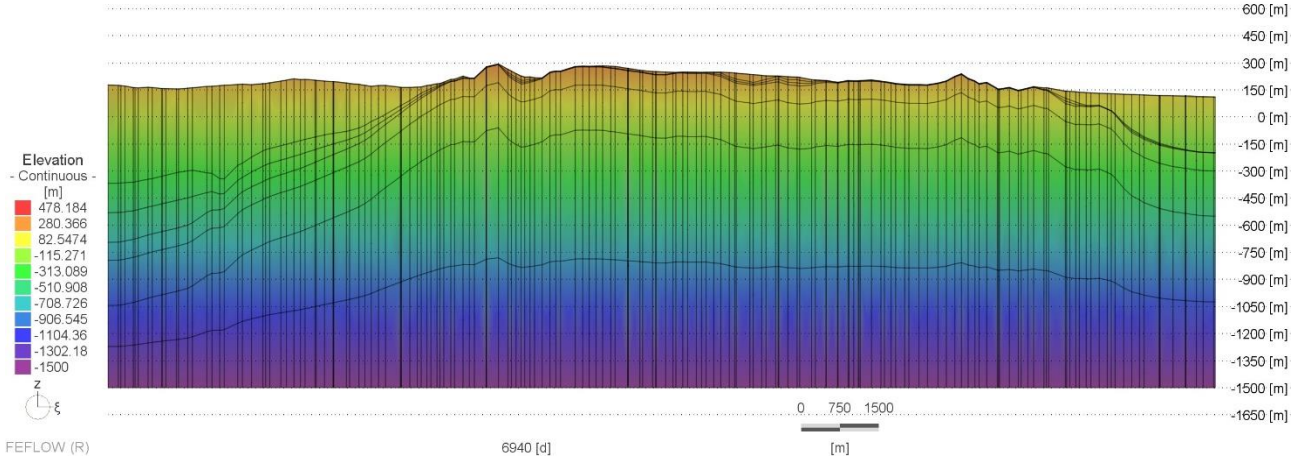
A fúrásokból kinyert információ alapján az egyes rétegek felszínét az ArcGIS Desktop 10.5.1 térinformatikai szoftvercsaláddal szerkesztettük. A numerikus modellben a terepszint képezi a felső felületet. A modellbe a felszíni domborzat az OVF 10 méteres digitális domborzat modellje alapján készült. A 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 (***4. ábra***) és Ny-K-i szelvényen (***5. ábra***) mutatjuk be. A 8 réteg felülről lefelé a következő:

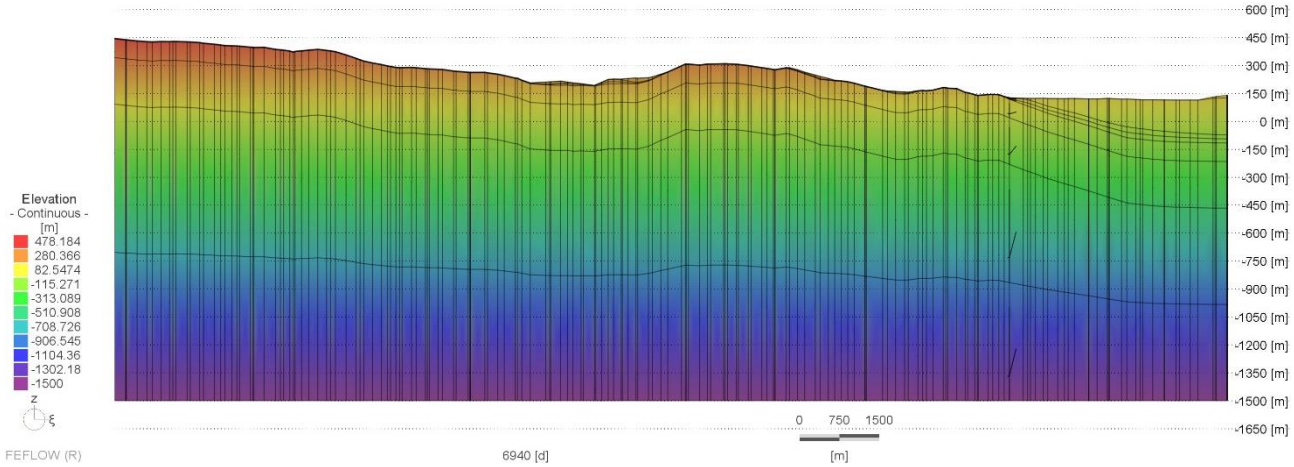
- 1. réteg: Kvarter és felső-pannon képződmények
- 2. réteg: Alsó-pannon – miocén – oligocén képződmények
- 3. réteg: Függőkarsztos rétegcsoport – mészkő
- 4. réteg: Függőkarsztos rétegcsoport – vízrekesztő képződmények
- 5. réteg: Főkarszt felső 100 m-es vastagságú része
- 6. réteg: Főkarszt 250 m vastagságú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

2. 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							

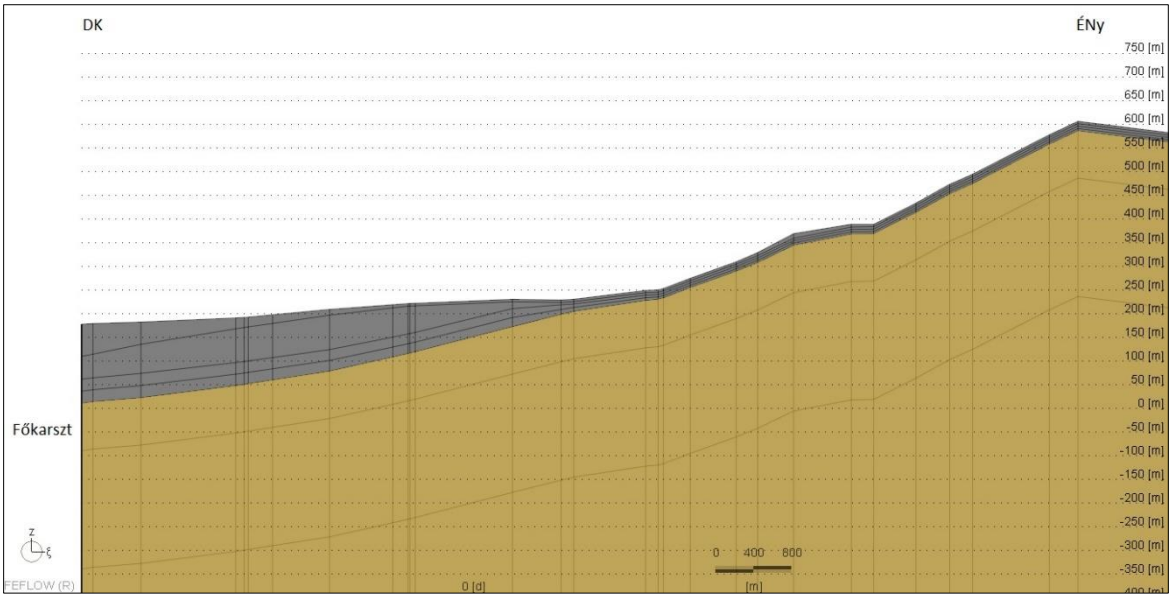


4. ábra: A Kincsesbánya numerikus modellterület É-D-i irányú szelvénye (3,5x túlmagasítás)



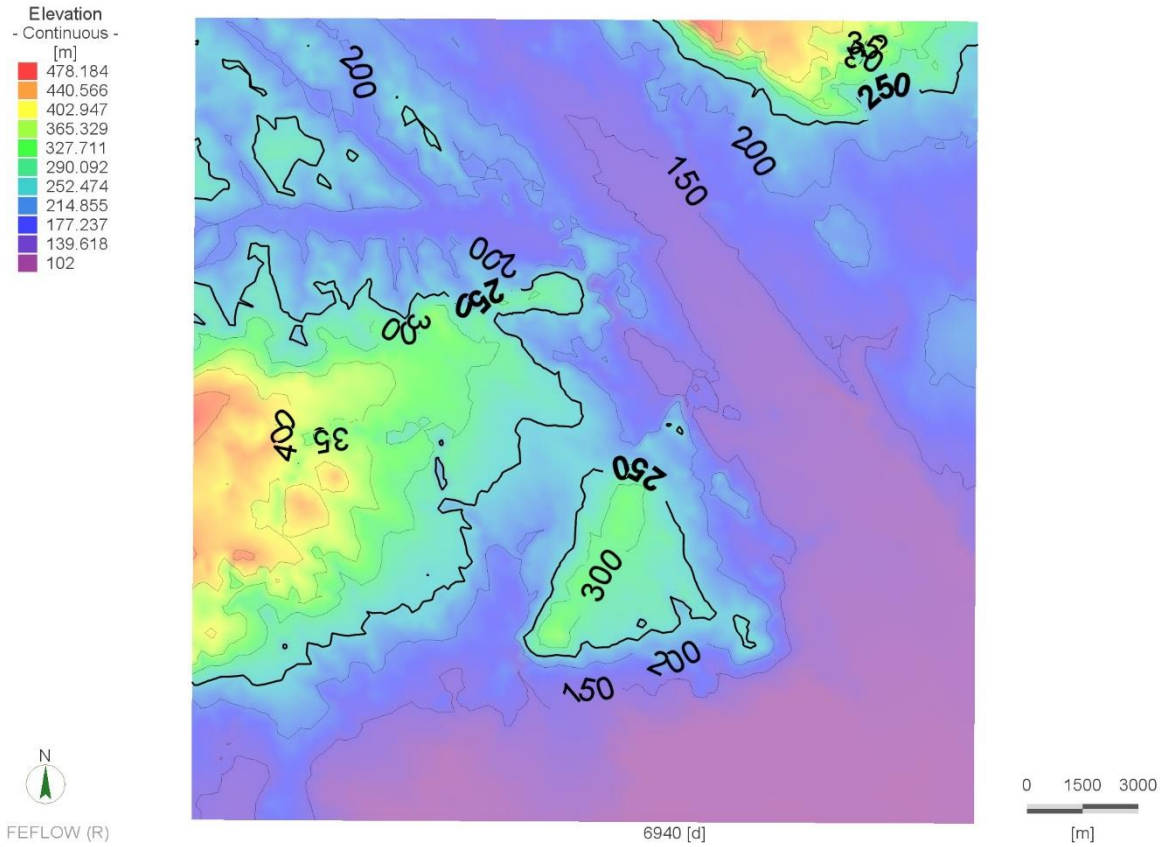
5. ábra: A Kincsesbánya numerikus modellterület Ny-K-i irányú szelvénye (3,5x túlmagasítás)

A ***6. ábra*** szemlélteti azt, hogy a modell geometriájának kialakítása során, miként vettük figyelembe azokat a területeket, ahol a valóságban a főkarszt a felszínen van. Ezeken a helyeken – hasonlóan a regionális modellhez – az adott rétegben a geometriai megoldáson túl, paraméterváltást alkalmazunk a főkarsztvíztároló leképezésére (***2.6.1. fejezetre***).

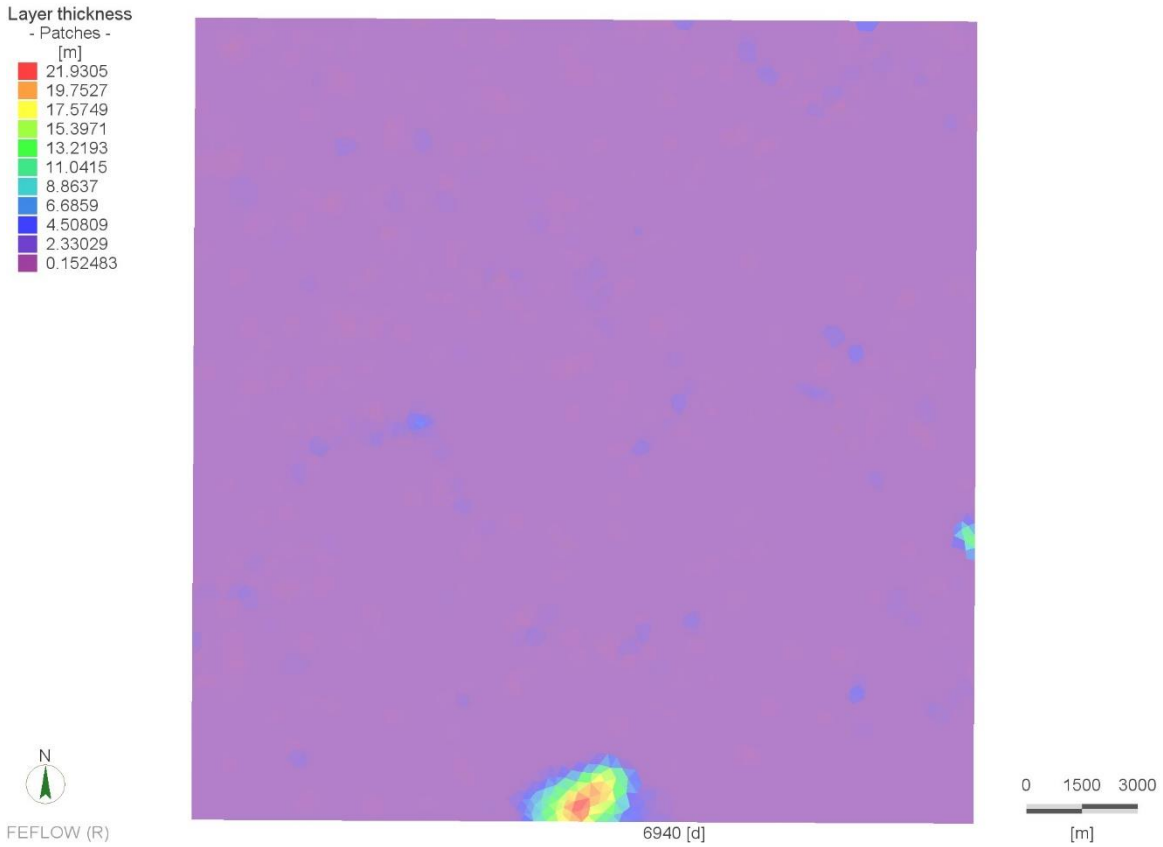


6. ábra: Példa a főkarszt kibúvás geometriai leképezésére egy numerikus modellben (5x túlmagasítás) (forrás: *Smaragd GSH 2020 [3]*)

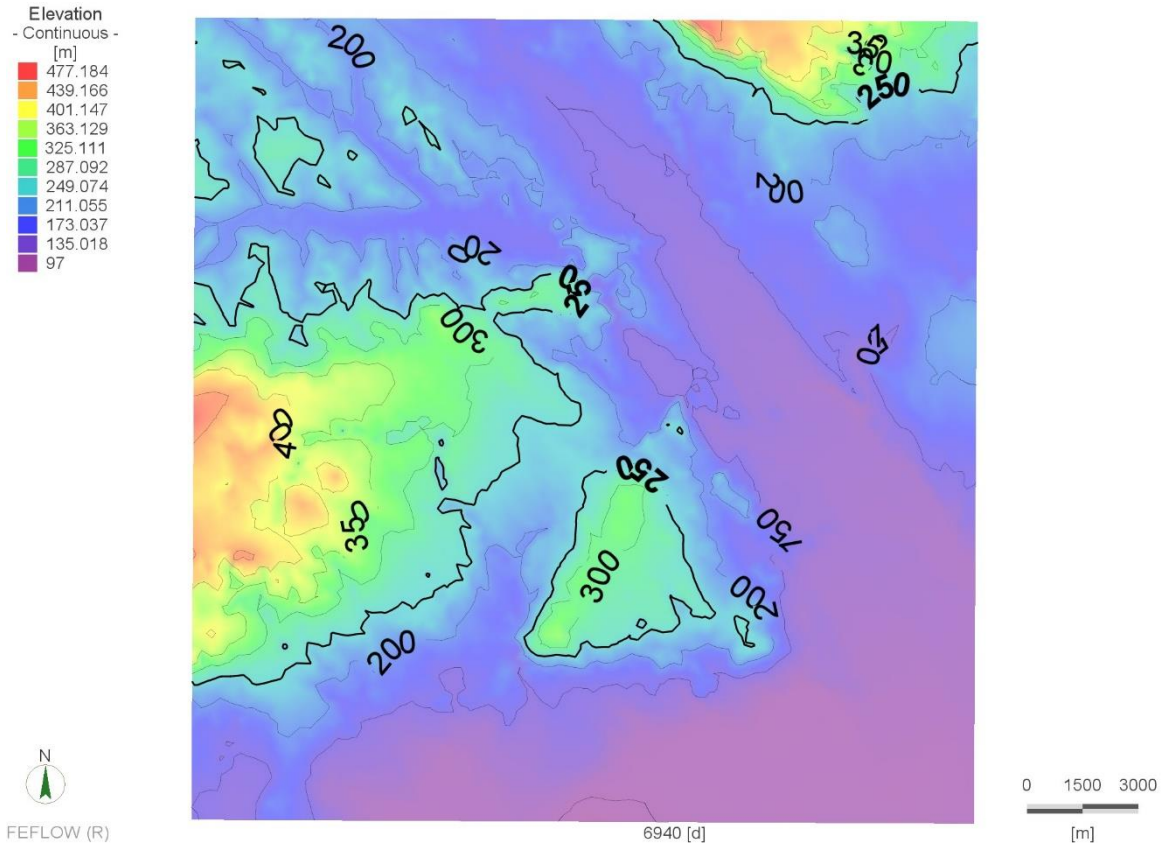
A ***7-15. ábra*** sorozat mutatja be a numerikus rétegek egyes felszíneit Kincsesbánya lokális modell területén.



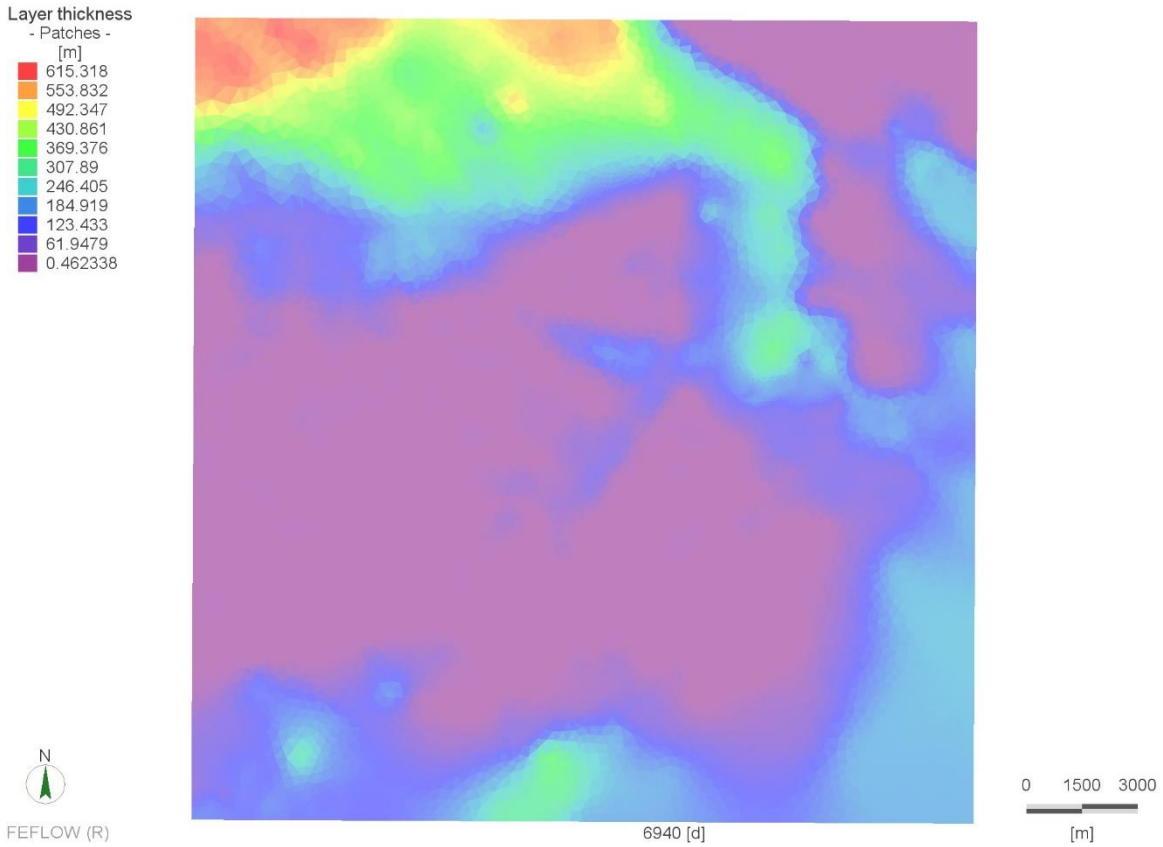
7. ábra: Az 1. numerikus modellfelszín [mBf]



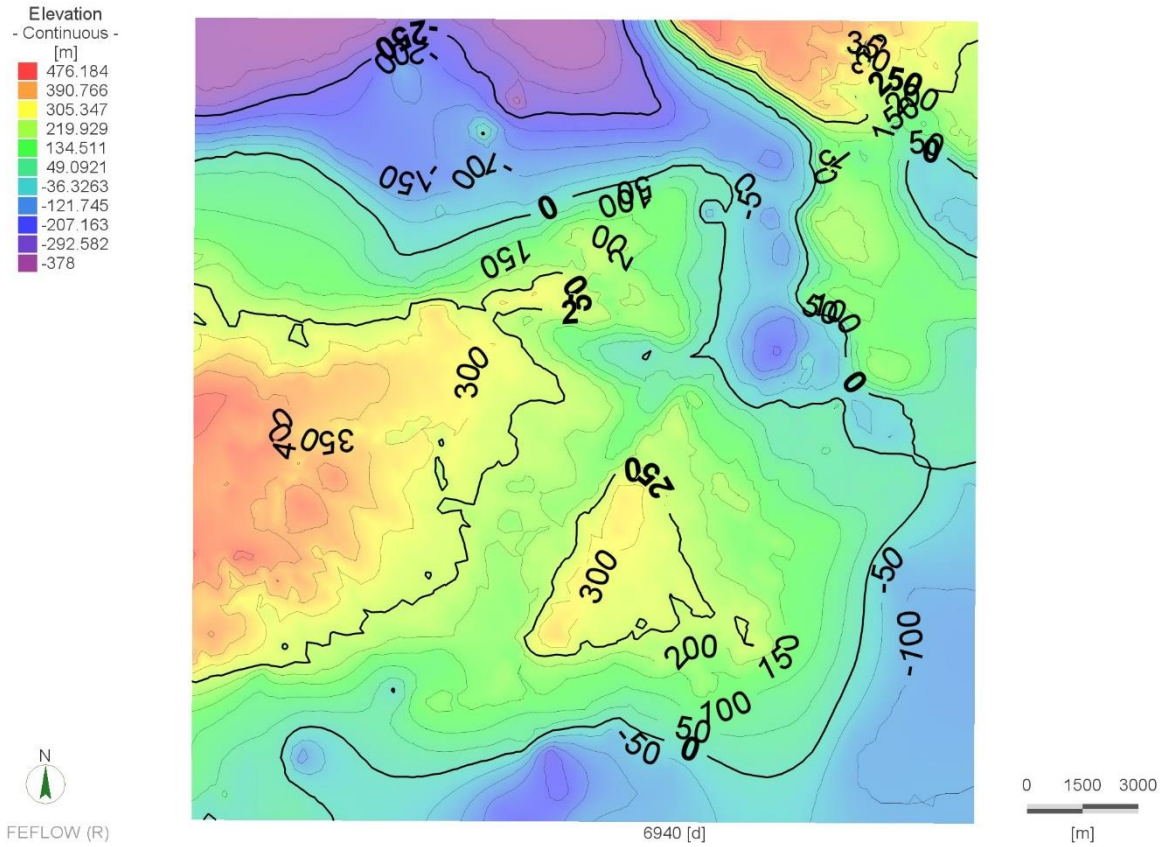
8. ábra: Az 1. numerikus modellréteg vastagsága [m]



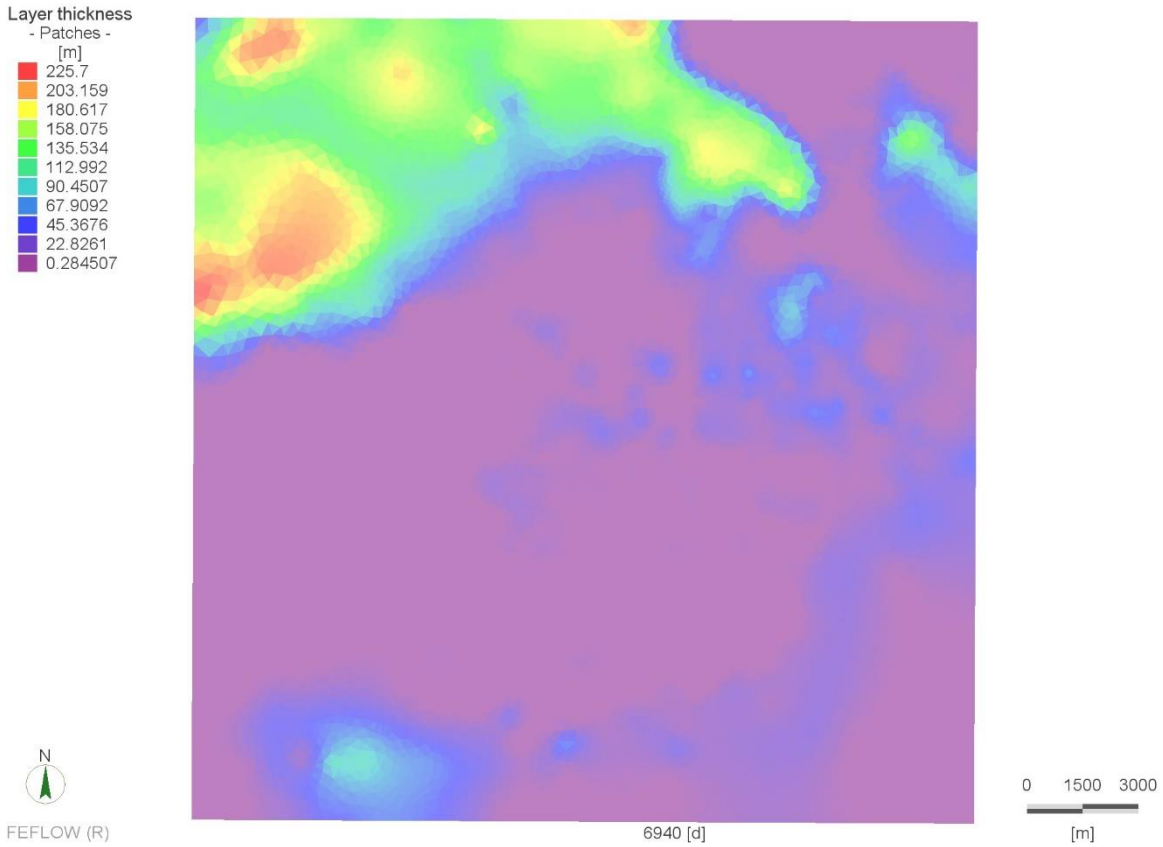
9. ábra: A 2. numerikus modellfelszín [mBf]



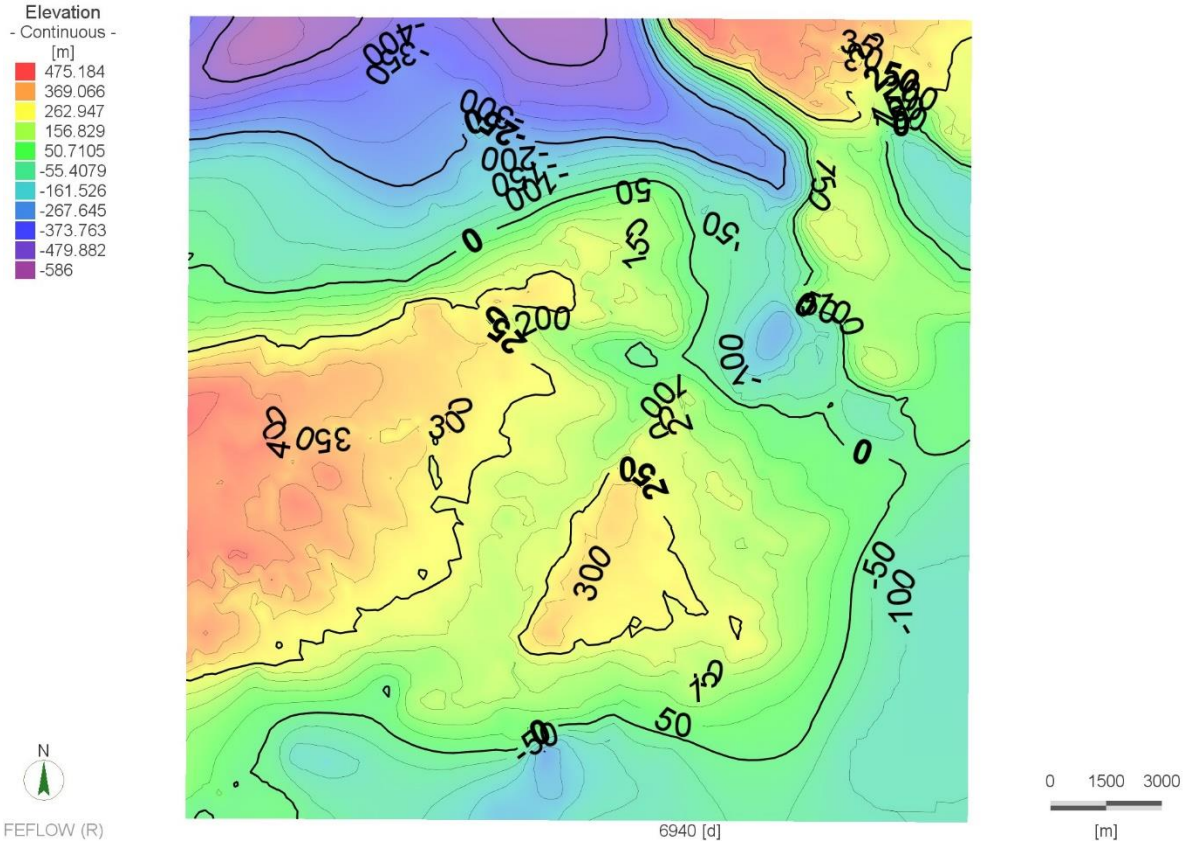
10. ábra: A 2. numerikus modellréteg vastagsága [m]



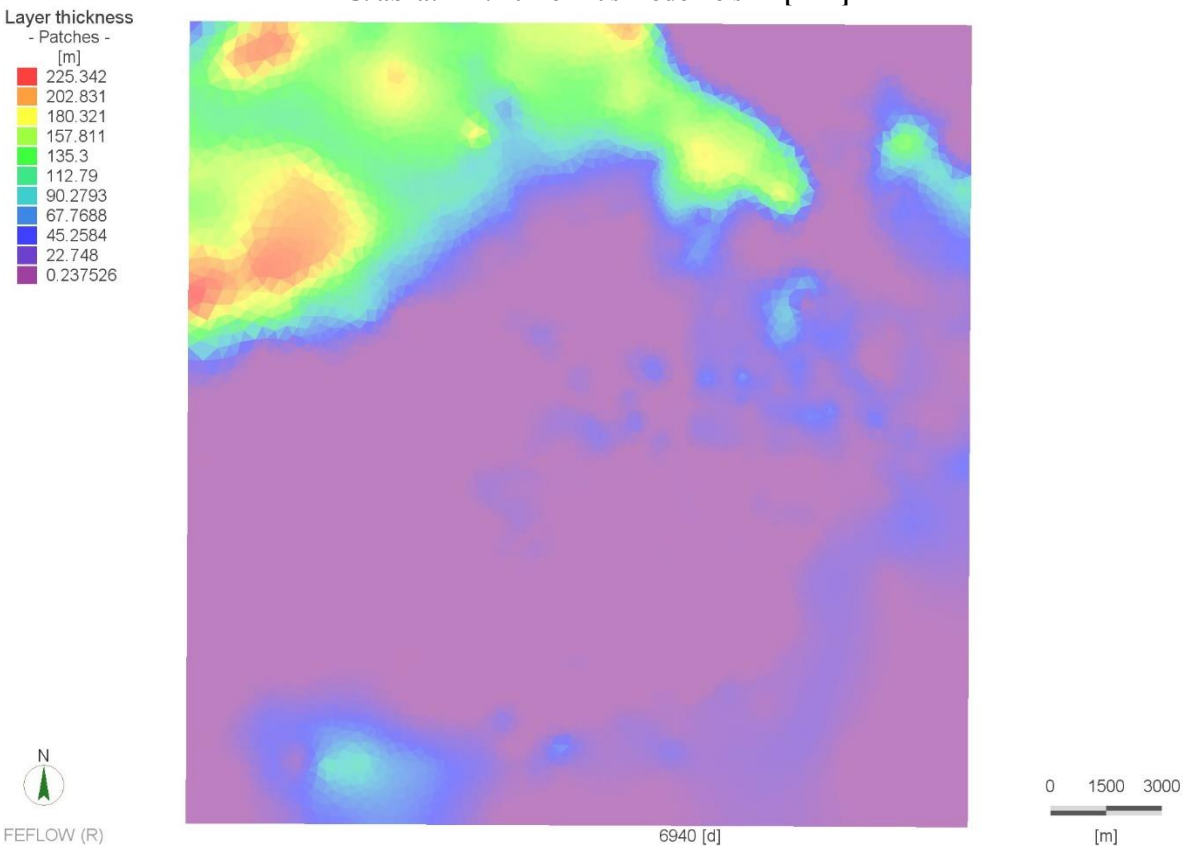
11. ábra: A 3. numerikus modellfelszín [mBf]



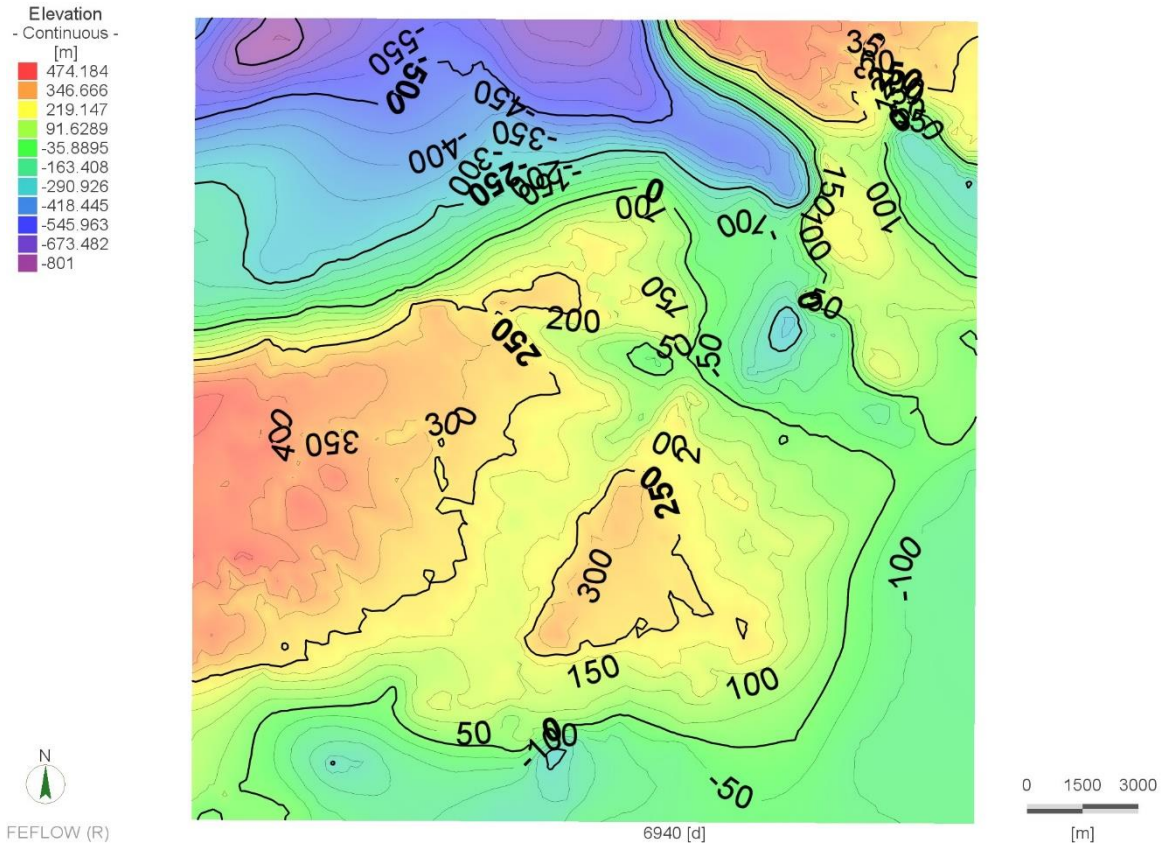
12. ábra: A 3. numerikus modellréteg vastagsága [m]



13. ábra: A 4. numerikus modellfelszín [mBf]



14. ábra: A 4. numerikus modellréteg vastagsága [m]



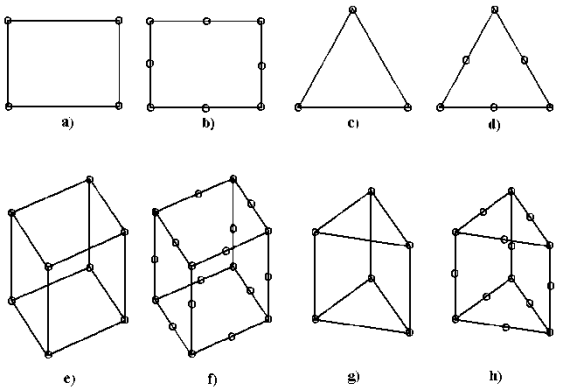
15. ábra: Az 5. numerikus modellfelszín [mBf]

2.5 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 Kincsesbánya lokális numerikus modellhez 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 (***16. 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.



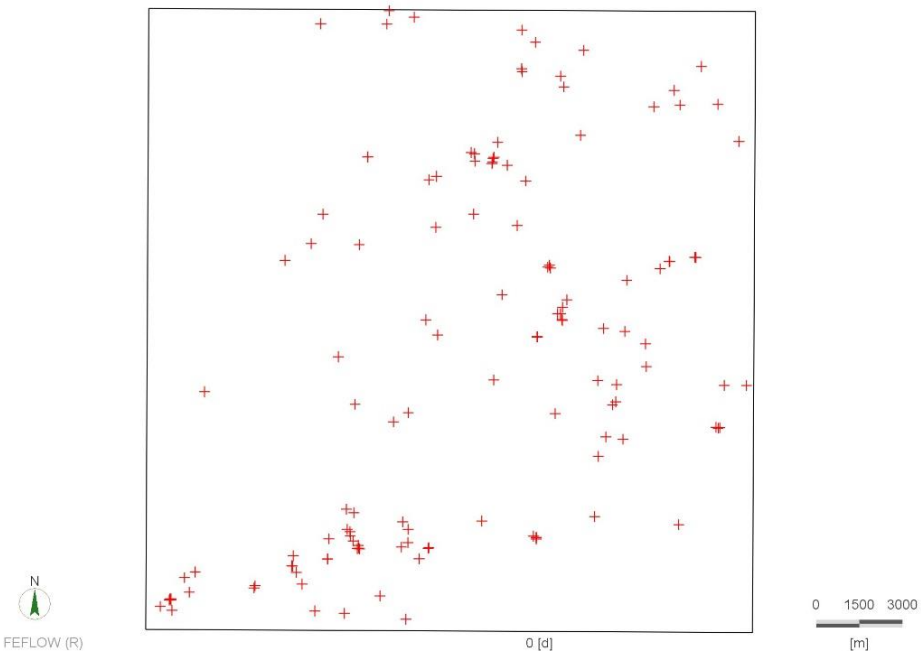
2D modul:
a) 4-csomópontos
b) 8-csomópontos négyoldalú elemek
c) 3-csomópontos
d) 6-csomópontos háromoldalú elemek
3D modul:
e) 8-csomópontos
f) 20-csomópontos négyoldalú prizmák
g) 6-csomópontos
h) 15-csomópontos háromoldalú prizmák

16. 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 (***17. 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 vízfolyások hálózata.

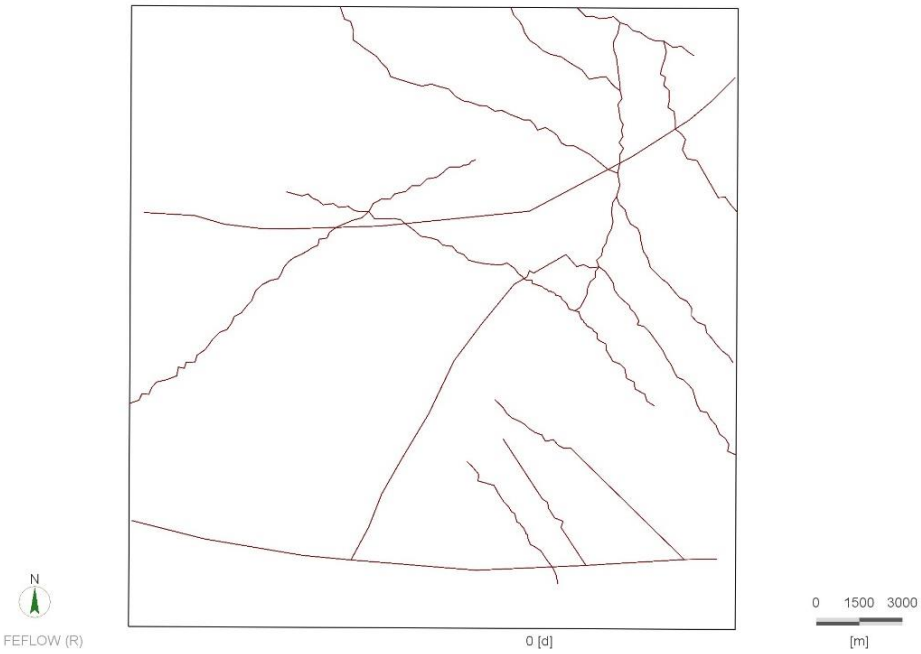
A vízfolyásokat egyszerűsített vonal elemekkel definiáltuk (***18. ábra***), hogy elkerüljük a felesleges pontokon való sűrítést. A vízfolyások hálózatát az OVF vízrajzi állományából szűrtük le méret, illetve a karszttárolóval való kapcsolat szerint. A regionális modellel ellentétben, a lokális modellben a kisebb vízfolyásokhoz is rendeltünk csomópontot.



17. ábra: Pont elemek

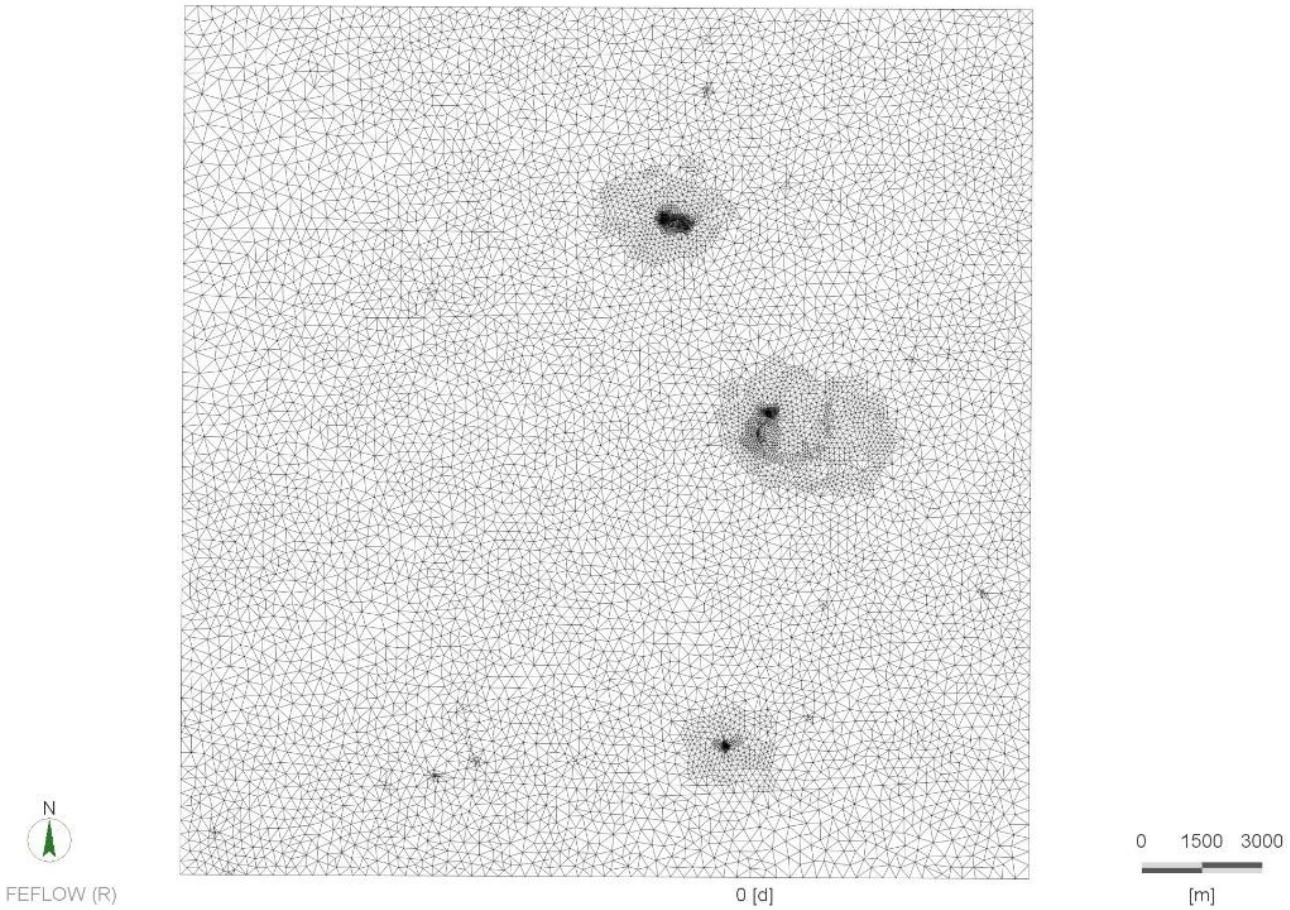
18. ábra: Egyszerűsített vízfolyáshálózat

A vetőket az M= 1:500 000 prekainozoos földtani térkép [18] és a terület prealbai földtani térképe [19] alapján vettük figyelembe (***19. ábra***).



19. ábra: Egyszerűsített vetőhálózat

A mesh generálást a FEFLOW Triangle Mesh Generator funkciójával végeztük el. A modellterületen 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 ***20. ábrán*** a Kincsesbánya lokális modellterület rácshálója látható.



20. ábra: A Kincsesbánya numerikus modell rácshálója

2.6 A numerikus modell hidraulikai paraméterezése

2.6.1 Szivárgási tényező értékek a numerikus modellben

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

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

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

ahol h: a hidraulikus emelkedési magasság [m]

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

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

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

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

A 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*) [15] 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*) [14]. 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 ***21-28. ábrák*** mutatják, a különböző hidrosztratigráfiai egységek, illetve kőzettestek szivárgási tényező értékeit a ***2. 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 ***2. 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 a felére csökkentettük y irányban az értékeket. A későbbi kalibrálás során ez az arány lokálisan, a karsztos területek kis részén változhatott, de jellemzően K_x/K_y arány 1:2 maradt. A modellben a szivárgáshidraulikai paraméter referencia tengelyét elforgattuk, az elforgatás szöge: 40°. A karbonátos képződményekre jellemző a nagyfokú karsztosodás, mely gyakran vertikális irányban is nagyfokú vízvezető képességet eredményezhet. Ez alapján a karsztos területeken a K_x/K_z arány az adott terület földtani sajátosságai alapján rendkívül változatos lehet. Ennek értelmében bizonyos területeken (elsősorban a nyílt karsztos területek alatt) a vertikális szivárgási tényező értéket (Kz) is megnöveltük. A legnagyobb szivárgási tényező értékeket a modellterületen található jelentősebb vízkivételi központok (rákhegyi és csóri akna) közvetlen környezetében adtuk, ezzel reprezentálva a bányászati beavatkozás hatását a földtani közegre.

A modellterületen belül alapvetően három fő beszivárgási területet különíthetünk el. A terület középső-DNy-i részén, Csór településtől északra elhelyezkedő terület földrajzilag a Keleti-Bakonyhoz tartozik és jelentős beszivárgási zónának tekinthető. Viszonylag nagy kiterjedésben jelenik meg itt nyílt karsztos terület, amely az 1-8. rétegekben nyomon követhető, változó szivárgási-tényező értékekkel jellemezhető. Ezt a területet kőzetek képződési kora alapján további két részre

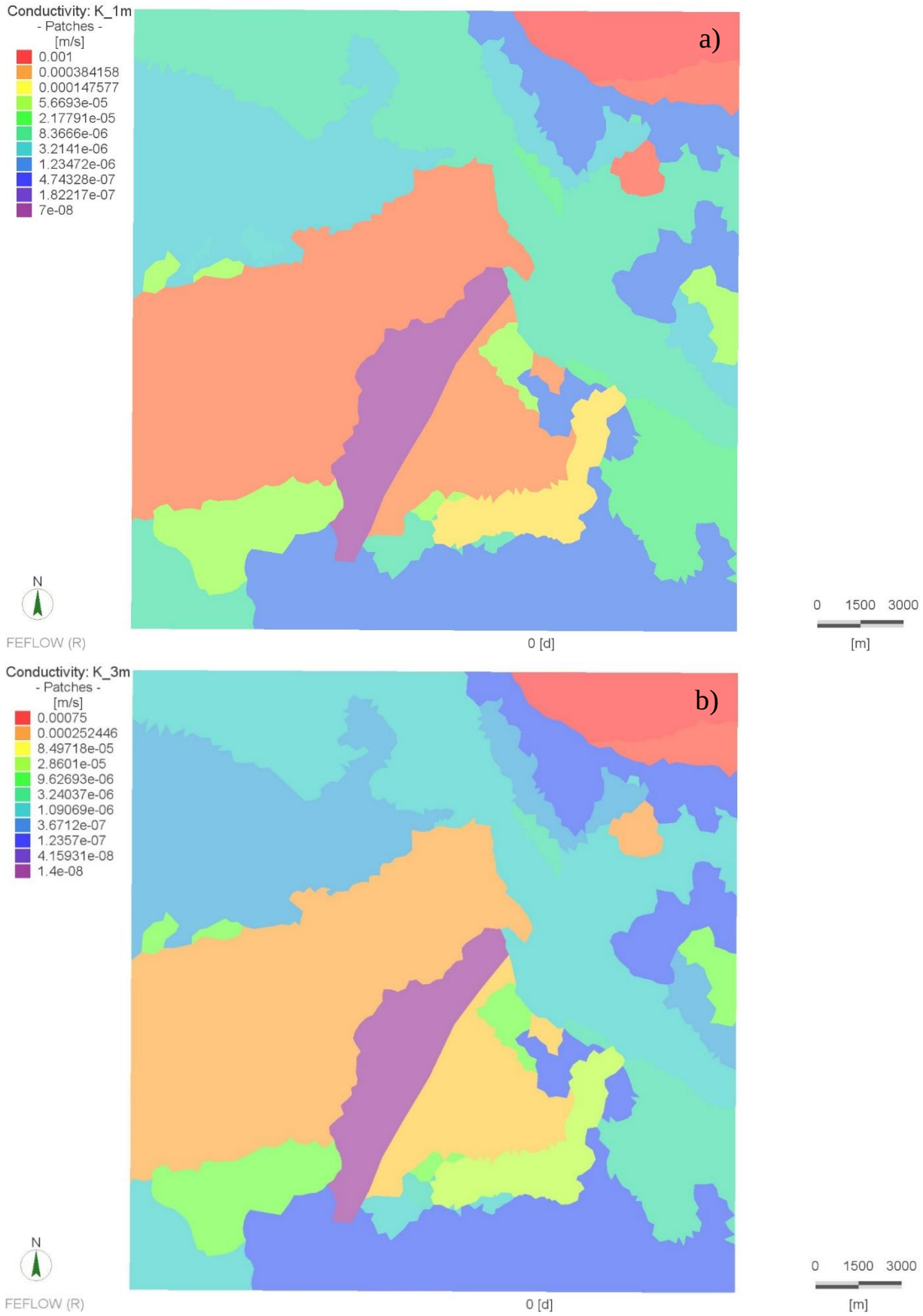
osztottuk, de mindkettő kiemelten jó vízvezetőnek tekinthető. A felső-triász Fődolomit Formáció képződményei az 1-4. rétegekben viszonylag jó vezetőképesség értékekkel ($K_x=5\cdot10^{-4}$ m/s) rendelkeznek, míg az 5-6. rétegben ez a terület valamivel rosszabb vízadó képességgel ($K_x=1{,}5\cdot10^{-4}/5\cdot10^{-7}$ m/s) lett jellemezve. A DK-i irányban elhelyezkedő idősebb triász képződmények a felső 1-4. rétegekben valamivel alacsonyabb ($K_x=2\cdot10^{-4}$ m/s) konduktivitás értékekkel lettek megadva, de egyébként kifejezetten jó vízadó karsztos képződménynek tekinthetők.

A modellterületre Ny-i irányból benyúló nyílt karsztos rész a Tési-fennsíkhoz kapcsolódik, míg az É-i nyílt karsztos terület már a Vérteshez tartozik. A két terület között, az 1-4. rétegekben a Móri-árkot kitöltő fiatal (kvarter – felső-pannon) üledék helyezkedik el. A két terület között több vető is található, melyek földtanilag is elválasztják azokat. A Móri-árok a modellben viszonylag nagy vastagságú, porózus üledékek formájában jelenik meg. Ezek részben rossz vízadó finomszemcsés képződmények, de jó vízadó homokos-kavicsos képződmények is megjelennek. E képződmények (agyag, aleurit, homok, kavics) szivárgási tényező értékei $K_x=1*10^{-7}$-$5{,}8*10^{-6}$ m/s között változnak.

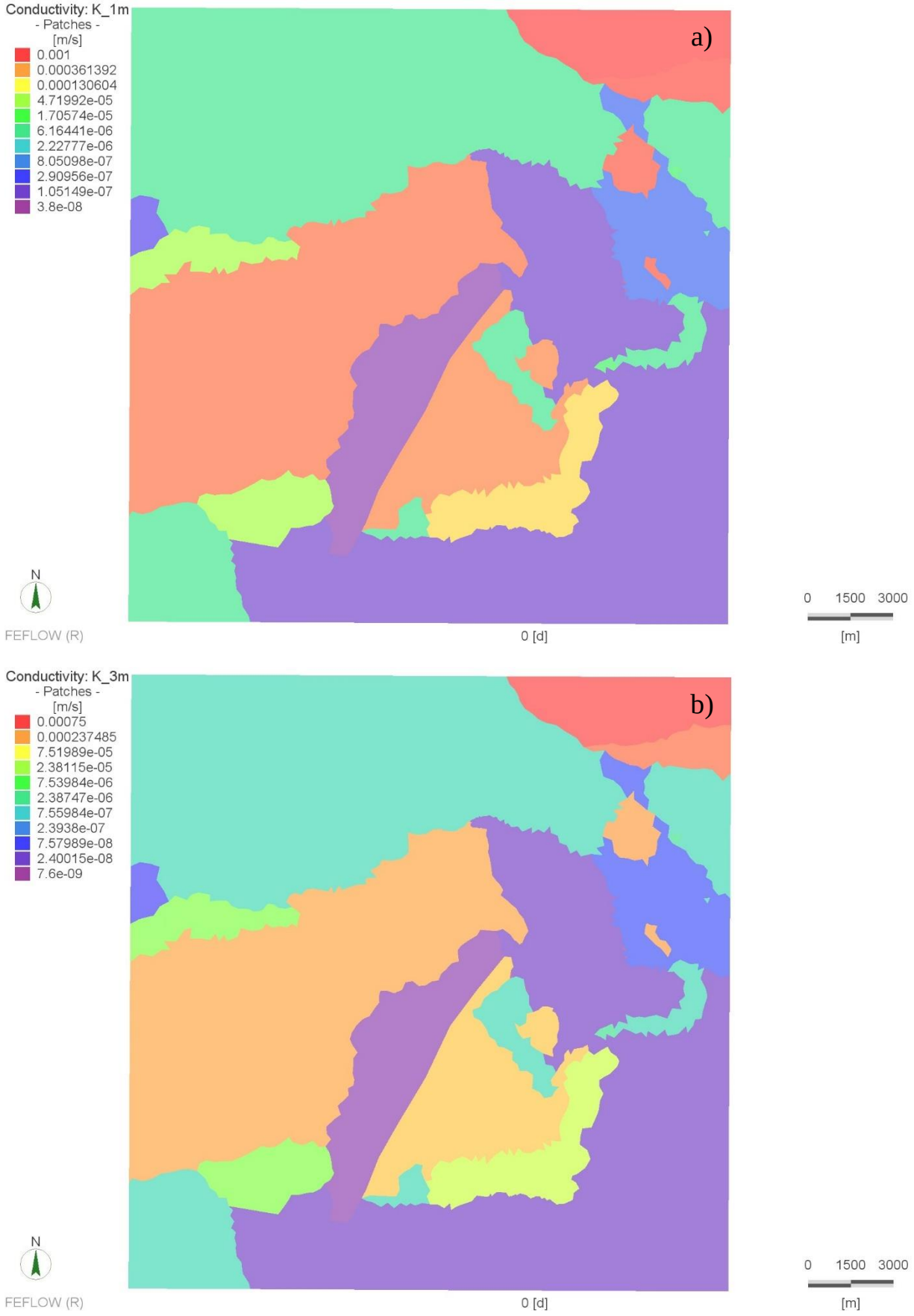
A 3-4. rétegekben, Kincsesbánya és Bakonycsernye térségében megjelenő függőkarsztos képződményekhez tartozó rossz vízadó márgák ($K_x=2*10^{-7}$ m/s), illetve jó vízadó mészkövek ($K_x=5*10^{-5}$ m/s) is megjelennek.

Bodajkon és tőle északra az 1. réteg fiatal porózus képződményei alatt a 2-4. rétegekben nagy kiterjedésben jelenik meg a jó vízadó képességgel jellemezhető Csatkai Formáció ($K_x=5{,}8\cdot10^{-6}$ m/s), melynek kiterjedése a mélységgel csökken a modellterület nyugati felén megjelenő eocén és kréta függőkarsztos képződmények mellett.

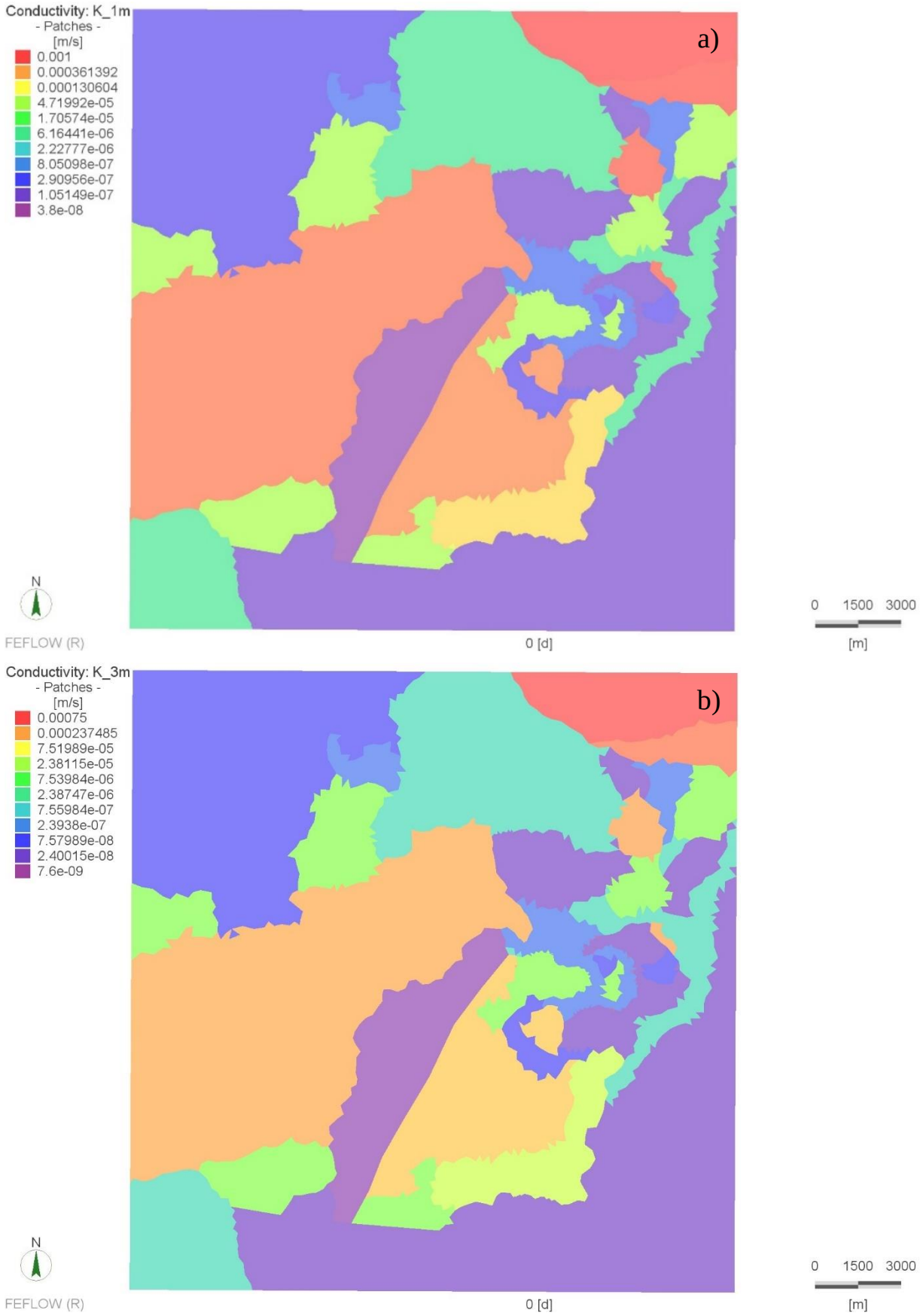
A 1-4. rétegekben a Vérteshez tartozó nyílt karsztos területek valamivel nagyobb szivárgási tényező értékekkel ($K_x=1\cdot10^{-3}$ m/s) rendelkeznek, mint a Tési-fennsík ($K_x=6\cdot10^{-4}$ m/s). A Vértesi terület szivárgási tényezője a Dachsteini Mészkő előfordulása miatt magasabb. Az 5-6. rétegekben a két terület a modellt Ny-K-i irányban keresztülszelő vető mentén határolódik el. Az 5. rétegtől kezdve a nyílt karszt alatti képződmények a mélységgel egyre csökkenő hidraulikus vezetőképesség értékkel rendelkeznek. A Tési-fennsík és az iszkai nyílt karsztos terület képződményei az 5-6. rétegtől továbbra is elkülönülnek egy ÉK-DNy-i irányú vető mentén, azonban a mélység növekedésével egyre kisebb paraméterértékekkel rendelkeznek. Ez a vető az úgynevezett Bakonykúti-feltolódás, amely hidraulikailag vízrekesztő szerepet tölt be és jelentős hatással van a térség felszín alatti vízáramlására.



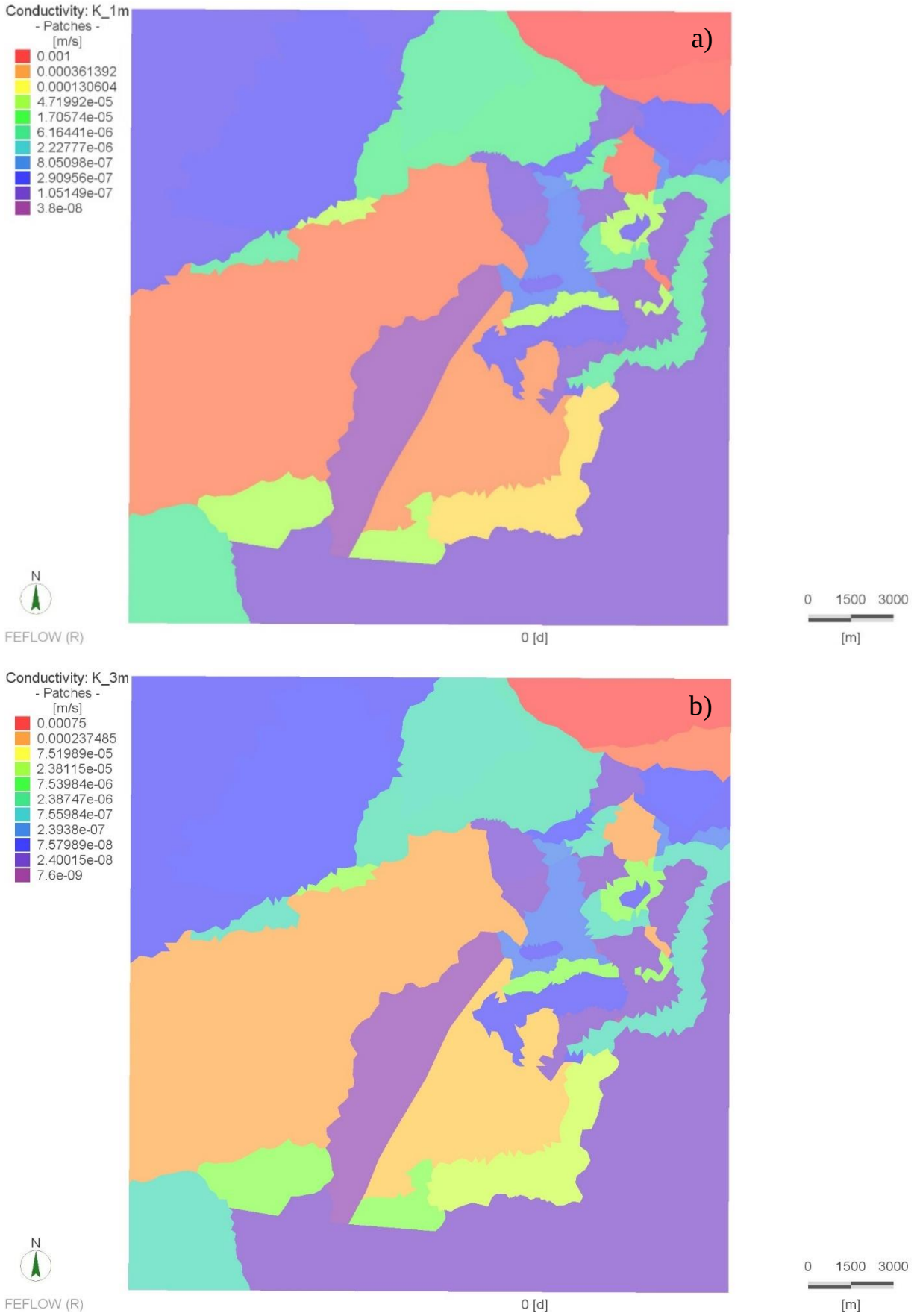
21. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



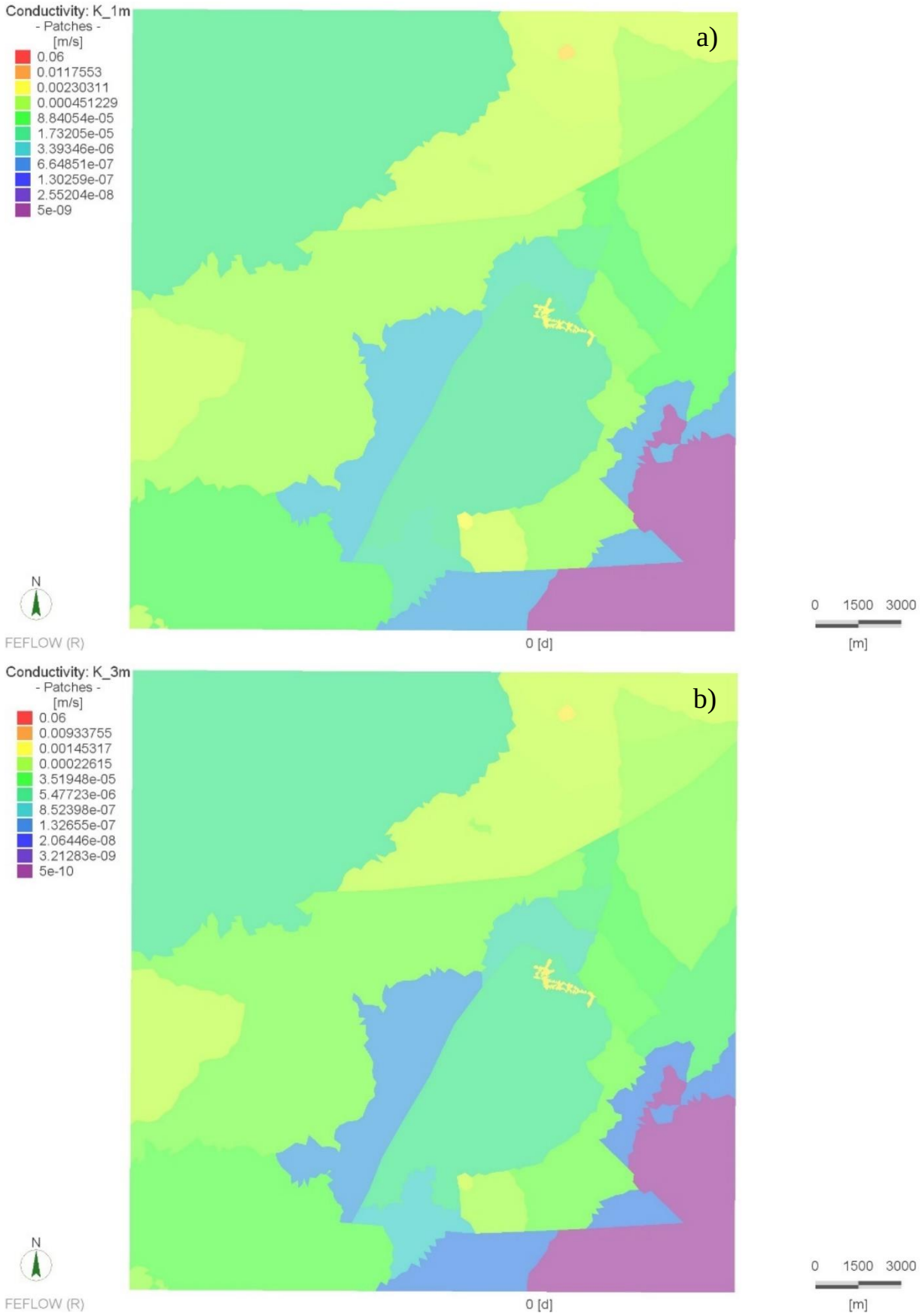
22. ábra: A 2. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



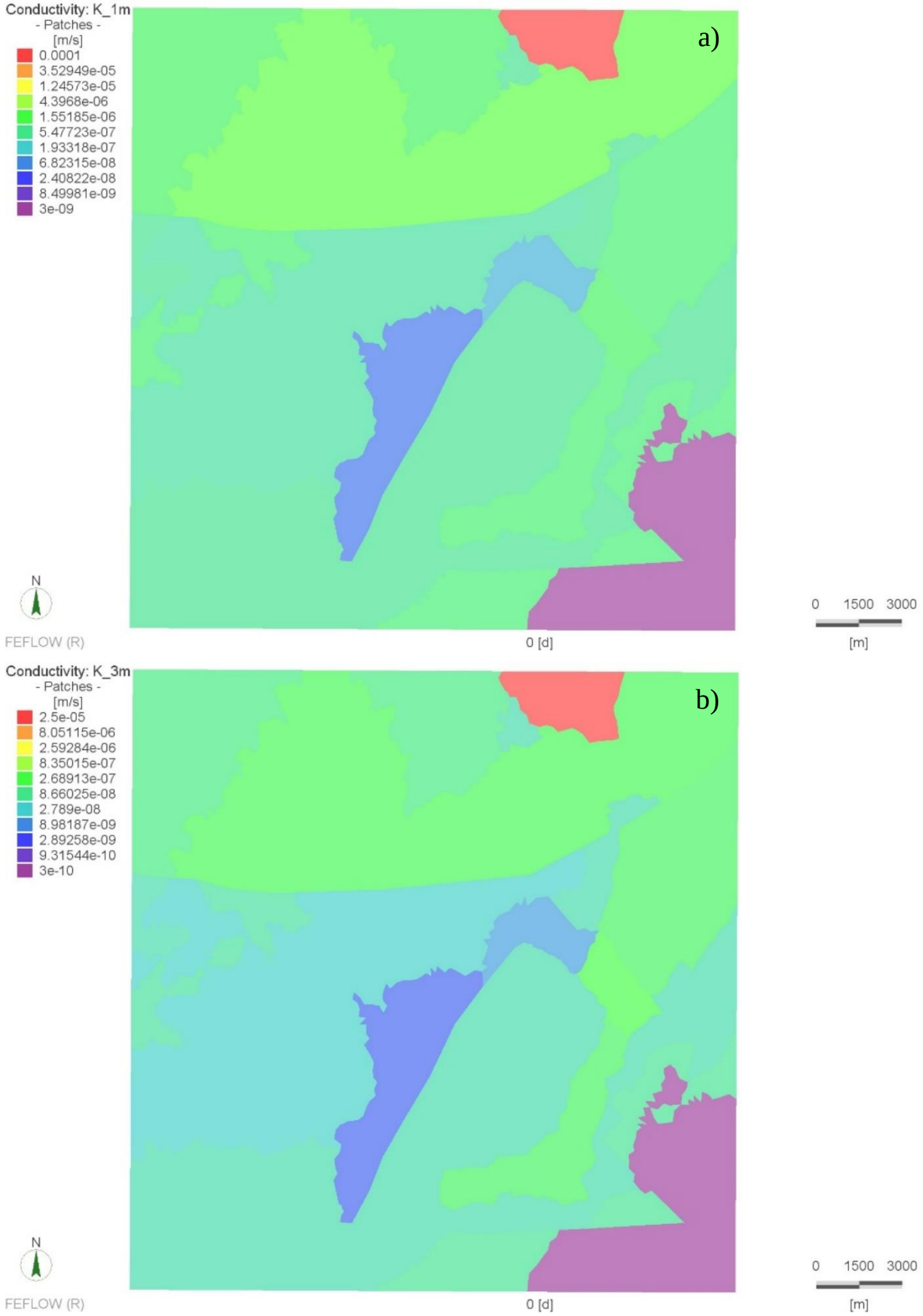
23. ábra: A 3. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



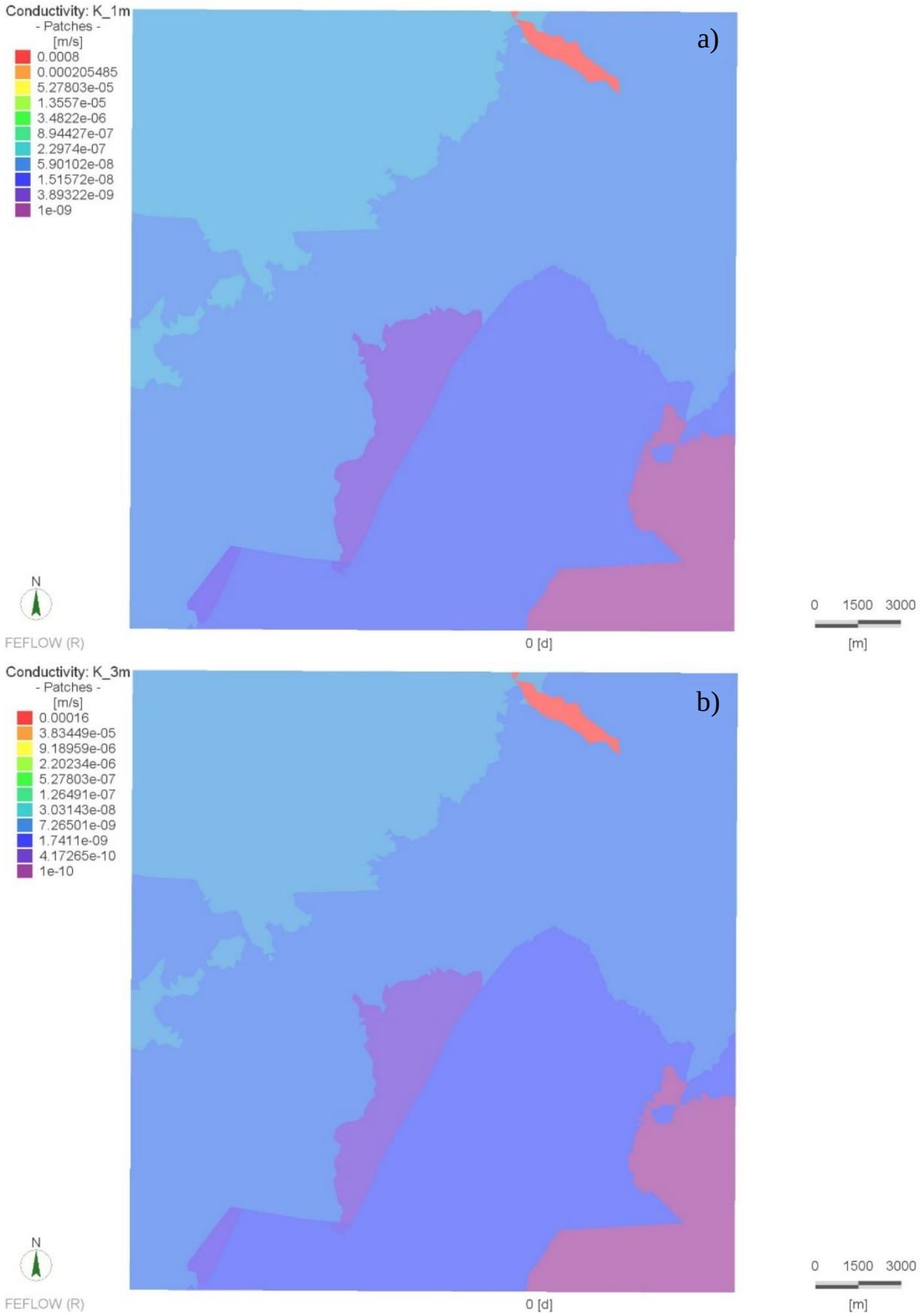
24. ábra: A 4. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



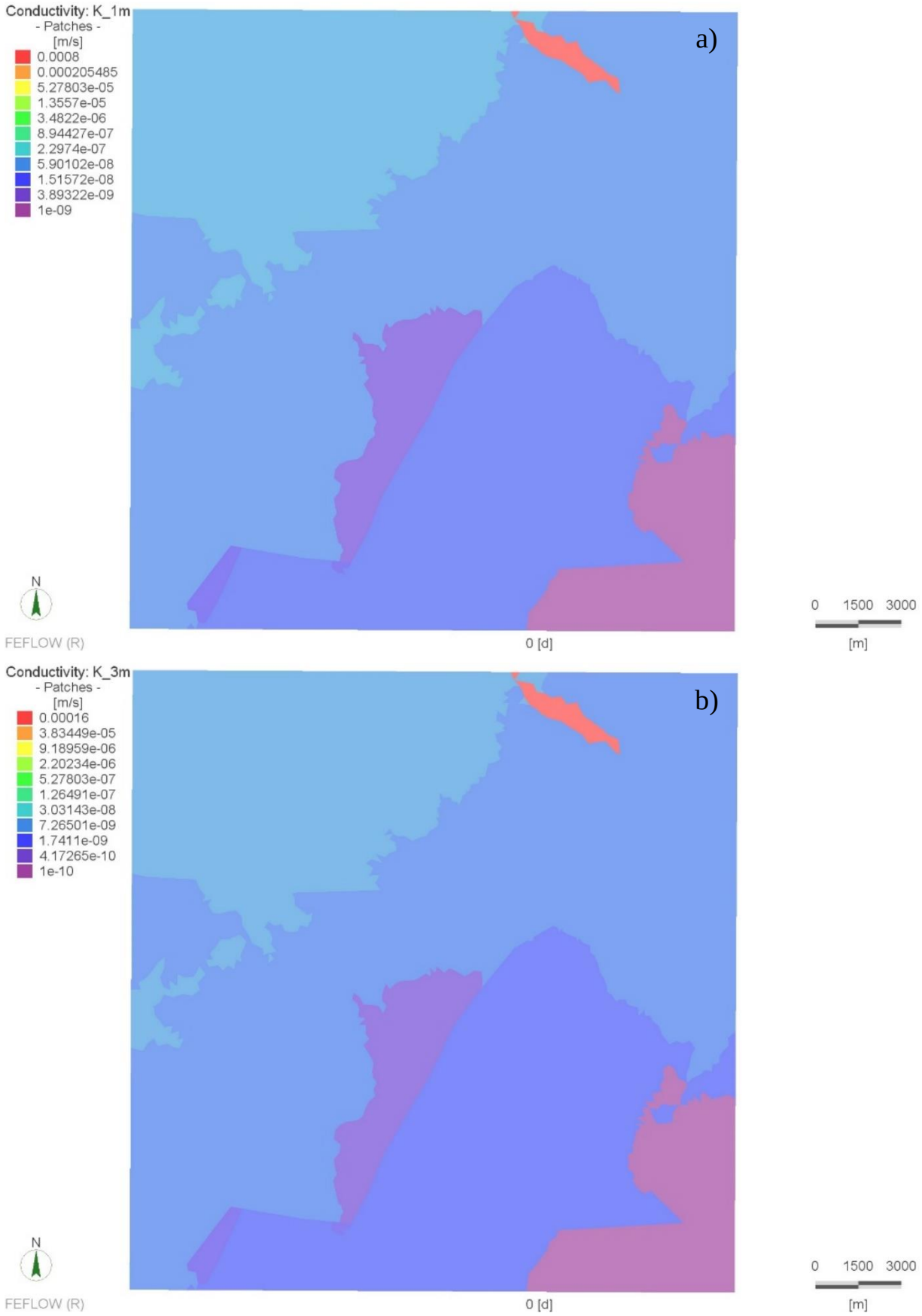
25. ábra: Az 5. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



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



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

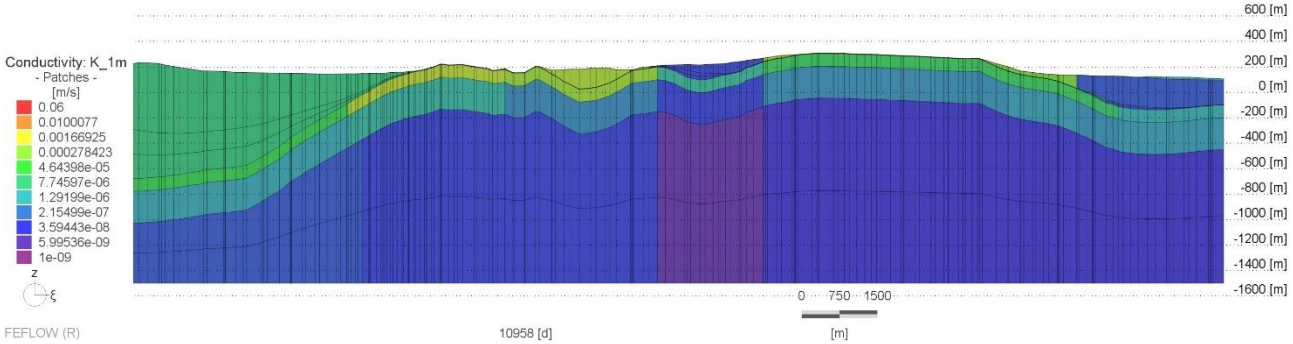


28. ábra: A 8. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás

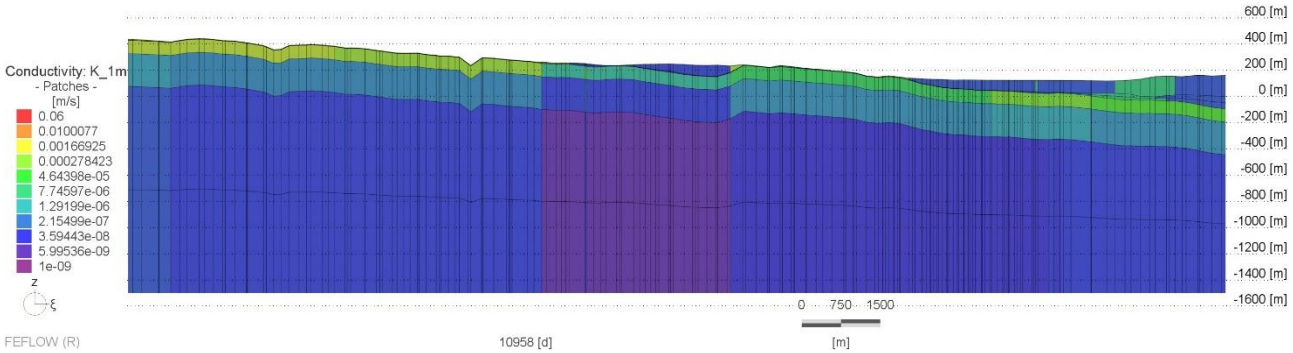
2. táblázat: Az egyes képződmények K-tényező értéke a numerikus modellben

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)	kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)
1	Q-Pa2	Prealbai (T3 Fődolomit Fm./Dachsteini Mkő.)	1E-03-5E-04	Kx*0.5	7,5E-04-1,5E-04	Prealbai (T2-3 Vértesi Fmcs.)	2E-03	Kx*0.5	4E-05	Q-Pa2	3E-06-5E-05	Kx*0.5-1	1,7E-05-6E-07	Q-Pa2	5E-05-3E-06	Kx*0.5-1	1,7E-05-6E-07	Q-Pa2	5,8E-06-1E-06	Kx*1	1,16E-06-2E-07	Q-Pa2	5E-05-7E-08	Kx*0.5-1	1,67E-05-1,4E-08
2	Pa1-M-Ol									Pa1-M-Ol	5,8E-06	Kx*1	1,16E-06-2E-08	Függőkarszt (mészkő/márga)	5E-05/2E-07	Kx*0.5	1,7E-05/6,7E-08	Pa1-M-Ol	5,8E-06-1E-07		1,16E-06-2E-08				
3	Függőkarsztos rétegcsoport - mészkő									Függőkarszt (mészkő/márga)	5-6E-05/2-2,4E-07		1,67-2E-05/ 6,67E-08												
4	Függőkarszt rétegcsoport - vízrekesztő																								
5	Prealbai*		1E-03 - 1,5E-05		5E-04 - 5E-06		9E-04 - 3E-04		2,25E-04 - 7,5E-04		2E-05 - 1,5E-02		2,5E-06-5E-06		2E-05		5E-06		9E-04-5E-09		4E-04-5E-10		2E-04-2,5E-06		1E-04-2,5E-07
6	Prealbai segédréteg		1E-04 - 4E-07		2,5E-05 - 3,2E-08		8E-07		1,7E-07	Prealbai (Fődolomit/ Dachsteini Mkő./ Vértesi Fmcs.) Balatonfelvidéki Homokkő	2E-06-5E-07	Kx*0,5	2E-07-1,25E-08	Prealbai (Fődolomit/ Dachsteini Mkő./ Vértesi Fmcs.)	1E-06-4E-07		1E-07-3,2E-08	Prealbai (Fődolomit/ Dachsteini Mkő./ Vértesi Fmcs.) Balatonfelvidéki Homokkő Lovasi Agyagpala	2E-06-3E-09		2E-07-3E-10	Prealbai (Fődolomit/ Dachsteini Mkő./ Vértesi Fmcs.) Balatonfelvidéki Homokkő Lovasi Agyagpala	8E-07-5E-08		1,67E-07-5E-09
7	Prealbai segédréteg	Prealbai (Fődolomit/ Dachsteini Mkő./ Vértesi Fmcs.) Balatonfelvidéki Homokkő Lovasi Agyagpala	2,5E-08-5E-08		2,5E-09 5E-09	Prealbai (Fődolomit/ Dachsteini Mkő./ Vértesi Fmcs.) Balatonfelvidéki Homokkő Lovasi Agyagpala	2,5E-08		2,5E-09		1E-07-2,5E-08		1E-08-2,5E-09		1E-07-5E-08		1E-08-5E-09		1E-07-1E-09	Kx*0.5	1E-08-1E-10		5E-08-5E-09	Kx*0.5	5E-09-5E-10
8	Prealbai segédréteg																								

* 5. rétegben, rákhegy aknavágatok környezetében: Kx=Ky=Kz=2E-03; csór akna közvetlen környezetében: Kx=Ky=Kz=6E-02; nyílt karsztos kis (lokális) területen: Kx=4E-03; Ky=Kz=2E-03

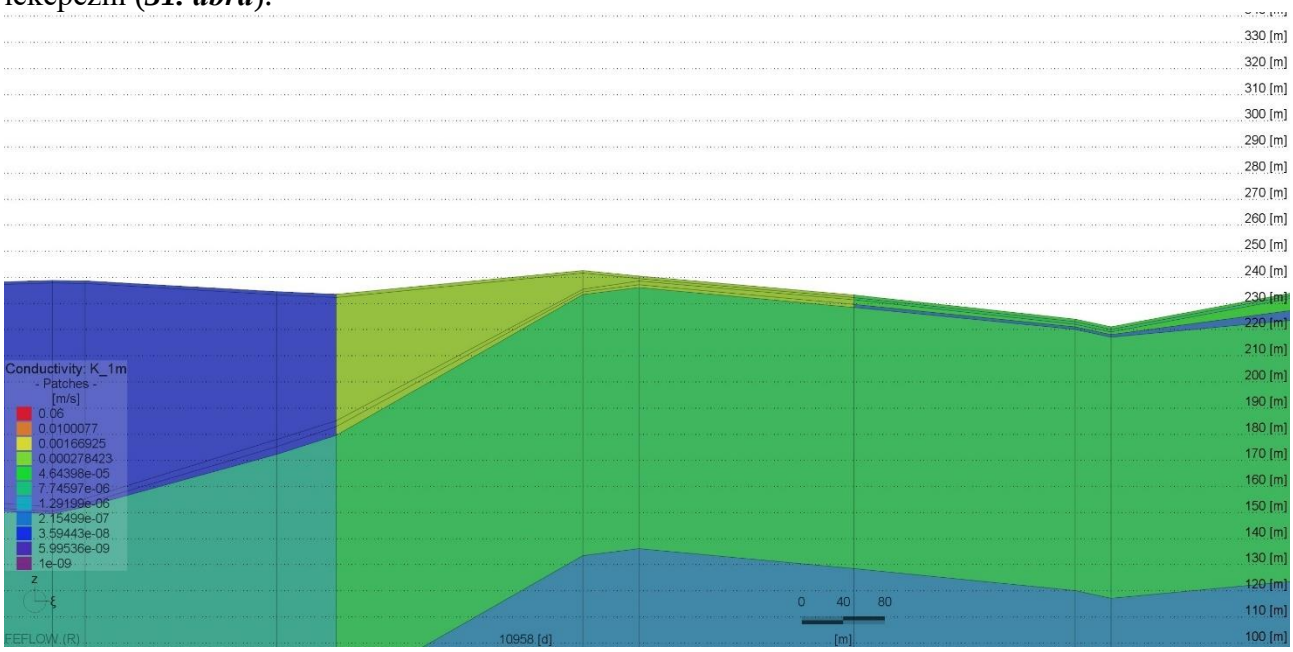


29. ábra: A szivárgási tényező eloszlás É-D-i irányú szelvényen (2,5x túlmagasítás)



30. 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 (***2.4. fejezet***), paraméterváltással lehet leképezni (***31. ábra***).



31. 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 figyelembe venni. A ***3. táblázat*** mutatja, hogy az egyes képződmények melyik numerikus rétegben fordulnak elő.

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

		Numerikus rétegek							
Formáció	Képződmény kora	1. réteg	2. réteg	3. réteg	4. réteg	5. réteg	6. réteg	7. réteg	8. réteg
Kvarter és felső-pannon általában	Q-Pa2								
Nagyvázsonyi Mészkő	Pa2								
Oligocén-miocén vízrekesztő/vízvezető	M-Ol								
Eocén/kréta mészkő	E2								
Eocén/kréta 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								

2.6.2 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 tározással 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:

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

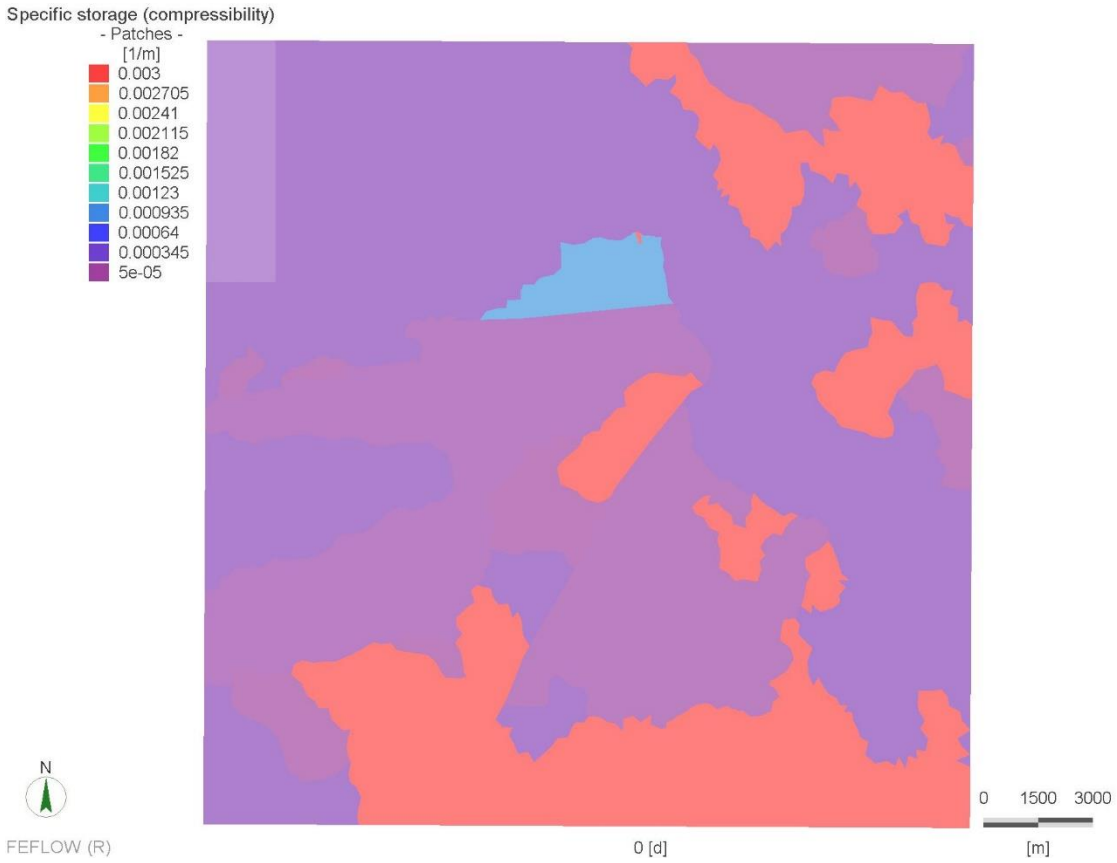
A tranziens áramlási egyenlet a pórusnyomás változás időbeli terjedését írja le. Ha az egyenletet b vastagságú fedett, horizontális víztartóra írjuk le, akkor a következő egyenletet kapjuk:

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

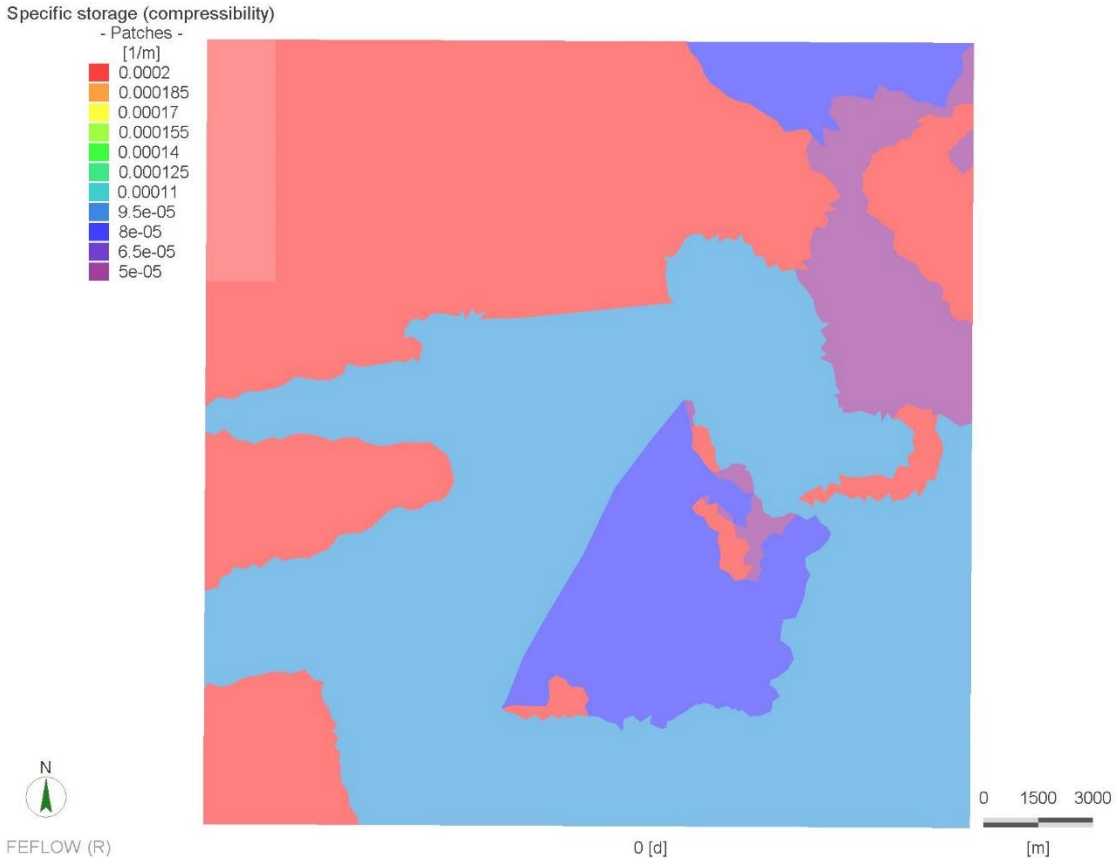
ahol S: a tározási tényező [-], T: a transzmisszivitás [m^2/s]

Első lépésben a fajlagos tározás értékeket irodalmi adatok alapján számoltuk ki a Dunántúli-középhegység regionális modell bemeneti paramétereihez. A fajlagos tározás számításához szükséges, kőzetre jellemző teljes porozitást a T-JAM [15] alapján, míg a közeg

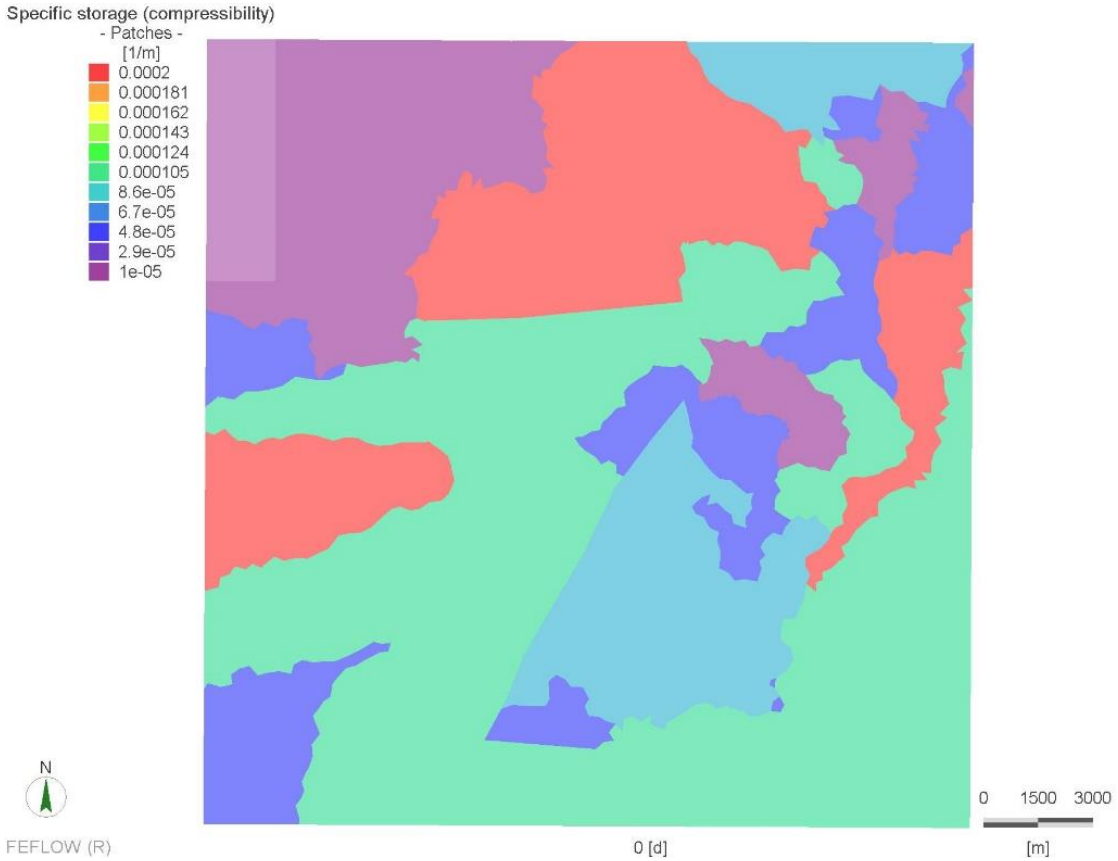
kompresszibilitását (α) *Domenico & Schwartz, 1990* [11] szerint határoztuk meg. Ezeket a kalkulált értékeket használtuk fel később a lokális modell kezdeti értékeinek, majd a kalibráció során pontosítottuk azokat. A fajlagos tározás értékek elkülönítése részben hidrosztratigráfiai egységek alapján történt, 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 kőzettestek hidraulikus tulajdonságát. A 7. rétegtől nincs képződménybeli elkülönítés a fajlagos tározásban. A numerikus modellben a kalibrálás után kapott tározás eloszlását a ***32-37. ábrák*** szemléltetik.



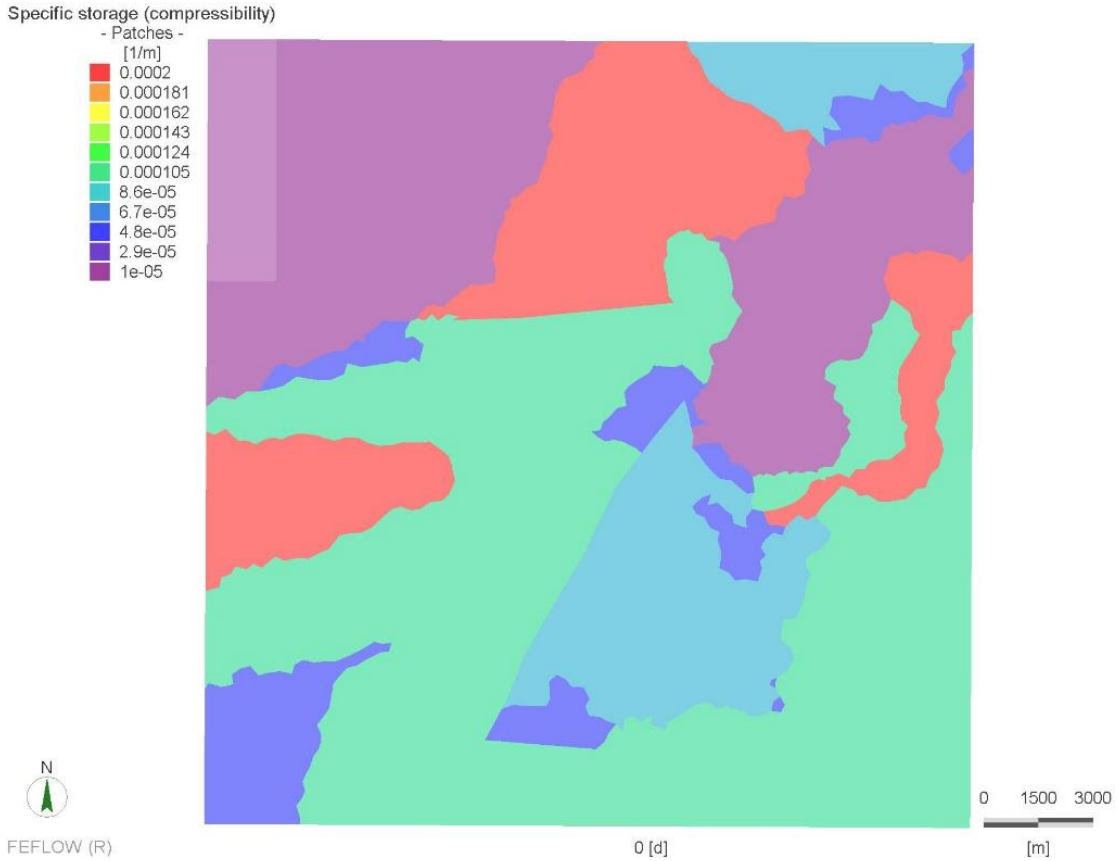
32. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



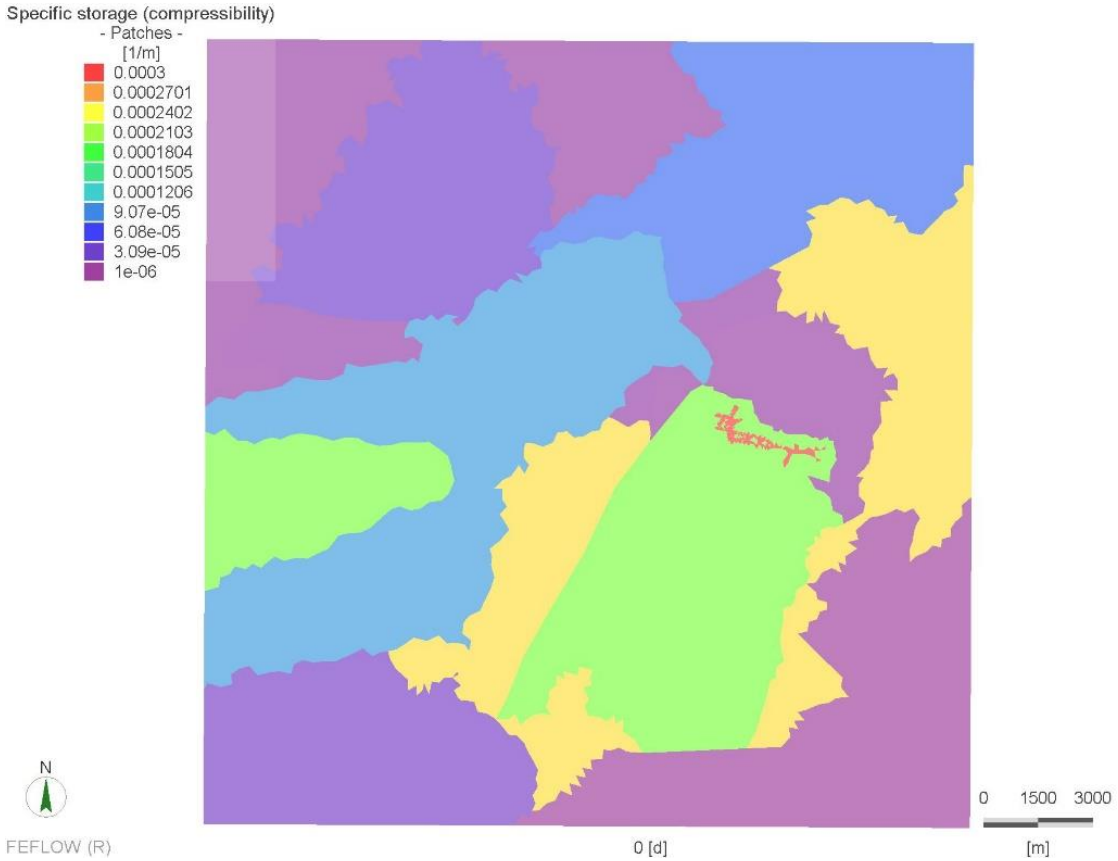
33. ábra: A 2. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



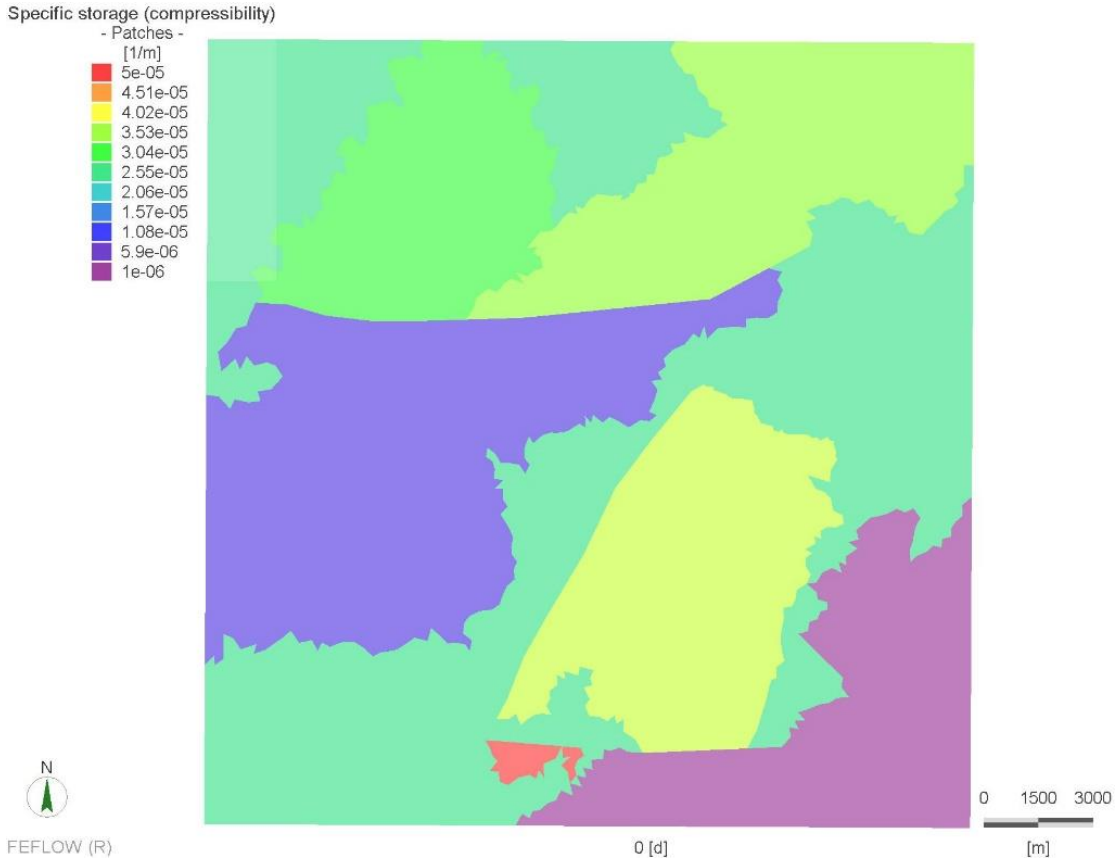
34. ábra: A 3. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



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



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



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

2.6.3 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.

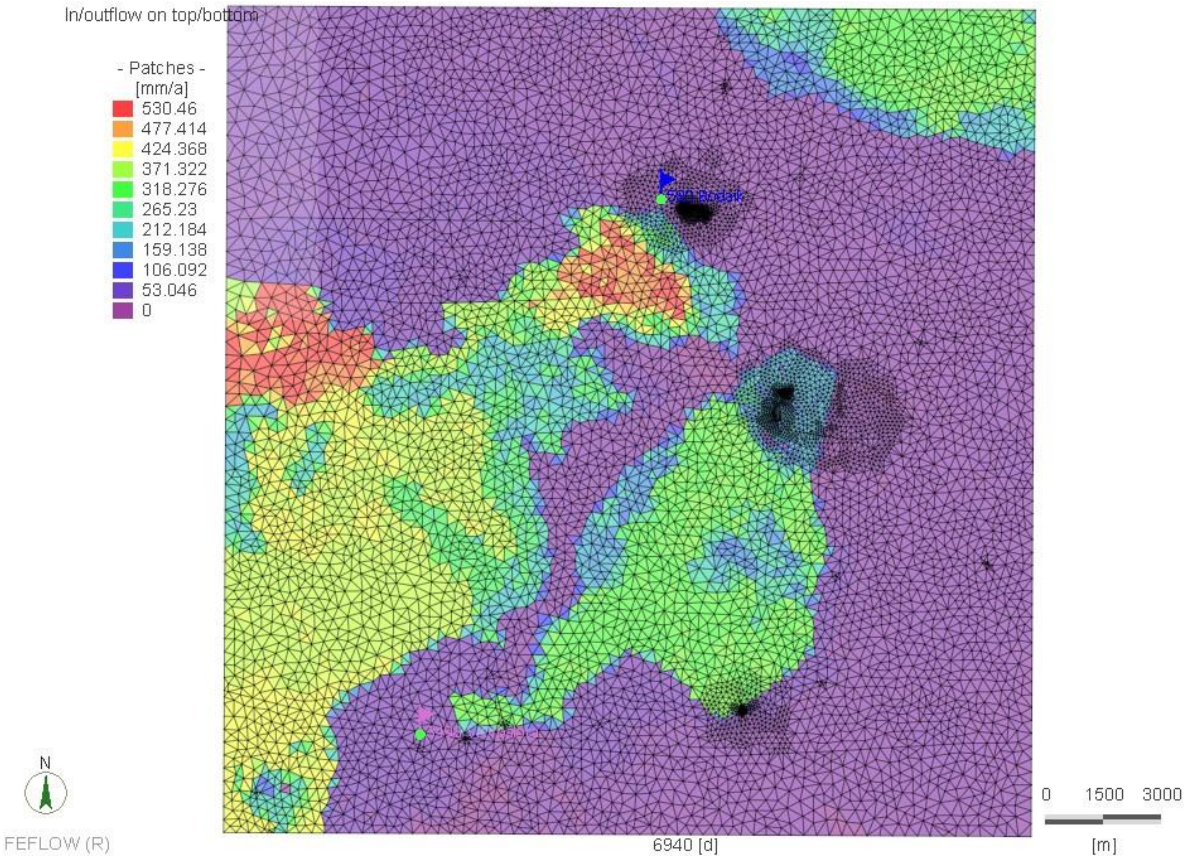
A nyílt karsztos területeken a felszíni beszivárgás megegyezik a karsztvíztárolóba történő beszivárgással. A fedett területeken csak a felszínen beszivárgó csapadék egy hányada jut el a karsztvíztárolóba. Ennek mennyisége eltérő a természetes áramlási rendszerben, és a bányászati víztelenítés időszakában, 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 Kincsesbánya lokális modellterületen három fő beszivárgási terület található. A modellterület középső-déli részén megtalálható nagy kiterjedésű nyílt karsztos térrészt, a modell Ny-i részén, a Tési-fennsíkhoz kapcsolódó nyílt karsztot, valamint a területre É-ról benyúló Vérteshez tartozó beszivárgási zónát lehet elkülöníteni. A három terület beszivárgás szempontjából nem azonos zónába sorolható, a beszivárgás kiszámításához különböző meteorológiai állomások adatait használtuk fel.

A modell kalibrálása során a Tési-fennsíkhoz tartozó területeken a beszivárgás értékek növelése, míg a Vértes DNy-i peremén, valamint a Kincsesbányától délre található nyílt karsztos területen a beszivárgás értékek csökkentése vált szükségessé.

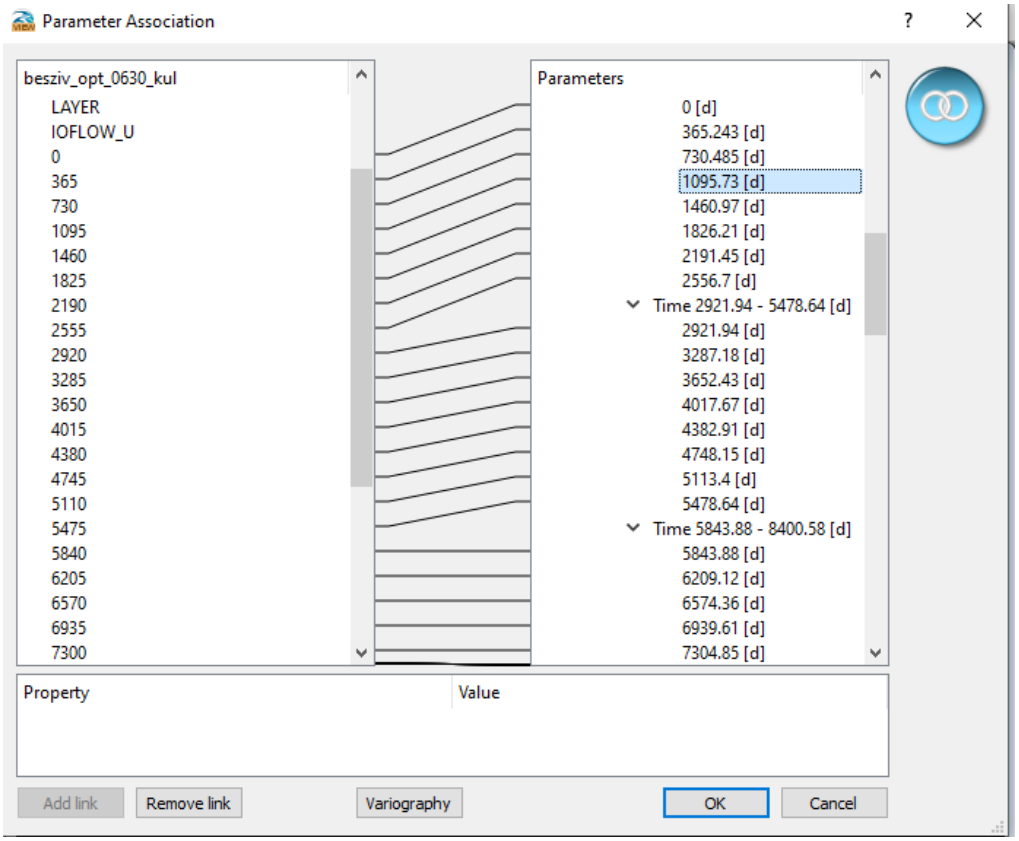
A beszivárgást az 1. numerikus felszínre adtuk meg, a cellák teljes területére, „inflow on top" paranccsal (***38. ábra***).



38. 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.

A ***39. 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.



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

2.6.4 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 [18], valamint a pretercier földtani térképet [19] használtuk.

Az 1D- és 2D-s elemek hidraulikai paramétereinek meghatározása, szintén kalibrációs feladat volt.

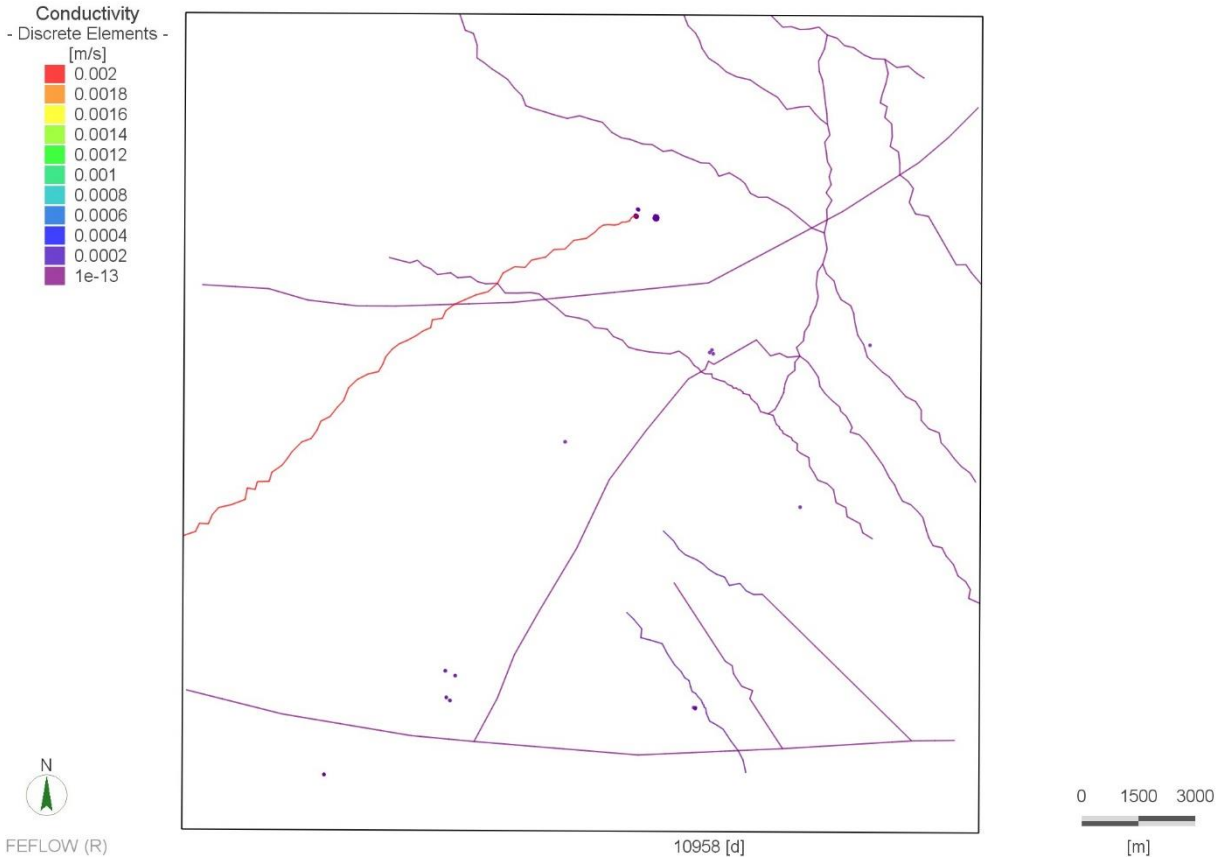
A vetőket és vetőzónákat a teljes modellt átszelő 2D-s vertikális elemekkel adtuk meg. Ennek eredményeként a vetőzónák vastagság és szivárgási tényező értékei a megfelelő vízszinteloszlás kialakítása szerint változtak, így a különböző vetőzónák vastagsága 0,001-15 méter között változik. A paraméterezés az ***4. táblázatban*** összefoglaltak alapján történt meg.

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 vető a mélység függvényében is viselkedhet hidraulikailag eltérő módon, így ez alapján, ahol szükséges volt különböző paraméter értékekkel láttuk el a szerkezeti elemeket (***40. ábra***).

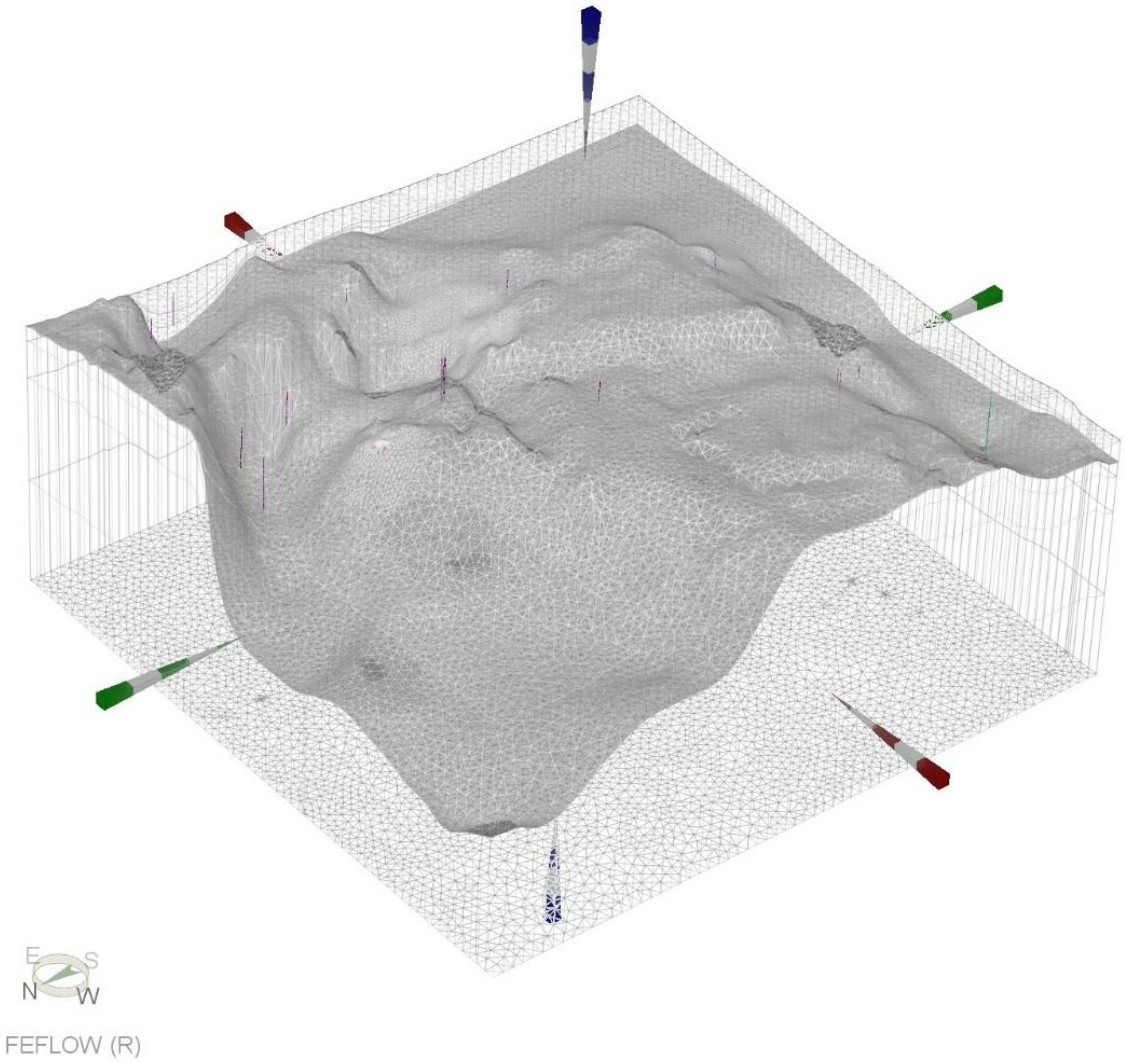
A numerikus modellben modellezés technikai megoldásképpen 1D-s elemek használatával teremtettük meg a közvetlen kapcsolatot az 1. numerikus felszínre definiált források (***2.7.1. fejezet***) és a főkarsztot képviselő 5. réteg között (***41. ábra***).

4. 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)	0,001-15 m
Vető szivárgási tényezője	$2*10^{-3}$-$1*10^{-13}$ m/s



40. ábra: A numerikus modellbe beépített vetők szivárgási tényező értékei és az 1D elemek elhelyezkedése az 5. rétegben



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

2.7 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.

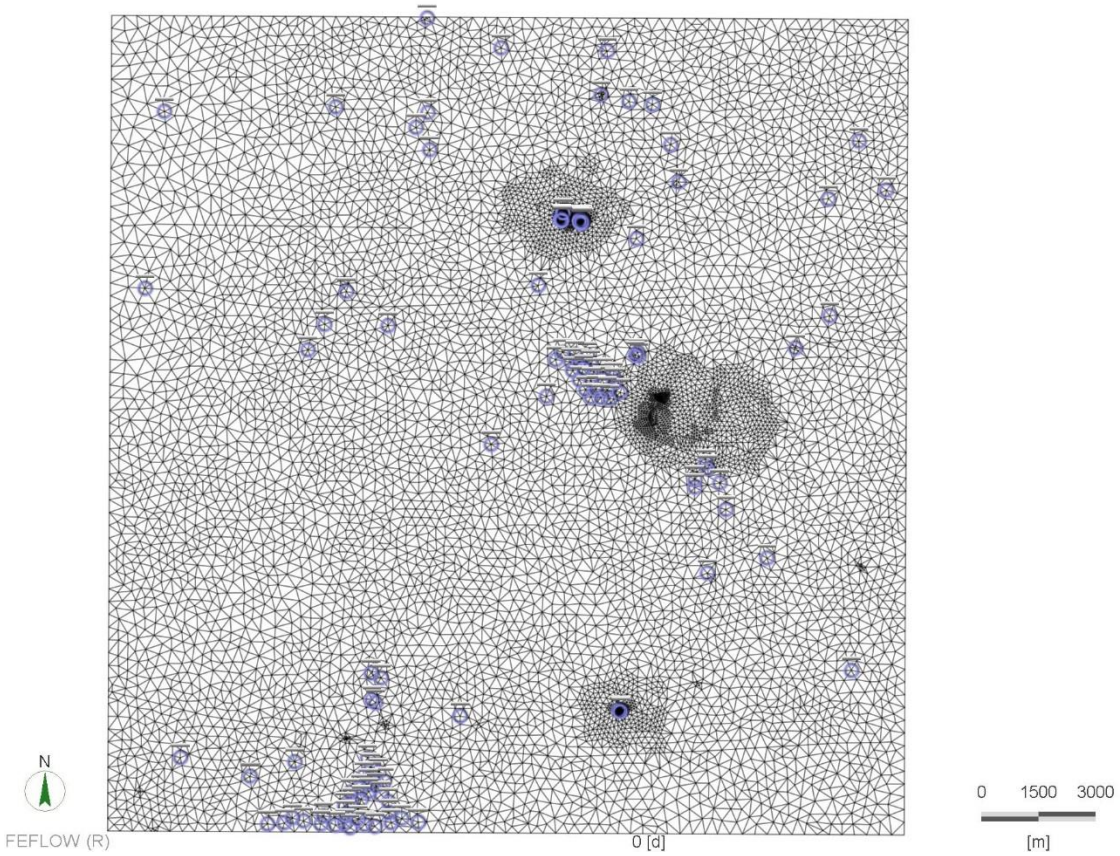
A modellezett területen természetes megcsapolók a források, vízfolyások, patakok, melyeket kötött peremként adtunk meg. Így a megcsapolódó vízhozamot a program számítja a vízszint, a fakadási szint és az átszivárgási együttható alapján. Mesterséges megcsapolóknak a kutas vízkivételeket tekintjük.

A peremfeltételek 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.

2.7.1 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 nagyobb állóvizes/vizenyős területként adtuk meg a várpalotai bányasüllyedékes tavakat, a fehérvárcsurgói víztározót és a fehérvárcsurgói homokbánya tavat. Szintjeik a 10 méteres DDM alapján kerültek meghatározásra (***42. 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.



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

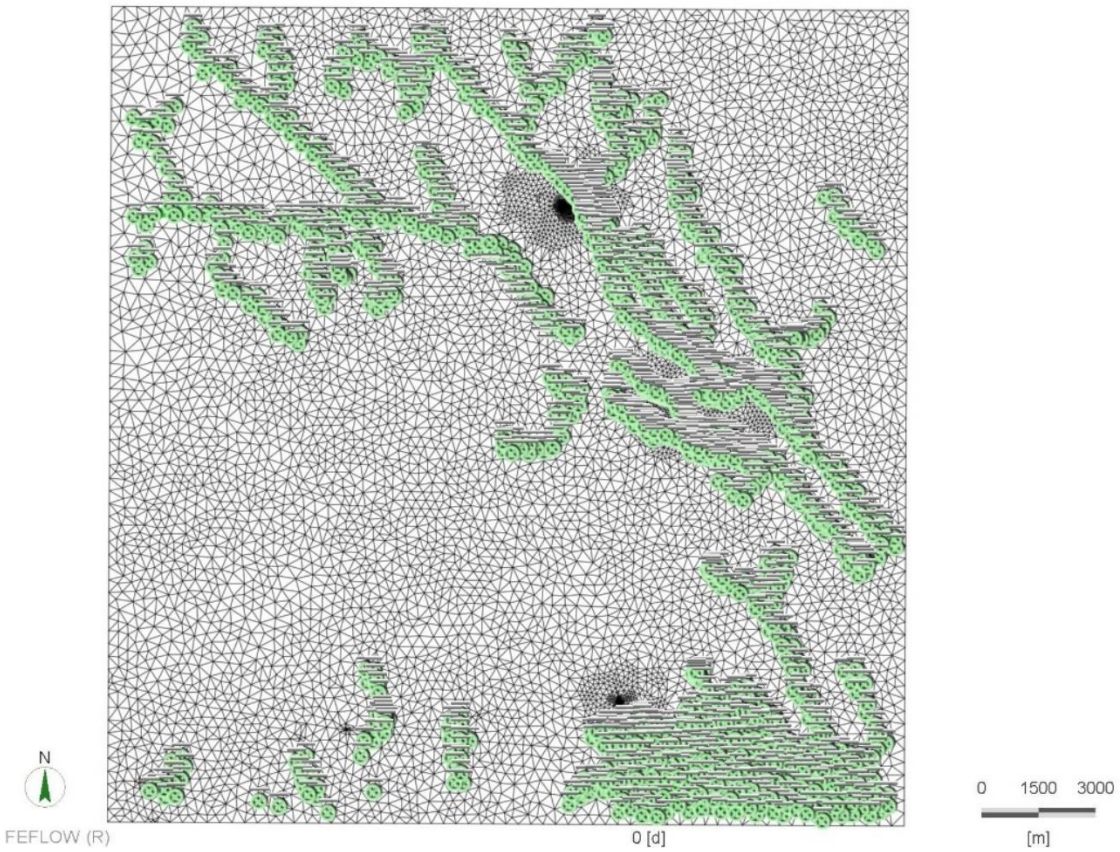
2.7.2 3. típusú (Transfer)-Cauchy peremfeltétel

A vízfolyások vonalas objektumokként kerültek be az 1. numerikus felszínre. A kisvízfolyások 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 méteres DDM alapján került beépítésre a lokális modellbe Sárrét, mely nagy kiterjedésű mocsaras terület (***43. ábra***). A kontrollálatlan hozambeáramlás miatt a peremfeltételt korlátoztuk, csak fakadást engedélyeztünk. Az átszivárgási együttható – a Gaja-patak egy szakaszának kivételével - egységesen 0,04 1/nap.

A vizsgált terület jelentős vízfolyása a Gaja-patak, amely hidrológiai szempontból azért is érdekes, mert részben nyílt karsztos területen halad át, aminek következtében a vízfolyás egy szakaszán a

felszíni víz beszivárog a karsztvíztárolóba, ezzel közvetlenül megemelve annak szintjét. A Gaja-patakot nemcsak a főkarsztból eredő források táplálják, hanem számos, a fedőkarsztból eredő kisebb forrás és vízfolyás is. Az elnyelődésre vonatkozó mennyiségeket a Smaragd GSH 2014 évi mérései alapján becsültük [1]. Ekkor a Gaja-patak hozama a patak felső szakszán a Gaja-szurdok völgye előtt 20 200 m^3/nap volt. A Gaja-szurdokban a patak elnyelődik a Fődolomitból álló karsztos felszínen, a patak alsóbb szakaszán végzett második mérés kisebb, 12 344 m^3/nap hozamot mutatott.

A Gaja-szurdokban történő elnyelődés is transfer típusú peremfeltételként került beépítésre a modellbe olyan módon, hogy a mederszakasz felületén csak bemenő hozamot engedélyeztünk, az átszivárgási együtthatót (in-transfer rate) pedig $5*10^{-4}$ 1/nap értéknek adtuk meg.



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

2.7.3 4. típusú (Well)-Kút peremfeltétel

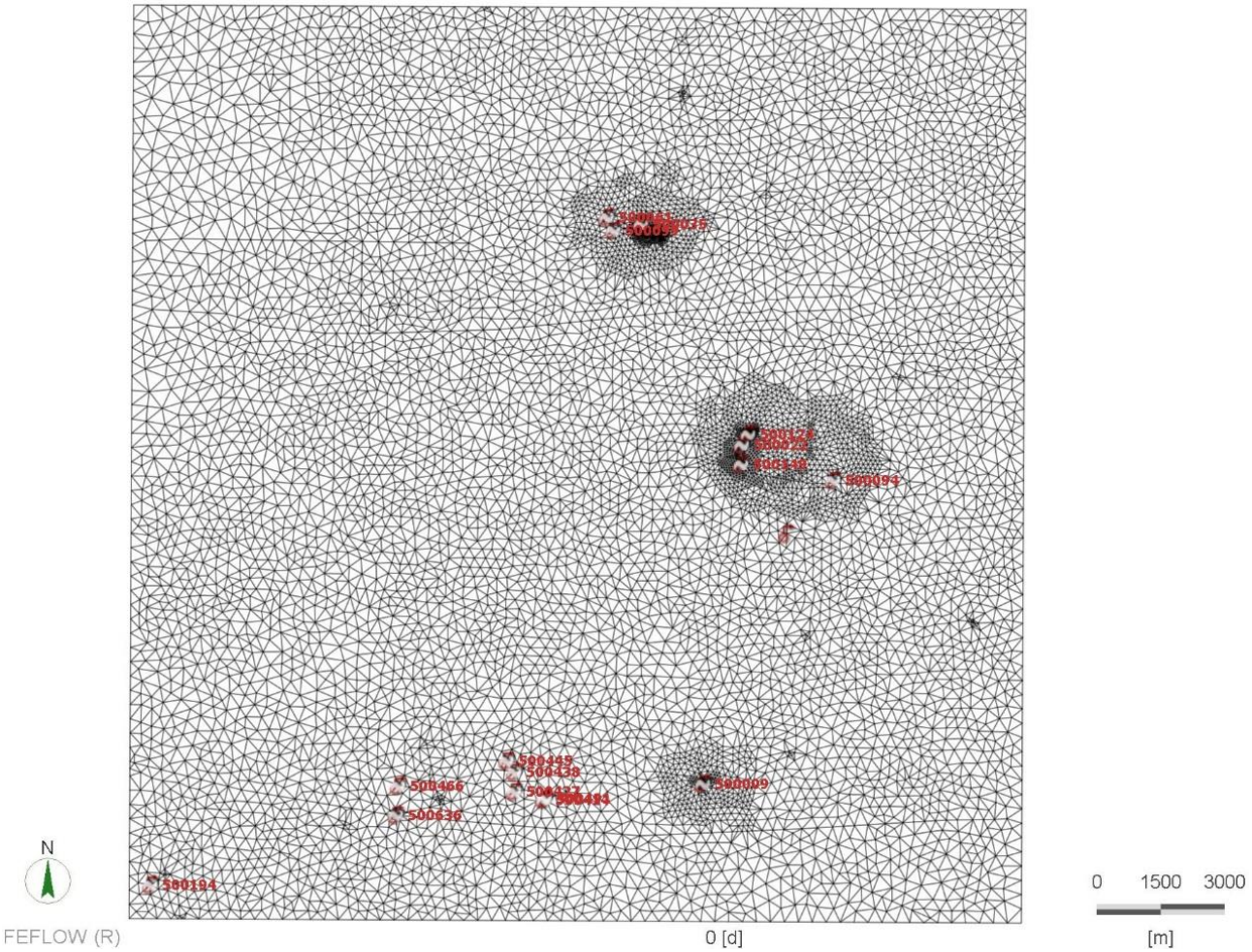
A termelőkutakat adott hozamú peremekként határoztuk meg (Well). A modellezés során az éves vízkivételeket m^3/nap-ra leosztva adtuk meg.

A numerikus modellben a következő termelőobjektumok szerepelnek:

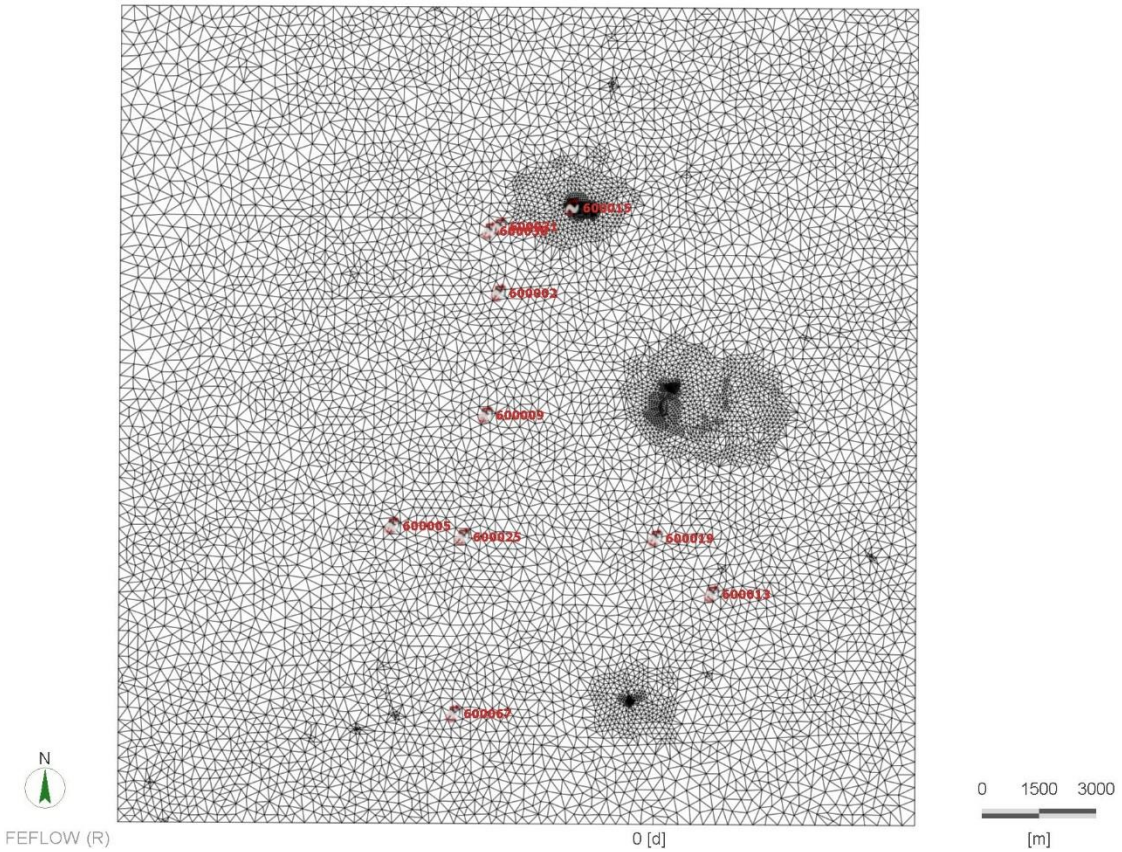
- A karsztot, illetve a fedőt megcsapoló termelőobjektumok, amelyekből van termelési adat 2003-2020 között.

A karsztvíztárolóval hidraulikai kapcsolatban álló kincsesbányai homokbánya termelését az 5. rétegbe, fix termeléssel adtuk meg a teljes modellezési időszakra (2003-2030). A főkarsztvíztárolót megcsapoló egyéb objektumok termelését megadó peremfeltételek az 5 és 6. numerikus rétegekbe kerültek beépítésre (***44-45.*** ábra), tranziens módon. Ezeket a vízkivételeket a modellben éves időlépcsővel, lépcsős függvénnyel definiáltuk (***46. ábra***). Ez azt jelenti, hogy az adott évre megadott termelést a rákövetkező évig tartja a modell. Azokat az időszakokat is figyelembe vettük, amikor a

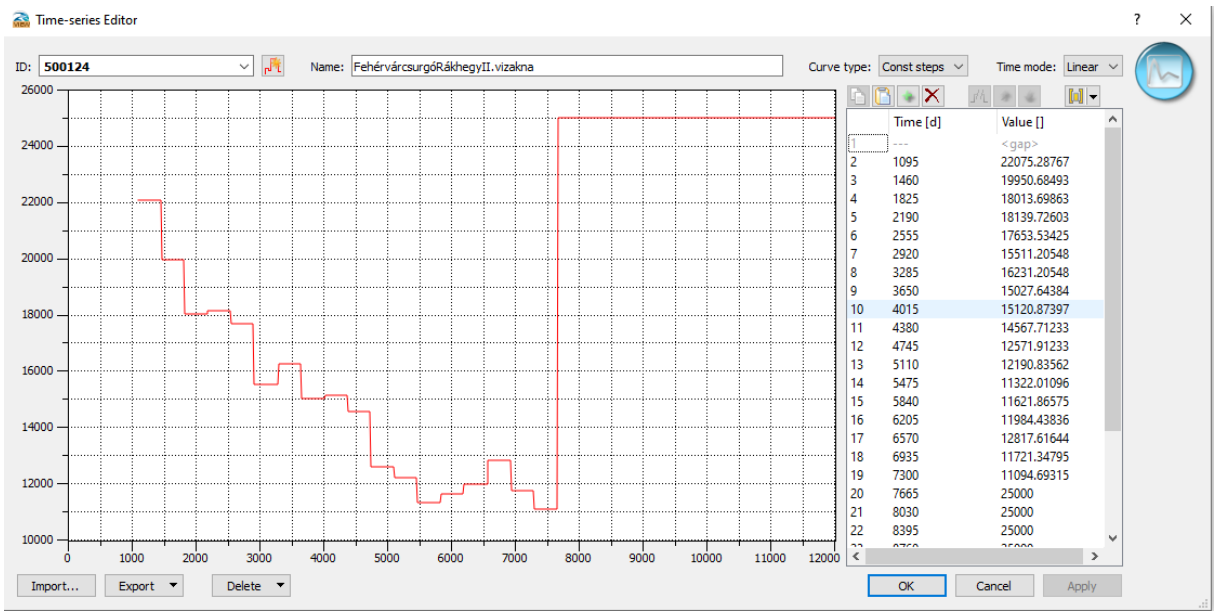
kutak nem termeltek. A regionális modellhez képest (a regionális modellnél a termelési adatszolgáltatás 2018 év végével zárult) termelési idősorokat kiegészítettük a VIZIG 2019-2020 adatszolgáltatásával, azonban a prognosztizált időszakra a kutak termelését az OVF által meghatározott várható termelések szerint adtuk meg (lásd ***3.2. fejezet***).



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



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



	Time [d]	Value []
	---	<gap>
2	1095	22075.28767
3	1460	19950.68493
4	1825	18013.69863
5	2190	18139.72603
6	2555	17653.53425
7	2920	15511.20548
8	3285	16231.20548
9	3650	15027.64384
10	4015	15120.87397
11	4380	14567.71233
12	4745	12571.91233
13	5110	12190.83562
14	5475	11322.01096
15	5840	11621.86575
16	6205	11984.43836
17	6570	12817.61644
18	6935	11721.34795
19	7300	11094.69315
20	7665	25000
21	8030	25000
22	8395	25000

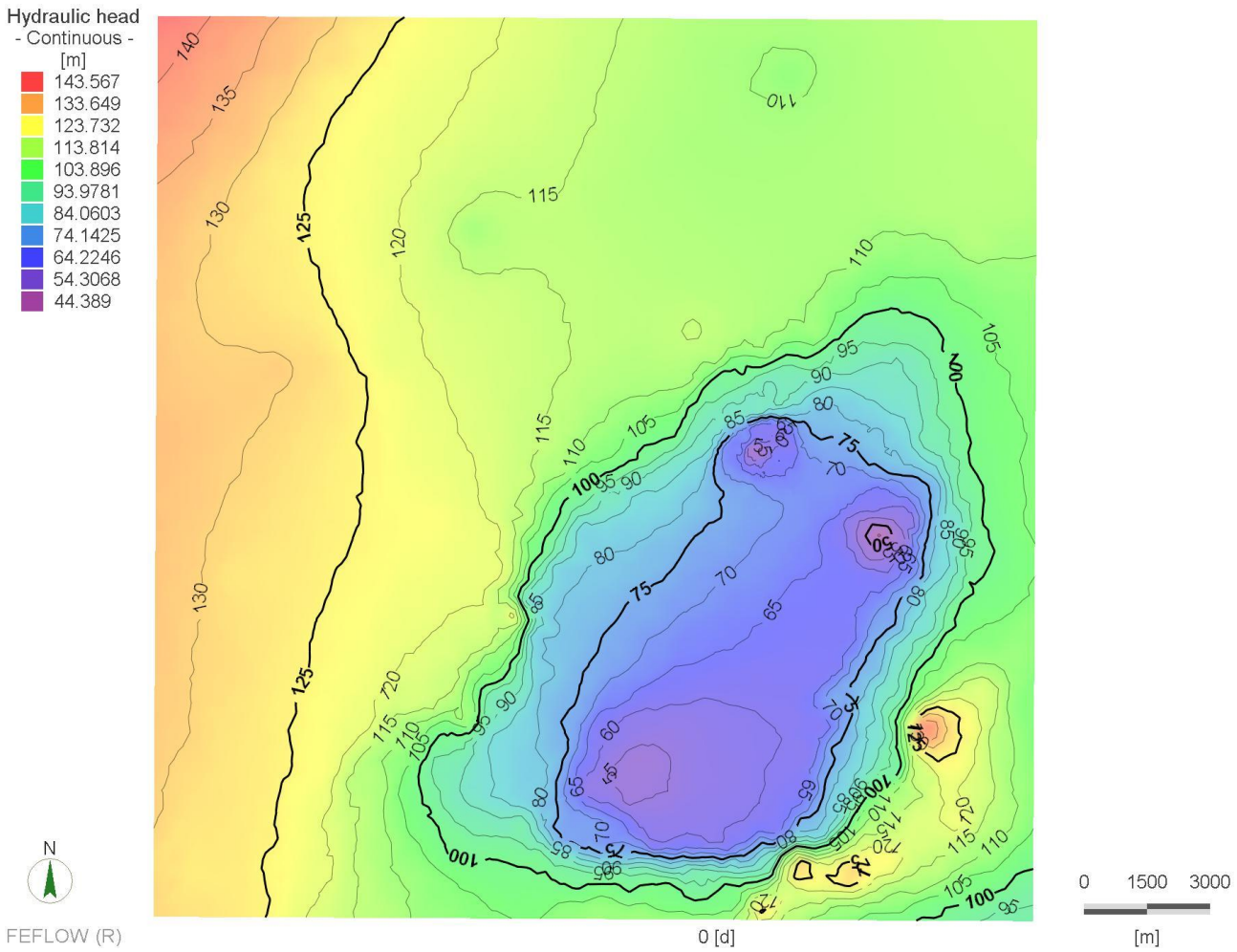
46. ábra: A vízkivételek modellbeli leképezése a Rákhegy II. vízakna példáján

2.8 A tranziens modellezés

2.8.1 A tranziens modellezés kezdeti feltételei

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

A lokális tranziens modell kezdeti vízszintjeinek meghatározása az elkészült Dunántúli-középhegység regionális modell eredményeire épül. A kezdeti vízszintek a regionális modell kötött vízszintekkel futtatott verziójának 2000.01.01-re kinyert vízszinteloszlás értékeit tartalmazza (***47. ábra***). Ez alapján a modellben megadott összes monitoring kút vízszintje a bennük mért vízszint értéknek felel meg, a közöttük lévő vízszinteloszlást a modell kalkulálja.



47. ábra: A tranziens modell kezdeti (2000.01.01) vízszinteloszlása az 5. rétegben [mBf]

2.8.2 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.

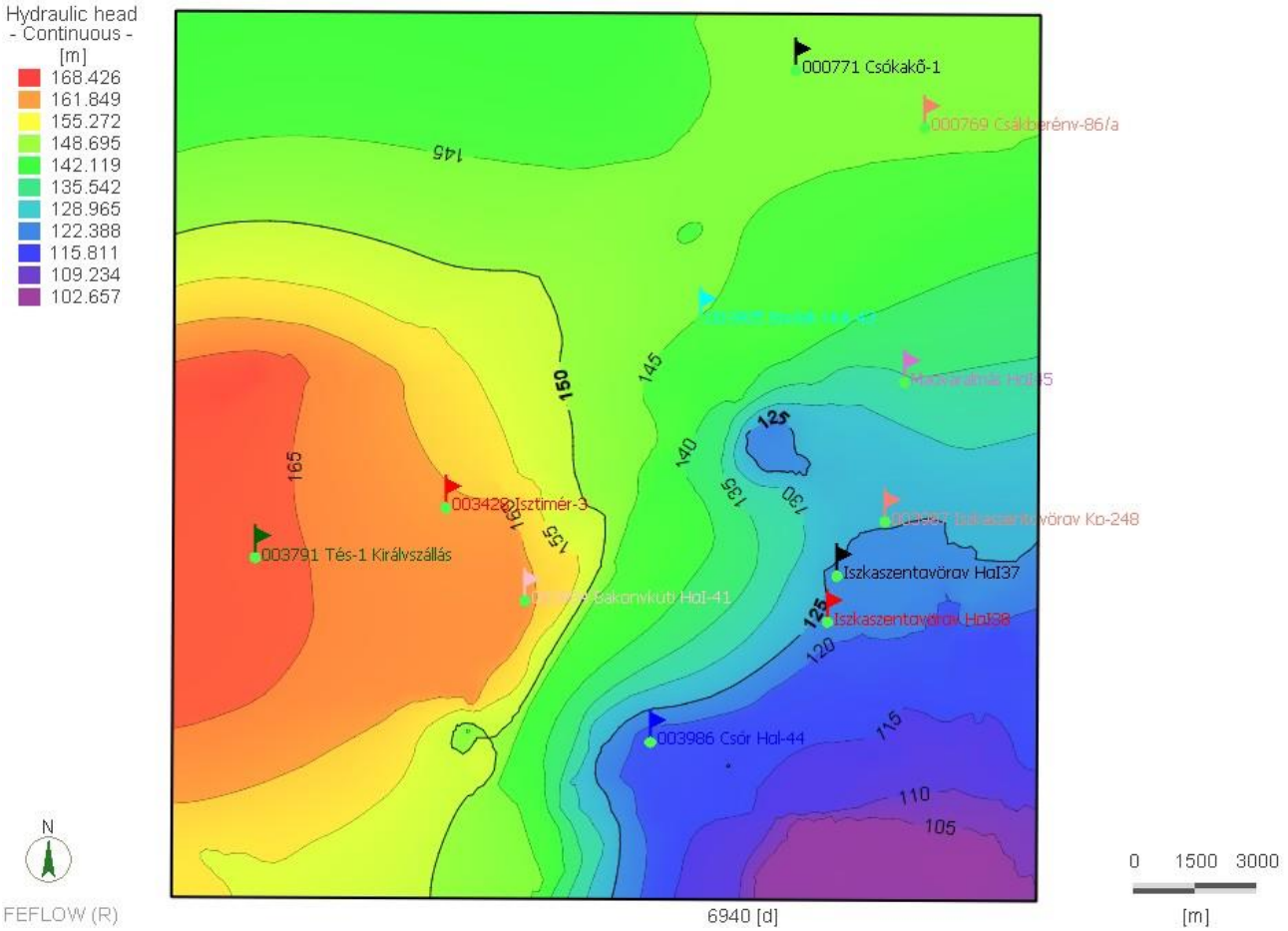
2.8.3 A numerikus modell kalibrálása

3.5.3.1 A karsztvízszint kalibrálása a 2019 állapotra

A Kincsesbánya modellterületen 11 db karsztvízszint megfigyelő kút található (***48. ábra***) a kalibrálás ezek bevonásával történt meg. A modellterületen található kutak kalibrálási idősorait a ***3.4.1. fejezet*** mutatja be.

A mért vízszinteket havi időlépcsővel hívtuk be a modellbe, minden hónap első mért értéke került be. A tranziens modell kalibrálását a 2019-es januári állapotra végeztük el. A területen található 3 db kútból (Bodajk HgI-43, Bakonykúti HgI-41, Iszkaszentgyörgy Kp-248) nem rendelkezünk 2019. januári eleji mért adattal, így azok kalibrációja 2018. novemberi adatra történt meg.

A 2019-es állapotra modellezett karsztvízszintet a ***48. ábra*** mutatja be.



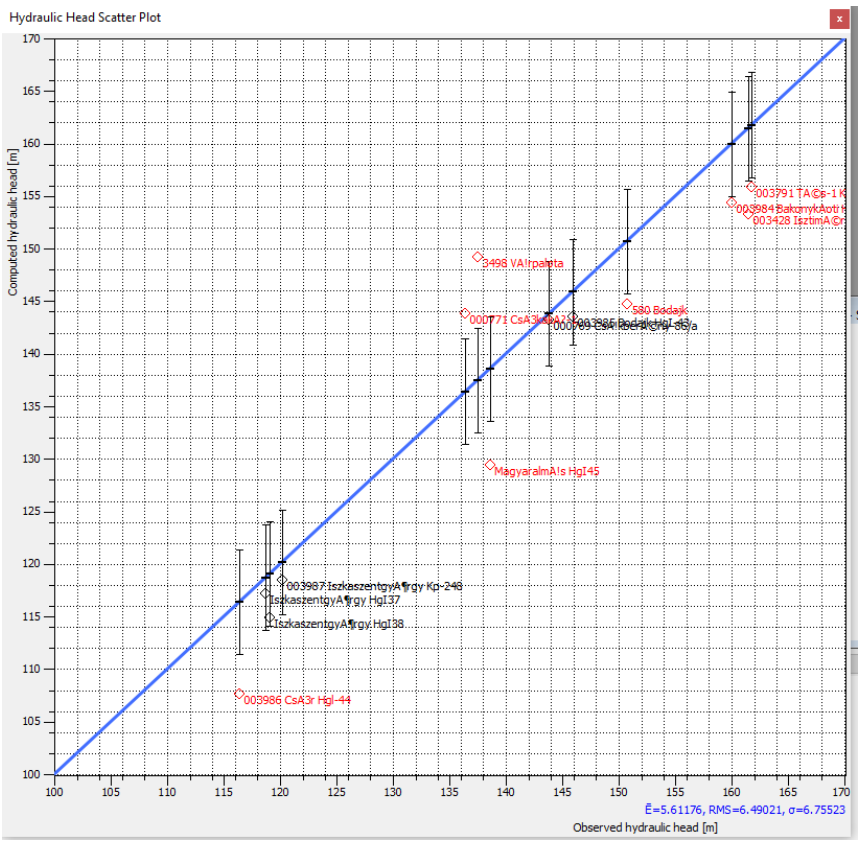
48. ábra: A numerikus modell számított karsztvízszint eloszlása 2019. január 01-i állapotra, rajta a kalibráláshoz felhasznált megfigyelőkutak elhelyezkedésével [mBf]

Az egyes monitoring kutakban mért és számított vízszint összehasonlítását a 2019-es állapotra a ***5. táblázat*** mutatja be, ez alapján a mért és modellezett értékek átlagosan 3,33 méterrel térnek el egymástól. A mért és kalkulált értékek közötti összefüggést a ***49. ábra*** szemlélteti. A 2019-es januári állapotra a tranziens modellre számított RMS (root mean square error) érték: 6,49.

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

Monitoring kút neve	Mért vízszint (mBf)	Modellezett vízszint (mBf)	Különbség (m)
771 Csókakő-1	137,55	145,5	+7,95
769 Csákberény-86/a	145,00	145,37	+0,37
3985 Bodajk HgI-43*	147,35	144,77	-2,58
Magyaralmás HgI-45	138,57	134,40	-4,17
3428 Isztimér-3	163,58	161,05	-2,53
3791 Tés-1, Királyszállás	164,05	165,53	+1,48
3984 Bakonykúti HgI-41*	159,97	162,52	+2,55
3987 Iszkaszentgyörgy Kp-248*	120,27	125,07	+4,8
Iszkaszentgyörgy HgI-37	118,73	124,49	+5,76
Iszkaszentgyörgy HgI-38	119,07	123,03	+3,96
3986 Csór HgI-44	118,96	118,46	-0,5

A *-gal jelölt kutak kalibrációja 2018.nov. 1-re történt meg.



49. ábra: A numerikus modell kalibrálási görbéje a 2019-es januári állapotra

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 méteres a domborzatmodell felbontása. Ez azt jelenti, hogy a kutak közötti adatoknál – réteg elhelyezkedése, szivárgási tényező, fajlagos tározás – felbontás csökkentést, míg a vízszintnél felbontás növelést kell alkalmazni, hogy hozzá lehessen rendelni a rácshálóhoz. (A végeselem módszernek épp ez az előnye a véges differenciával szemben, de ennek is megvannak a határai. Például, cm-es rácshálót nincs értelme egy kút köré tenni, aminek dm-es a nagyságrendje.)

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

A projekt egyik legfontosabb feladata a prognózis, különböző jövőbeli termelési verziók megvalósulása esetén és az ennek hatására 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 Kincsesbánya lokális modellterület legfontosabb vízkivételi helye a Rákhegy II., valamint Csór karsztaknák. A vízaknák 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.

Fontos azonban megjegyeznünk, hogy az aknák területe egy emberi tevékenység által jelentősen módosított térrész, amely hidraulikai tulajdonságait tekintve jelentősen eltérhet az azt körülvevő földtani közegtől. A területen lemélyített 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.

Az üzemi területeken a vízszintek kalibrálása ezért nagy kihívást jelenthet, hiszen a vízáramlás a modellterület többi részéhez képest nagymértékben eltérő jelleget mutathat. A kalibrálás a rákhegyi és csóri aknák esetében az üzemi vízszint értékekhez történt. A 2018. decemberi mért, valamint 2019. jan. 1-i modellezett vízszinteket a ***6. táblázat*** foglalja össze. A modellezett üzemi vízszint idősorokat a ***3.4.1 fejezet*** tartalmazza.

6. táblázat: A mért és modellezett üzemi vízszintek a fontosabb karsztaknákban a kalibráció időpontjában

Karsztakna neve	Mért üzemi vízszint (mBf)	Modellezett üzemi vízszint (mBf)	Különbség (m)
Rákhegy II. karsztakna	118,43	120,16	+1,73
Csór karsztakna	115,93	114,19	-1,74

3. A TÖBBLET VÍZKIVÉTELEK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

3.1 A Kincsesbánya (Rákhegy II.) és a Csóri karsztakna tényleges vízkivételének hatása az 1950-2019 közötti időszakban

A többlet vízkivételek hatásának bemutatása előtt érdemes áttekinteni, hogy az 1950-2020 közötti időszakban milyen változásokat eredményezett az ismert mennyiségű vízkivétel a lokális modell területén található karsztvízszint monitoringkutak vízszintjében és a nagyobb források vízhozamában. A monitoringkutak és források elhelyezkedését a ***2. ábra*** mutatja be.

A lokális modellezési területen két olyan vízkivételi létesítmény található, amely hosszabbtávon hatással volt a karsztvízszintek alakulására és a források hozamára: a kincsesbányai és a csóri vízkivétel.

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

A területen a bauxit bányászat miatti passzív víztelenítés már 1948-ban elindult, a preventív víztelenítés 1959-ben indult a dolomitban kihajtott csapoló vágatokon keresztül. Az 1960-as évek végétől már az ivóvíz ellátási igényeket is figyelembe vevő karsztvízszint csökkentés és vízemelés folyt az akkor megépült Rákhegy II. vízaknán és vízcsapoló vágatain keresztül. Ez a víztelenítő rendszer az üzemelő bányatérségtől függetlenül épült ki, a fejtésekkel, főfeltáró bányatérségekkel nem volt összeköttetésben (*Erdős 2000*) [16].

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

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

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

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

1998-ban a korábban évtizedekig szabályozott, -130 mBf szinten tartott karsztvízszintet elengedték, csak az ivóvíz ellátási igényeknek megfelelő mennyiségű, lényegesen kevesebb vizet emeltek ki. Az 1998.12.02-án végrehajtott rákhegyi vízfelengedés által okozott vízszintemelkedés szinte pillanatszerű volt: 3-4 hét leforgása alatt a kezdeti -130 mBf szintről -40 – -42 m-re emelkedett a vízszint (*Erdős 2000*) [16].

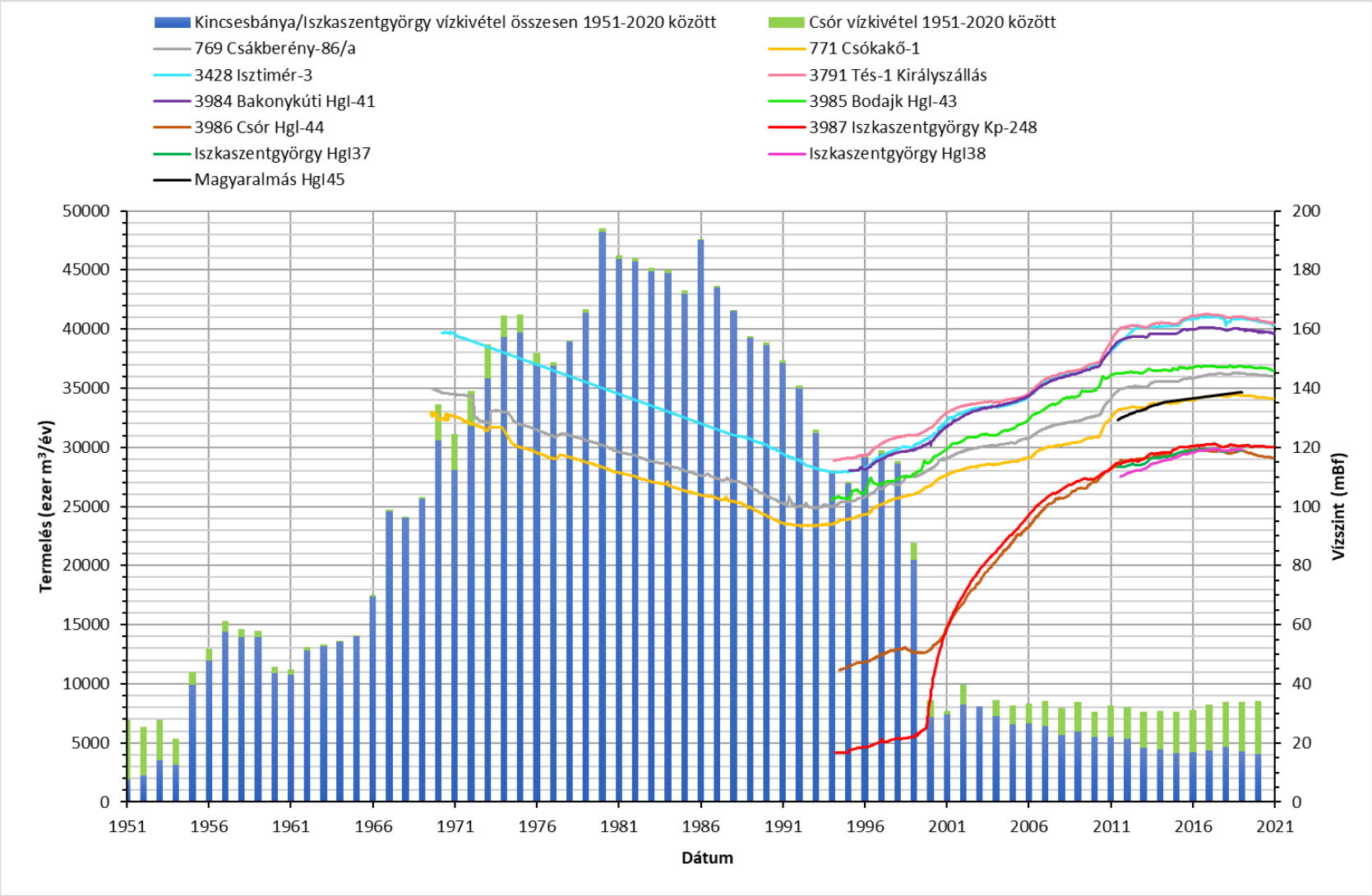
Az engedély szerint az akkor még működő Bitó II. bánya vízvédelme érdekében -40 mBf szinten 1998. december végén a DRV Rt.-nek meg kellett állítania a felengedést. 1999. október 1.-ig a bauxitbányászat érdekében ezt a szintet tartották, majd a bitói vízfelengedés elindításával ismét emelkedni kezdett a vízszint. A karsztvízszint a 33 mBf szintet 2000. március végén érte el. A későbbiekben további felengedés történt. Az ***50. ábra****Hiba! A hivatkozási forrás nem található.* a kincsesbányai depresszió feltöltődését mutatja be a DRV Zrt. és a vízügyi igazgatóságok törzshálózati monitoring kútjaiban mért adatok alapján a terület víztermelési adataival összevetve.

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

A víztelenítés, majd visszatöltődés hatása egyaránt tükröződött a vízszintekben és ezzel összefüggésben a területen található források hozamában.

Csór jelentősebb forrása a Csabafővíz-forrás, jelenlegi, 2019-es hozama 175 l/p (252 m^3/nap). A Csabafővíz-forráscsoport a Csóri Vízmű területén található. A vízmű területén korábban egy tó helyezkedett el, mely a forráscsoportból kilépő vizet gyűjtötte össze. 1945-ben az aszályos idő és a Székesfehérvárt sújtó vízhiány miatt amellett döntöttek, hogy a forráscsoport vizét vízellátás céljából felhasználják. 1948-ban lecsapolták a tavat, 1950-ben került sor a vízmű, azon belül a forrásfoglalások, a medence, a szivárgó és a gépház kiépítésére. A forráscsoport hozama ekkor 12 000-16 000 m^3/nap között mozgott. A víztermelés Székesfehérvár és Inota felé a vízvezetékek elkészülte után 1954-ben indult meg (az inotai vízátadás 1957-ben megszűnt). A Csabafővíz-forráscsoport vize a bányászati víztermelés miatt a hozama előbb csökkeni kezdett, majd 1968-ra elapadt. Ekkor a vízellátás további fenntartására egy 26,5 méter mély karsztakna került lemélyítésre. A források elapadását követően a kiépített forrásfoglalások a víziközmű rendszerből ki lettek véve, a víztermelésnek ma sem részei. A vízszintcsökkenés miatt a karsztaknát 1970-ben tovább mélyítették 41 m-ig, de 1978-ra elapadt a víz, a vízbázis megszűnt. Ugyanebben az évben egy 108 méter mély, kisátmérőjű karsztkút is készült a „bányakár" enyhítésére, melynek kezdeti 1400 m^3/nap termelése 1993-ra 300-400 m^3/nap értékre csökkent. 1998-ban 77 m-ig mélyítették tovább a karsztaknát, ekkor a vízszint -69,2 m-en helyezkedett el a terepszinthez képest. A vízmű korszerűsítését követően végül újra működésbe helyezték a csóri vízbázist. A bányászati vízkivételek Kincsesbányán 1999-ben megszűntek, a karsztvízszint ennek következtében ismét emelkedni kezdett. 2015-ben a visszaemelkedő karsztvízszint megközelítette az eredeti fakadási szinteket, ezért a vízszennyezés elkerülésére a forrásterek, az aknák és az eredeti vízelvezető rendszer feltárható részei kitisztításra kerültek, a fakadó vizeknek a területről való biztonságos elvezetésének megoldása megtörtént.

Az ***50. ábra*** a csóri és kincsesbányai vízkivételt mutatja be, valamint a termelés hatására változó karsztvízszintet a monitoringkutakban mért adatok alapján.



50. ábra: Csóri és kincsesbányai vízkivétel, valamint a karsztvízszint alakulása a monitoringkutakban mért adatok alapján

A termelés forrásokra való hatását a *Hiba! Érvénytelen könyvjelző-hivatkozás.* foglalja össze. A táblázatban összefoglalóan feltüntettük a karsztforrások az 1950-es években mért kiindulási, valamint a forráskataszterezés során 2019-ben mért adatait, valamint az elapadás évét.

7. táblázat: A lokális modellterületen található jelentősebb források, forráscsoportok adatai

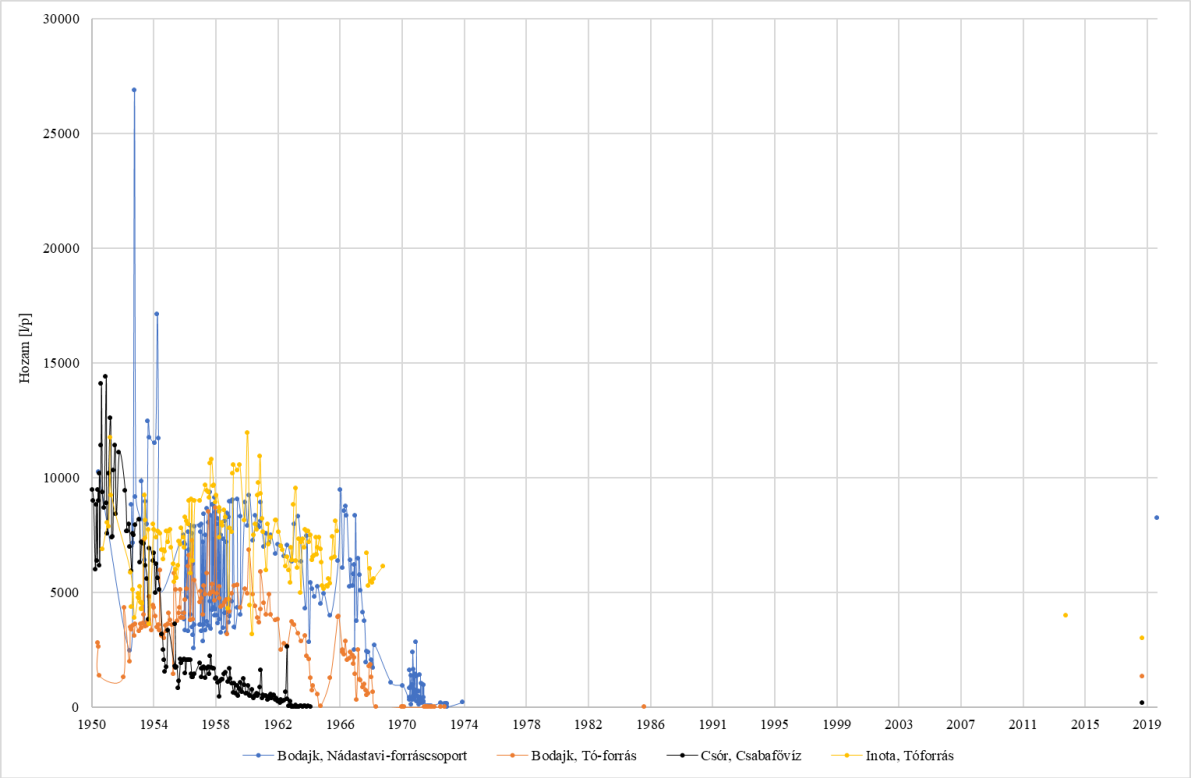
Település	Forrás	VITUKI forráskataszter szerinti vízhozam		Elapadás éve	2019 kataszterezés során mért hozam	
		Év	Hozam (l/p)	Év	Év	Hozam (l/p)
Iszkaszentgyörgy	Duzzogó-forrás	1950	1400	1957	2019	0
	Forrófői-forrás	1950	600	1957	2019	0
	Halastavi-forrás	1953	50	1957	2019	0
Kincsesbánya	Meluzina forrás	1953	107	1957	2019	0
	Mezei-forrás	1953	200	1957	2019	0
Fehérvárcsurgó	Tó-forrás	1950	600	1957	2019	285
	Haja-kút	1946	144	1957	2019	1.22
	Papkerti-forrás	1953	41	1957	2019	0
Bodajk	Nádastavi-forráscsoport	1950	10250	1975	2020	8260
	Tó-forrás	1950	2790	1968	2019	1333
Csór	Csabafővíz-forrás	1950	9480	1965	2019	175
Várpalota	Inota (Tó-forrás I-II)	1953	4458	1967	2019	3004

Iszkaszentgyörgy-Kincsesbánya térségében a jelenlegi termelés miatt továbbra sem működnek a források.

Folyamatos idősorral 1950-től az elapadás évéig csak három forrás (Bodajk Nádastavi és Tó-forrás, valamint a csóri Csabafővíz-forrás) esetében rendelkezünk. Az újra fakadásuk óta a rendszeres mérés nem indult el újra. Az idősorban a 2019-es adatot a forrásfelmérés idején készült adatokkal egészítettük ki (***51. ábra)***.

Bodajk térségében található két legfontosabb forrás a bodajki Tó-forrás, valamint a Nádastavi-forráscsoport. A Tó-forrás a Bodajki-tavat táplálja. A forrás több ponton fakad, még a tóból a vizet elvezető patak partján is jelennek meg források. Az adatok szerint 1968-ban apadt el, korábban hozama 1000-9000 l/p (1440-12960 m^3/nap) között változott, a legnagyobb értékeket 1958-ban mérték (***51. ábra***). A forrás 2019-ben mért hozama 1333 l/p (1920 m^3/nap) volt.

A Nádastavi-forráscsoport Bodajkon a Széchenyi István utcában a Móri víz és a Fehérvárcsurgói vízfolyás által határolt területen helyezkedik el. 10-15 éve még száraz terület volt, 2-3 éve több helyen jelentek meg források. Nádas, bozótos terület. A forráscsoportról vízhozam adat 1950-től 1974-ig van, 1950-ben még több, mint 10 000 l/p (14 400 m^3/nap) hozammal rendelkezett, 1975-ben elapadt (***51. ábra***). Jelenlegi hozama 8260 l/p (11 894 m^3/nap).



51. ábra: Kincsesbánya tágabb környezetében található források hozamidősorai (1950-2019)

3.2 A 2003-2019 időszak tényleges víztermelése és a tervezett többlet vízkivétel

A lokális modellezés a 2003-2030 közötti időszakra terjed. A többlet modellezés feladata alapvetően a kincsesbányai többlet vízkivétel hatásának vizsgálata volt, de a többlet vízkivételek hatását kiterjesztettük a lokális modellezési területen található jelentősebb vízkivételekre.

Az alábbi elemzések, a diagrammokon szereplő vízmennyiségek az OVF OSAP adatszolgáltatás alapján készült termelés adatbázisból származnak.

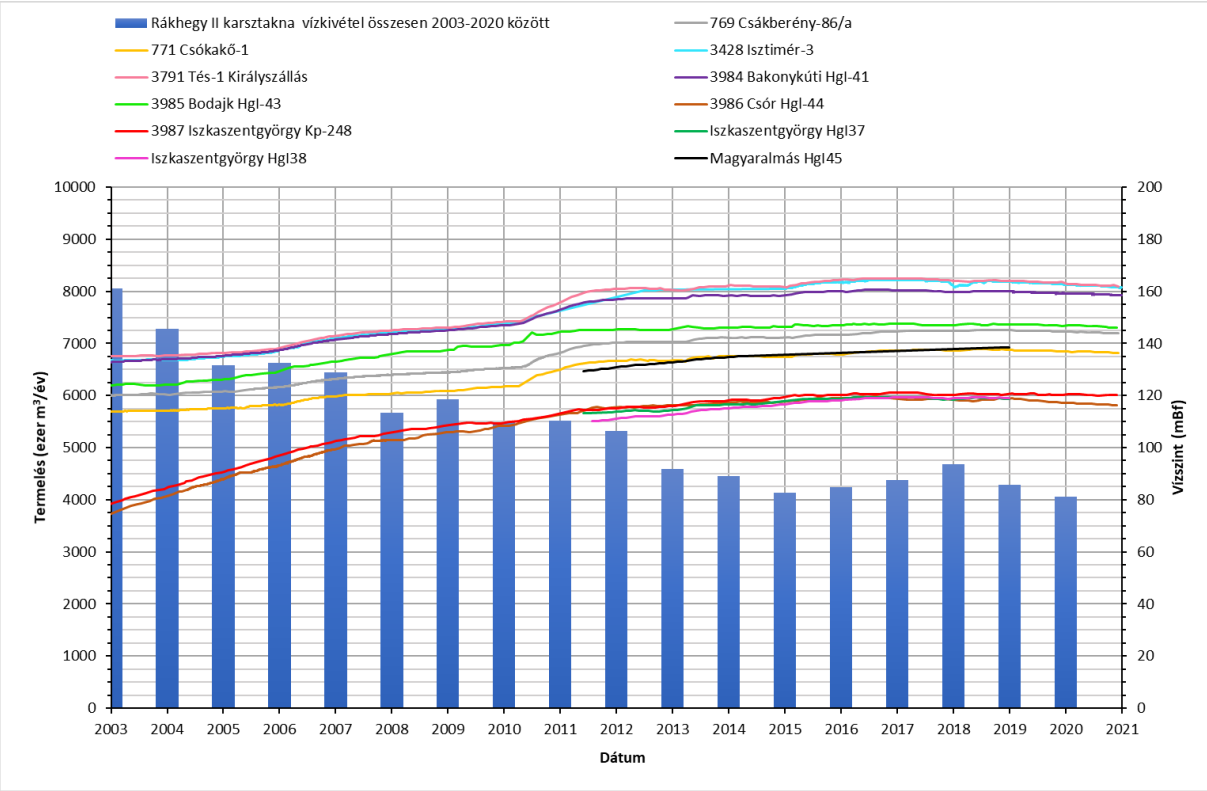
Napjainkban Kincsesbányán a vízkivétel a DRV Zrt. üzemeltetésében lévő Rákhegy II. karsztaknából történik. A Rákhegyen kiemelt összes karsztvíz mennyiségét és a karsztvízszint alakulását az ***52. ábra*** mutatja be a 2003-2020 közötti időszakban. A rákhegyi termelés 2003 óta a 8 000 000 m^3/év vízmennyiségről 4 000 000 m^3/év vízmennyiségre csökkent. A rákhegyi termelés alakulásának viszonyát a 2018-ban engedélyezett kitermeléshez képest az ***53. ábra*** szemlélteti.

A lokális modellezési területen a Fejérvíz Kft. által üzemeltetett Csóri karsztaknából történik még jelentős mennyiségű vízkivétel. A csóri víztermelés alakulását és annak hatását a karsztvízszintekre 2003 és 2020 között az ***54. ábra*** szemlélteti. A csóri termelés 2003 óta 1 300 000 m^3/év vízmennyiségről 4 500 000 m^3/év vízmennyiségre nőtt. A termelés és a 2018-as engedélyezett kitermelhető vízmennyiség viszonyát az ***55. ábra*** szemlélteti.

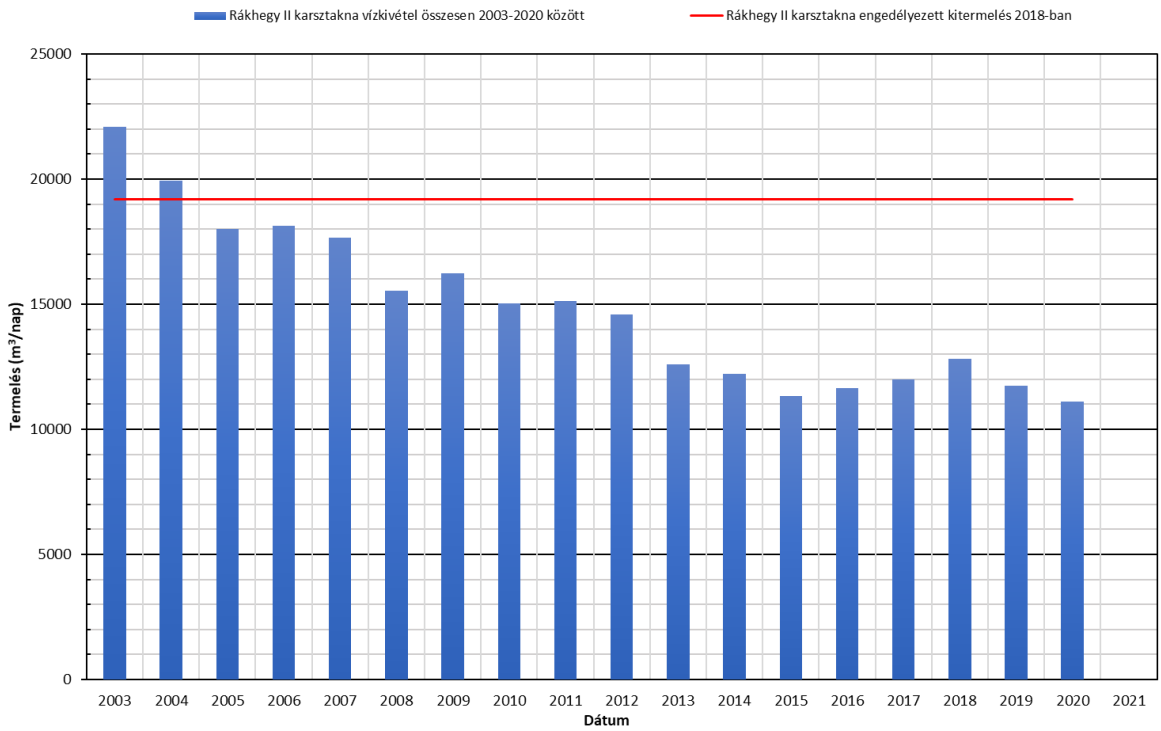
A lokális modellterületen található egyéb objektumok termelését összevetve a rákhegyi és csóri karsztaknákon történő vízkiemeléssel az ***56. ábra*** szemlélteti. Az ábrán látható, hogy a rákhegyi víztermelés aránya az elmúlt 17 évben folyamatosan csökkent, míg a csóri víztermelés aránya folyamatosan nőtt. A csóri és a rákhegyi vízkivétel aránya jelenleg közel azonos, együttesen nagyjából háromszorosa az egyéb kutak vízkivételének. Az „egyéb” kategóriába eső karsztkutak egy részét a Bakonykarszt Zrt. üzemelteti, és a termelés közüzemi célú.

A víztermelések hatását mutatják az ábrákon feltüntetett monitoringkutak vízszint idősorai. A figyelőkutak vízszintjei 2003 óta 20-40 métert emelkedtek, a legnagyobb emelkedés a Csór HgI-44, illetve az Iszkaszentgyörgy Kp-248 jelű figyelőkutakban tapasztalható.

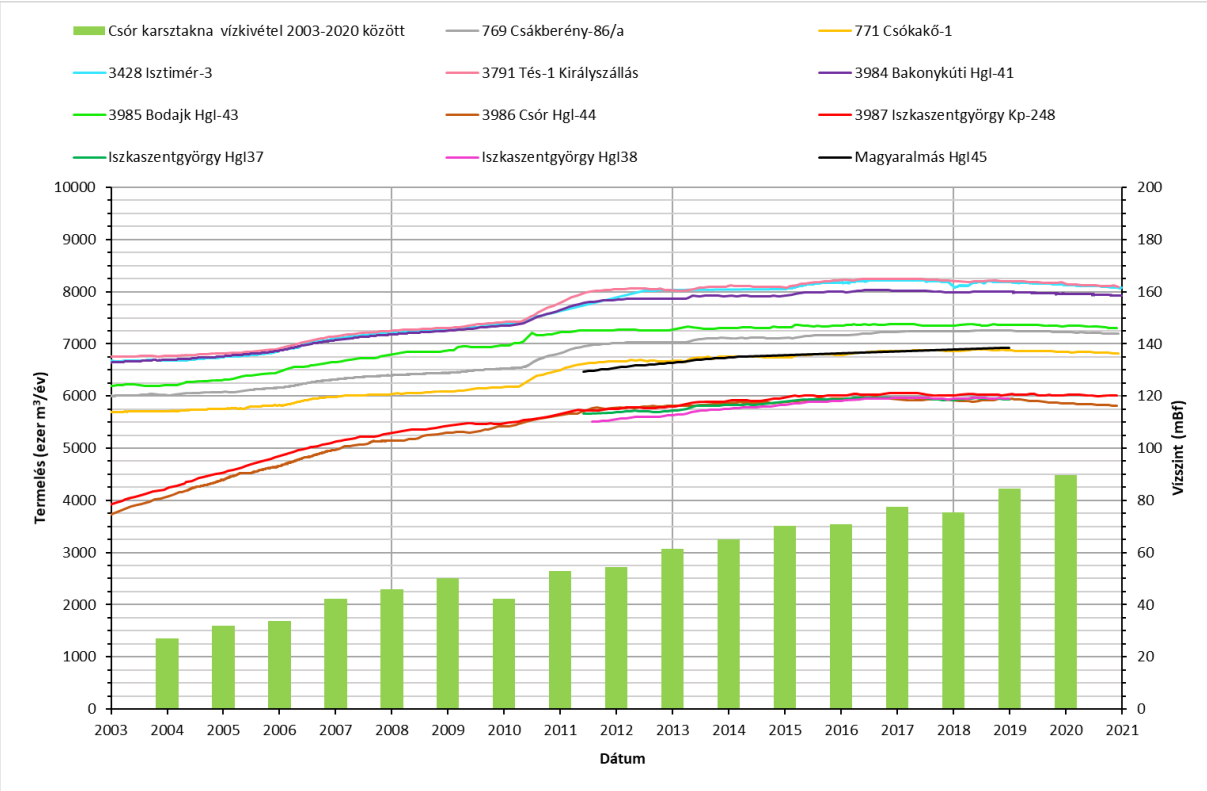
Az emelkedés nagyobbrészt a bányászati vízkiemelést követő, 1990-es évek óta tartó regionális visszatöltődésnek köszönhető, de hatással van a vízszintekre a rákhegyi termelés jelentős csökkenése a 2003-as termeléshez képest. A vízszint idősorok trendelemzéséből (*Smaragd GSH 2020*)[4] megállapítható, hogy a karsztvízszint 2011 óta stagnál, sőt az utóbbi egy évben csökken.



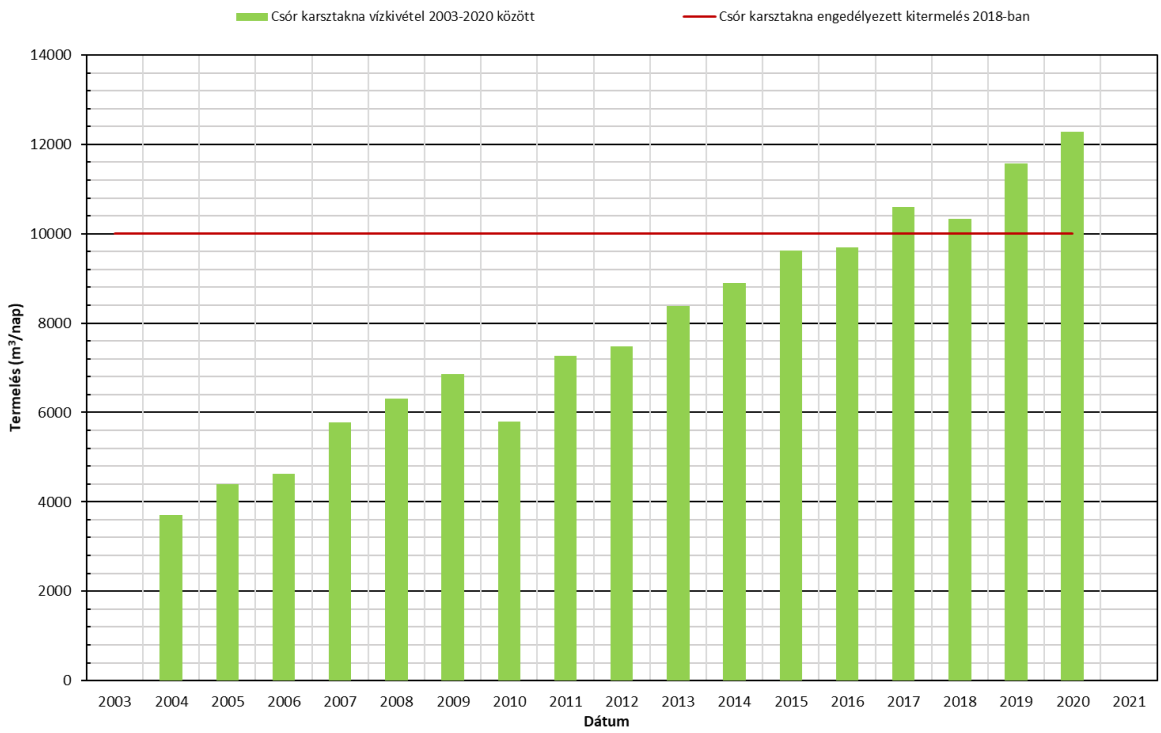
52. ábra: A rákhegyi termelés és a területen található monitoringkutak vízszintjének alakulása 2003-2021 között (Adatforrás: OVF)



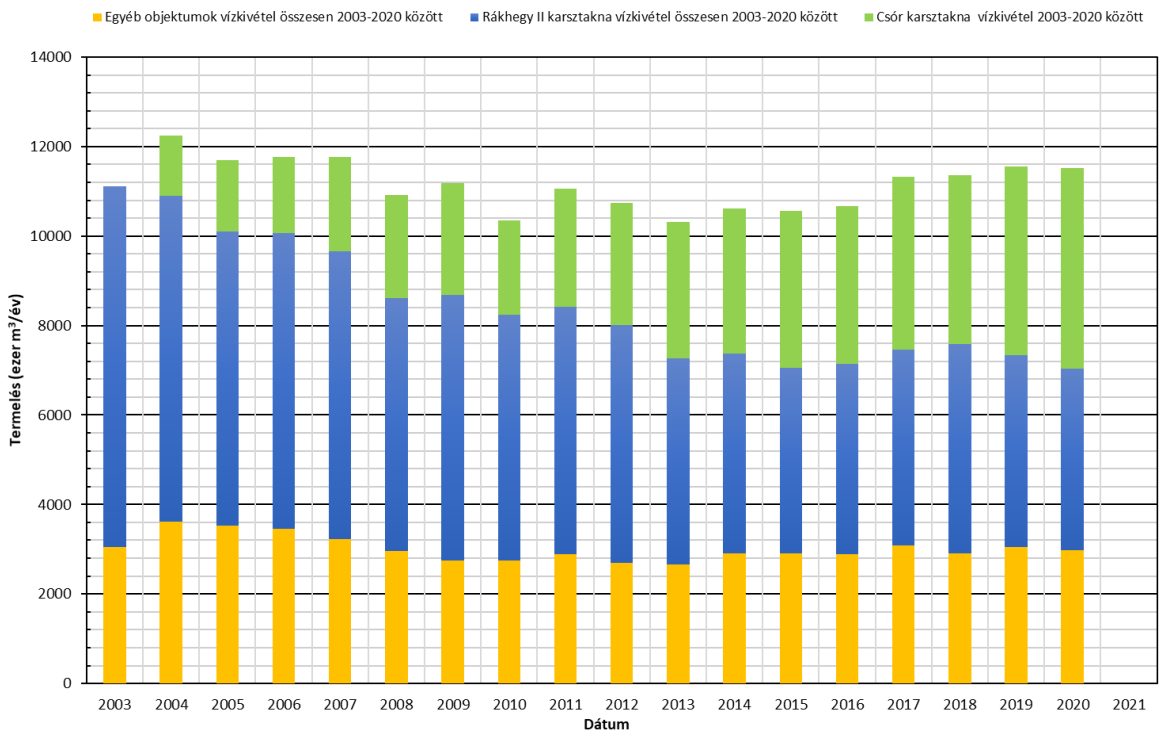
53. ábra: A rákhegyi vízkitermelés alakulása 2003-2021 között a 2018-ban engedélyezett kitermelhető vízmennyiséghez képest (Adatforrás: OVF)



54. ábra: A csóri termelés és a területen található monitoringkutak vízszintjének alakulása 2003-2021 között (Adatforrás: OVF)



55. ábra: A csóri vízkitermelés alakulása 2003-2021 között a 2018-ban engedélyezett kitermelhető vízmennyiséghez képest (Adatforrás: OVF)



56. ábra: A rákhegyi és csóri karsztaknákon történő vízkiemelés összevetve az egyéb víztermelésekkel a 2003-2021 közötti időszakban (Adatforrás: OVF)

A távlati vízigények felmérésére az OVF személyes konzultációt tartott a fentiekben felsorolt három érintett vízmű képviselőivel. A konzultáción bemutatásra került a projekt, ismertetésre kerültek a projekt céljai. A konzultáció után a három érintett vízmű digitális adatszolgáltatással küldte meg a távlati termelések mennyiségeit, azokat az OVF értékelte. Az OVF az értékelés alapján megállapított egy **reális** és egy **maximális távlati termelési érték**et, amelyet a ***8. táblázat*** foglal össze.

A ***8. táblázatban*** feltüntettük a már elkészült regionális és lokális modellezések során a prognosztizáció időszakára (2019-2030) felhasznált termelési értékeket is. Magyarázatképpen meg kell említeni, hogy a modellezést megelőző adatgyűjtés 2019 első negyedévében lezárult, így az „utolsó” teljes év, amit figyelembe lehetett venni, az a 2018-as volt. Bár bizonyos adatok, pl.: termelési adatok a Kincsesbánya modellterületen 2019-2020-as évekre is kiegészítésre kerültek utólagos adatszolgáltatás keretein belül, azonban pl.: 2019 utáni, új forráshozam adatok nem állnak rendelkezésre. A referenciaként szolgáló karsztvízszint térkép is a 2019. januári állapotra készült el.

A jelenlegi modellezés során a távlati termelések értékeit 2021-től vesszük figyelembe. A két termelési érték (reális/maximális) két szcenárióként szerepel.

8. táblázat: Távlati vízigények a Kincsesbánya lokális modell területén

Vízbázis neve	Termelőkút neve	Üzemeltető	A regionális és lokális modellezés során, a prognózishoz figyelembe vett víztermelések (m^3/nap)*		Távlati termelési értékek (m^3/nap)	
			Engedélyezett víztermelés 2018-ban	Tényleges víztermelés 2018-ban	"reális" változat	"maximális" változat
Kincsesbánya vízbázis	Rákhegy II. karsztakna	DRV Zrt.	19 178	12 818	25 000	30 000
Csóri Vízmű vízbázisa	Csóri karsztakna	Fejérvíz Zrt.	10 000	10 328	20 000	40 000
Kajmáti vízbázis		Fejérvíz Zrt.	4 000	3 824	4 901	6 126
Várpalota Bánta pusztai vízmű vízbázisa	Bánta 1-2-3-4 kutak	Bakonykarszt Zrt.	4 342	2 981	5 000	5 500
	Bánta 5. összes	Bakonykarszt Zrt.	0	242		
	Rákóczi kút	Bakonykarszt Zrt.	3	0	100	200
	Inota karsztkút	Bakonykarszt Zrt.	3	23	1 200	2 500

*(OVF OSAP adatszolgáltatás alapján)

A DRV Zrt. által üzemeltetett Kincsesbánya Rákhegy II. vízakna esetében a 2018-as OSAP adatszolgáltatás alapján a modellezés során 19 178 m^3/nap engedélyezett és 12 818 m^3/nap tényleges vízkivétellel számoltunk. A DRV adatközlése szerint az engedélyezett vízkivétel 2021-ben 25 000 m^3/nap. Ehhez képest a reális többlettermelés 25 000 m^3/nap, a maximális változat 30 000 m^3/nap. A többlet termelés a balatoni térség teljes vízellátásának javítása érdekében történhet, a felszíni vízkivételi művek kiváltása érdekében, valamint a Velencei-tó vízpótlására is hasznosítható.

A Fejérvíz Zrt. által üzemeltetett csóri karsztakna esetében a 2018-as OSAP adatszolgáltatás alapján a modellezés során 10 000 m^3/nap engedélyezett és 10 328 m^3/nap tényleges vízkivétellel számoltunk. Ehhez képest a reális többlettermelés 20 000 m^3/nap, a maximális változat 40 000 m^3/nap. A többlettermeléssel megoldható Székesfehérvár vízellátása, illetve elhelyezkedése okán az itt termelt víz a balatoni felszíni vízművek kiváltására is alkalmas lenne. A vízkivétel emelése itt műszaki szempontból is indokolt lenne.

3.3 Az éghajlat változásának figyelembevétele a prognózis során

A vízszintek alakulását a jövőben 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.

A projekt előírt módszertana 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. A prognosztizált 2019-2030 időszakra a regionális és a már befejezett öt db lokális modellezések során három szcenáriót vizsgáltunk.

Vízgazdálkodási szempontból kedvezőtlen a kis mennyiségű beszivárgás. Ilyenkor nem biztos, hogy rendelkezésre áll az emelt termelésekhez a megfelelő vízmennyiség, és a karsztvíztárolóban olyan jelenségek lépnek fel, amelyek az EU Vízkeret Irányelvvel összeegyeztethetetlenek, mert a karsztvíztest állapotromlása következik be. Ilyen jelenségek a karsztvízszint tartós süllyedése, a források hozamának csökkenése. Ezért jelen modellezés során a hatás szempontjából a legrosszabb verziót vizsgáltuk, a prognosztizált 2030-ig tartó időszakra a legkisebb beszivárgású időszakot vettük figyelembe.

3.4 A többlet vízkivételek hatása

3.4.1 Karsztvízszintek változása

A változások vizsgálatának referencia éve a már elkészült regionális és öt db lokális modellhez hasonlóan 2019.

A modellterületen 11 db olyan megfigyelőkút található, melyből rendelkezünk mért vízszint adatokkal, közülük hármat már a 1970-es évektől folyamatosan mérnek (Csákberény-86/a, Csókakő-1, Isztimér-3). A többi monitoringkút esetében az 1990-es évektől vannak adatok. A modell által leképezett karsztrendszer működését jól szemlélteti a modellezett és mért vízszint idősorok összevetése. A modellezett számított és a törzshálózati kutakban mért vízszint idősorokat mutatja be az ***57***. ábra - ***67. ábra***. Az ábrákon piros vonal szemlélteti a mért vízszint adatokat, míg a tényleges vízkivételi értékek alapján számított értékek zöld vonallal vannak jelölve. A reális illetve maximális termeltetés melletti számított, előrejelzett vízszintek kék, valamint lila szaggatott vonallal vannak jelölve. Az ábrán látható értékek korrigálásra kerültek olyan módon, hogy a 2019. januári mért és számított vízszintek különbségével a görbék el lettek tolva, annak érdekében, hogy az előrejelzés során kapott vízszintek a lehető legpontosabbak legyenek.

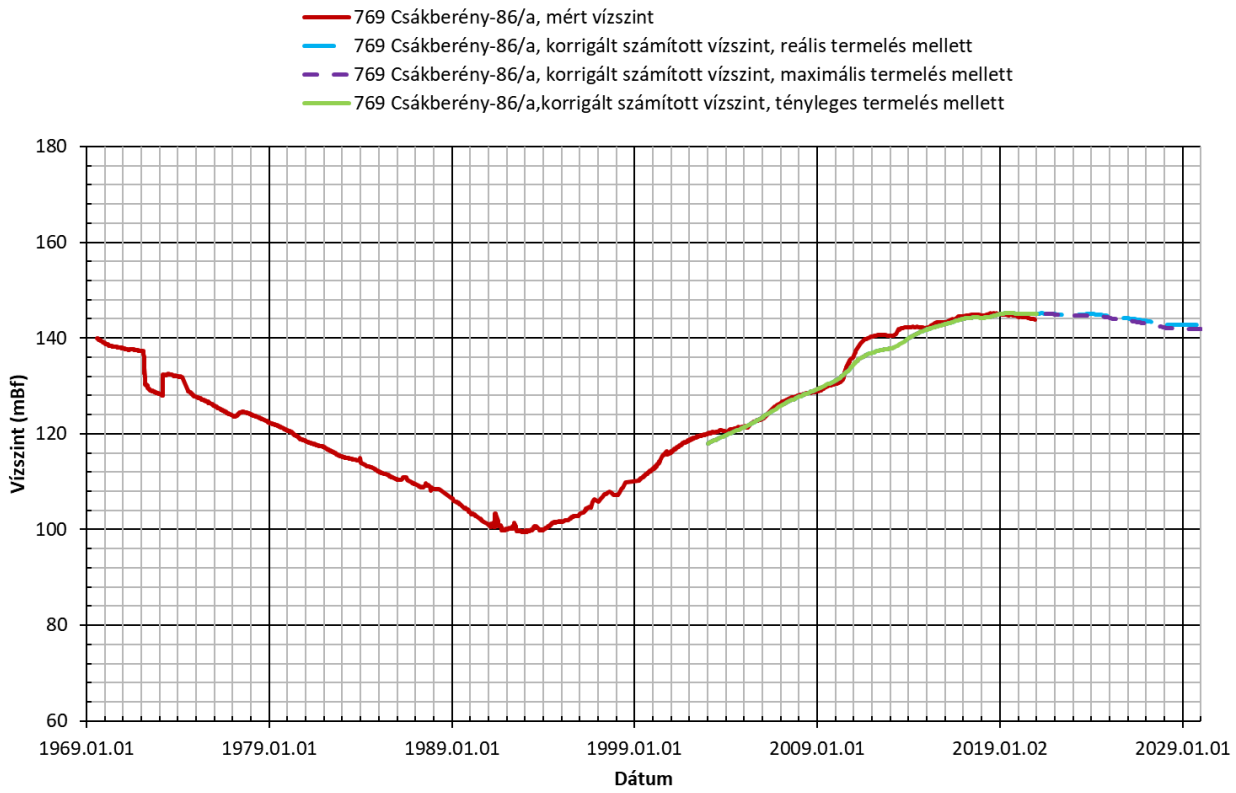
A lokális modellezés időperiódusa rövidebb volt, mint a regionálisé, 2000-tól kezdődve már csak a visszatöltődés periódusát szimulálta. Az adatok feldolgozása 2003-tól történt meg. A modellezett és mért vízszinteken a visszatöltődés folyamata így is jól látszódik. Az ábrák alapján a figyelőkutakban mért, valamint a számított vízszintek jó egyezést mutatnak.

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 magasabban fekvő nyílt karsztos területeken található kutakban (Csákberény 86/a, Csókakő-1, Isztimér-3, Tés-1, Királyszállás, Bakonykúti HgI-41).

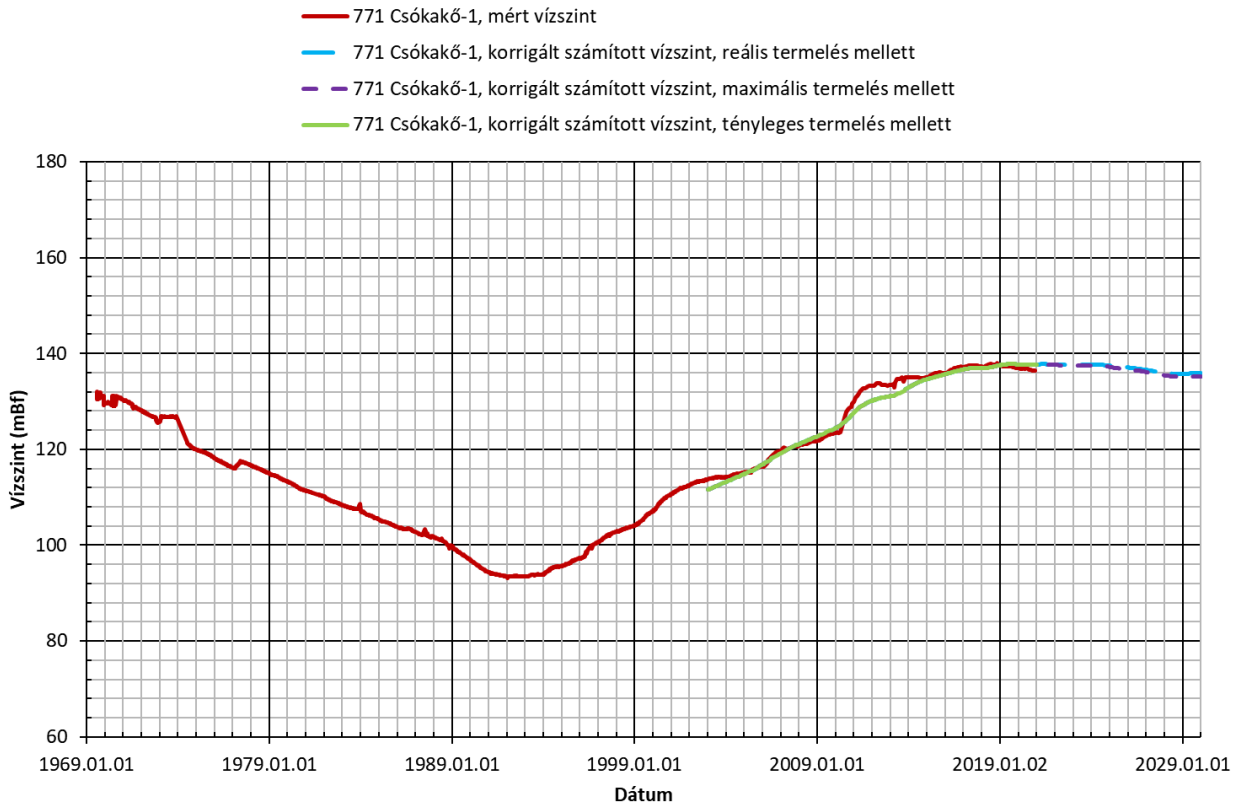
Az iszkai blokkon lévő figyelőkutak (Csór HgI-44, Iszkaszentgyörgy Kp-248, Iszkaszentgyörgy HgI-37, Iszkaszentgyörgy HgI-38), illetve az attól északkeletre elhelyezkedő Magyaralmás HgI-45 kút vízszint idősorára kevéssé jellemző a csapadéknak megfelelő fluktuáció, utánpótlódásuk nem közvetlenül történik a beszivárgott csapadékból.

Mind a reális, mind a maximális többlet termelés hatására a figyelőkutak 2021-2030 közötti prognosztizált vízszint idősorában csökkenő trend figyelhető meg. A 2028-as évre számolt alacsony beszivárgás értékek miatt a magasabban fekvő nyílt karszton található figyelőkutak közül az isztiméri,

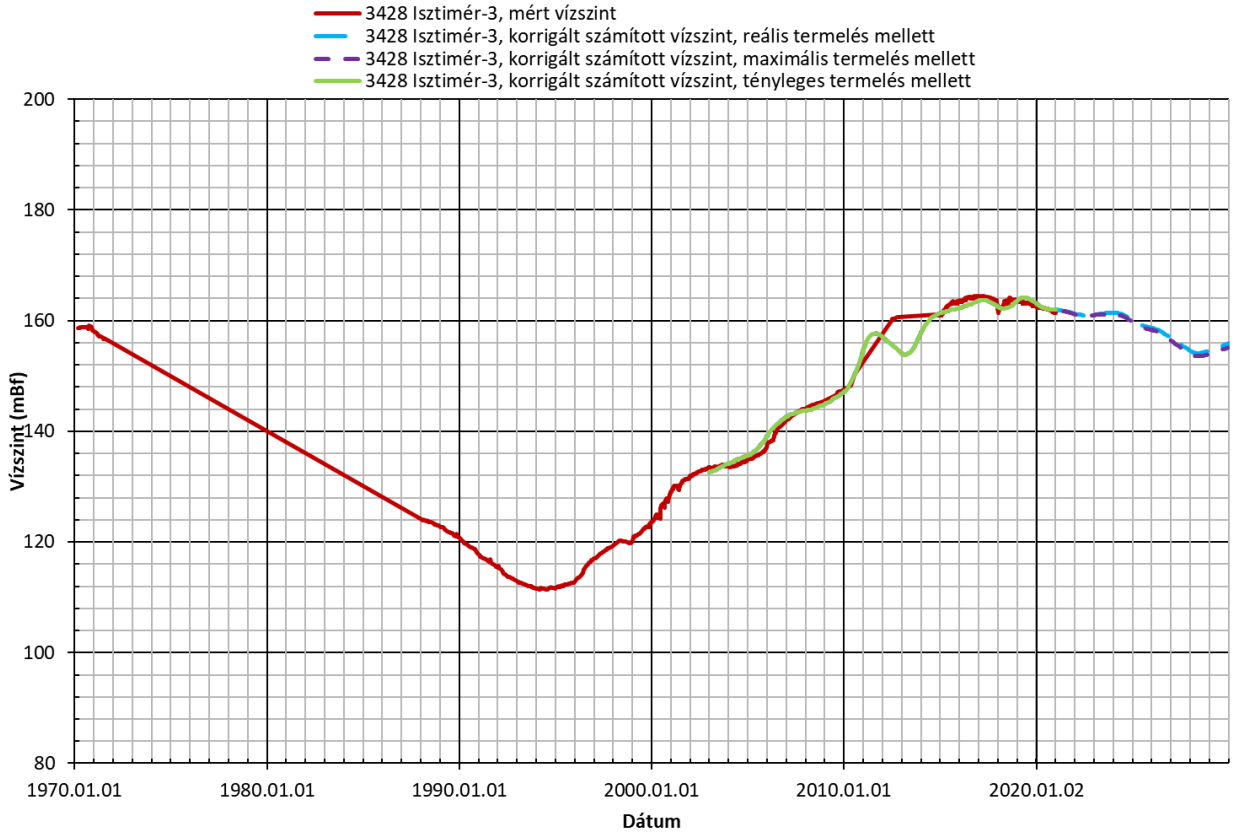
a tési és a bakonykúti kutak esetében a prognosztizált vízszint idősorokat a 2028-as évben bekövetkező minimum értékek jellemzik. A csákberényi és a csókakői kutakban a 2028-as és a 2030-as vízszintek közel azonosak. A többi kút esetében (iszkai blokk, Magyaralmás HgI-45) tekintettel arra, hogy a vízkivételi helyekhez közel, valamint a beszivárgásra kevésbé érzékeny területen találhatók, a 2028-as minimumok nem látszódnak. Ezeken a területeken a vízszintcsökkenés elsősorban a termelés által befolyásolt. A magasabban fekvő nyílt karszton lévő monitoring kutakra ugyancsak jellemző, hogy a számított reális és maximális termeltetés melletti 2030-as vízszintek kevésbé térnek el egymástól (1 méteren belüli), mint az iszkai blokkon elhelyezkedő kutakban (10 és 25 méter közötti), valamint a Magyaralmás HgI-45 kútban (4 méter). Az egyes figyelőkutakban prognosztizált vízszintváltozás értékeit a reális és maximális termeltetés mellett a ***9. táblázat*** foglalja össze. A táblázatban feltüntettük a kutak 2028-ra, illetve a 2030-ra várhatóan bekövetkező változások értékeit is.



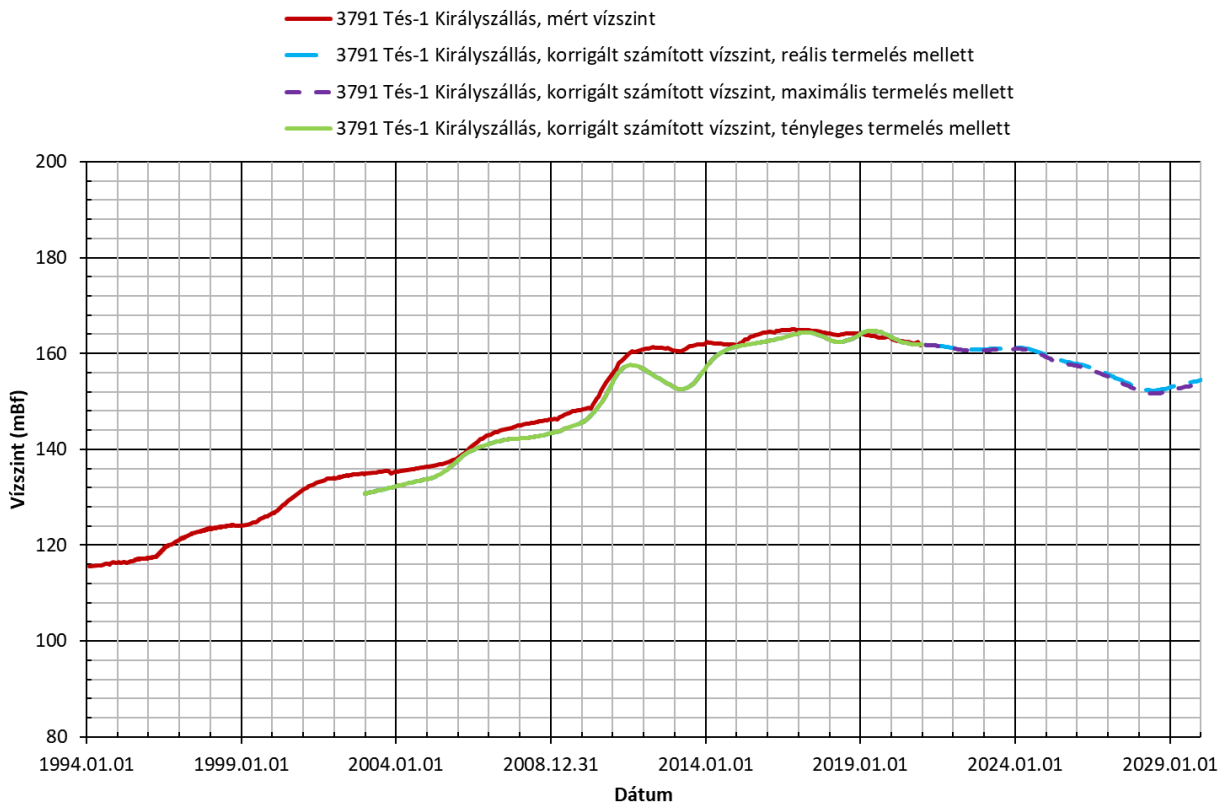
57. ábra: A Csákberény-86/a monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora



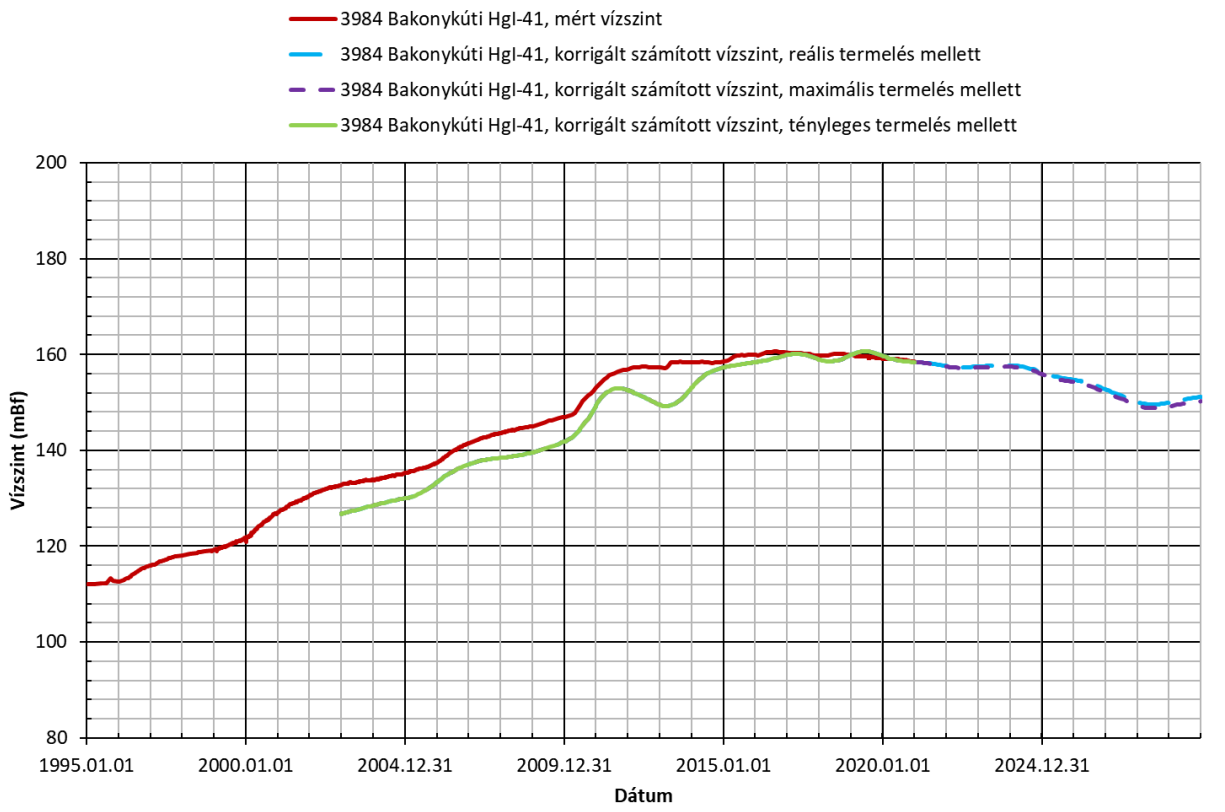
58. ábra: A Csókakő-1 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora



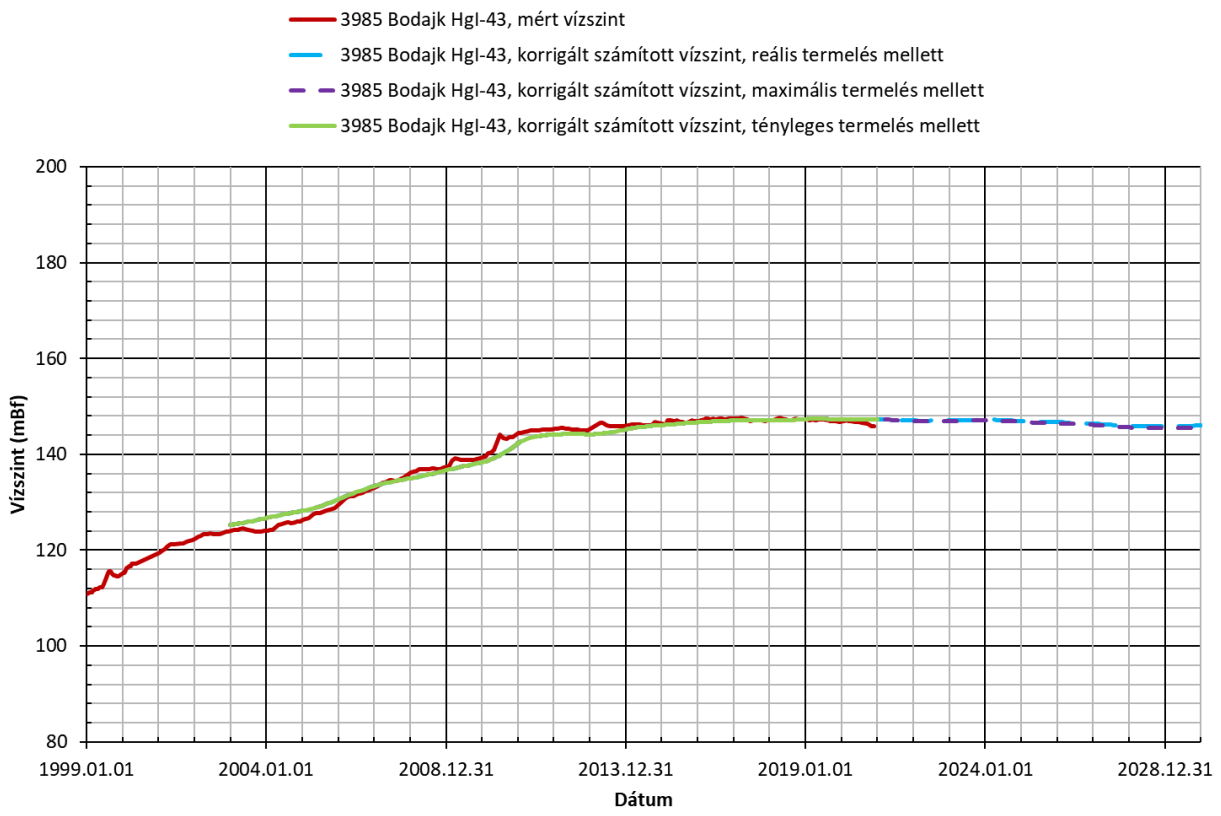
59. ábra: Az Isztimér-3 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora



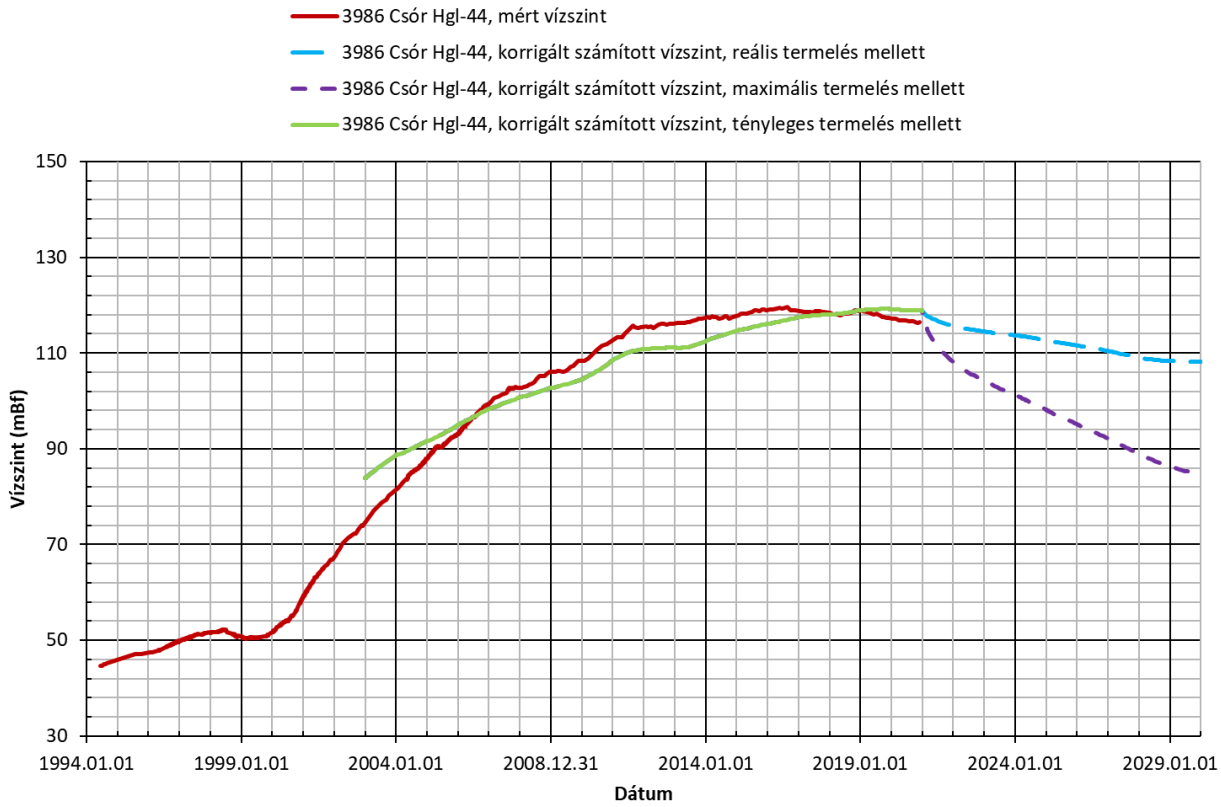
60. ábra: A Tés-1 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora



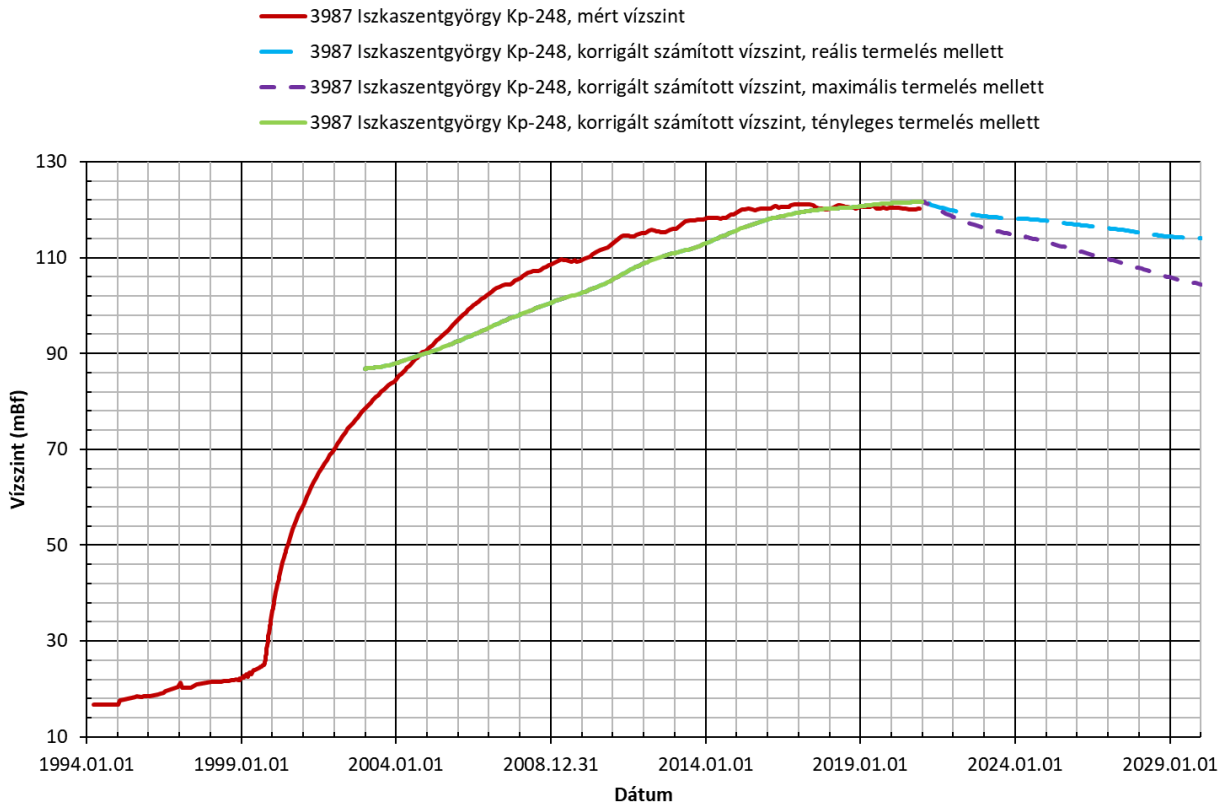
61. ábra: A Bakonykúti HgI-41 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora



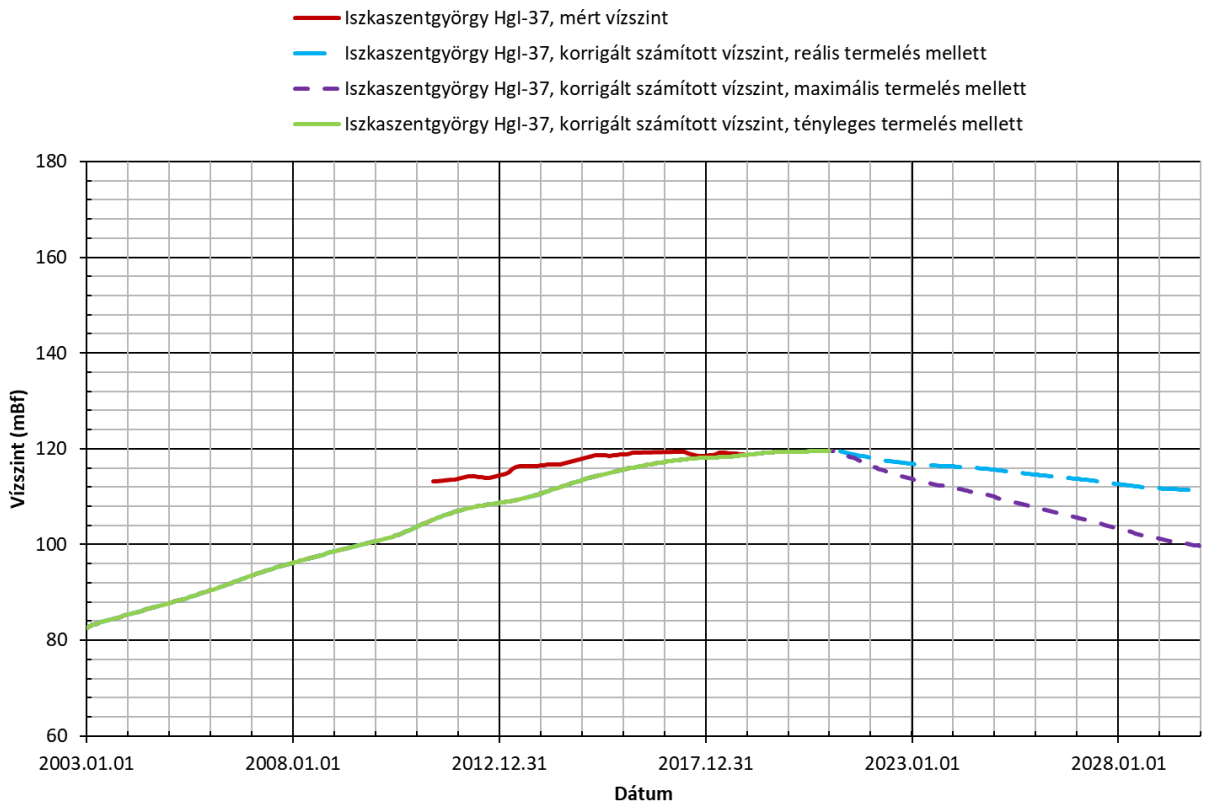
62. ábra: A Bodajk HgI-43 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora



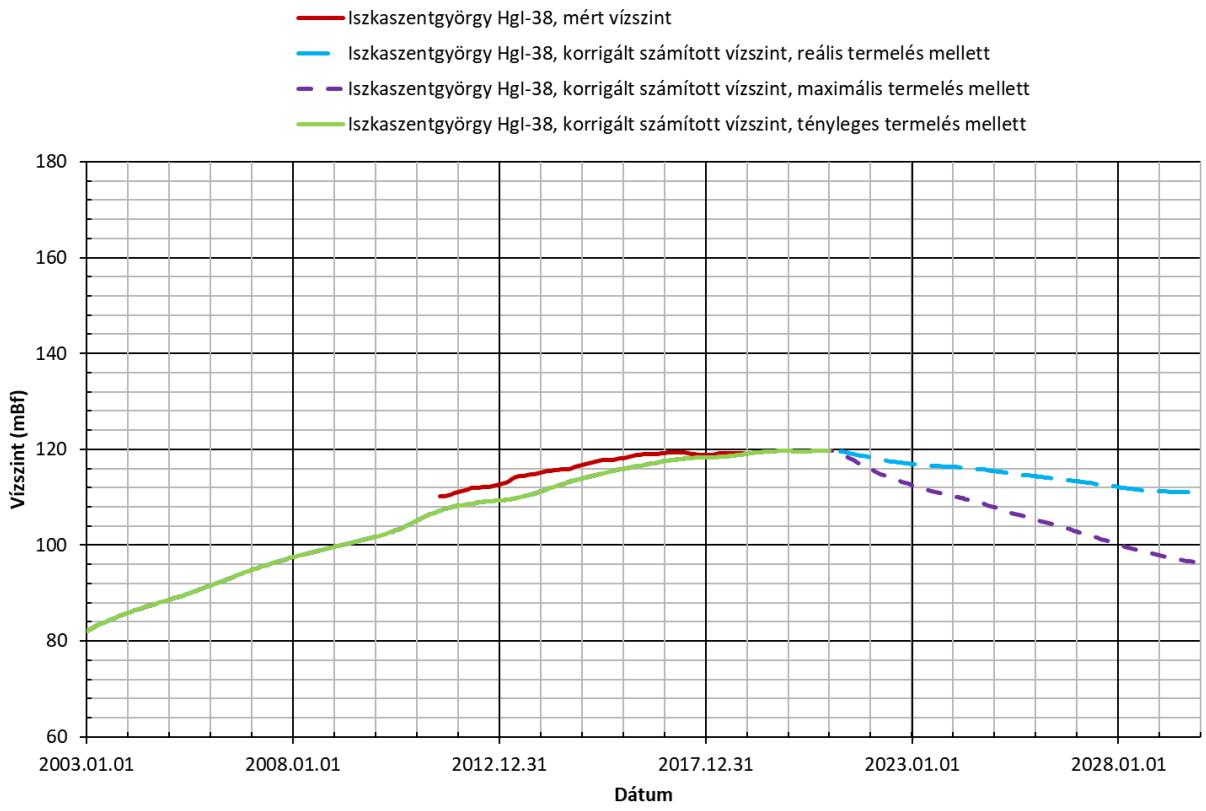
63. ábra: A Csór HgI-44 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora



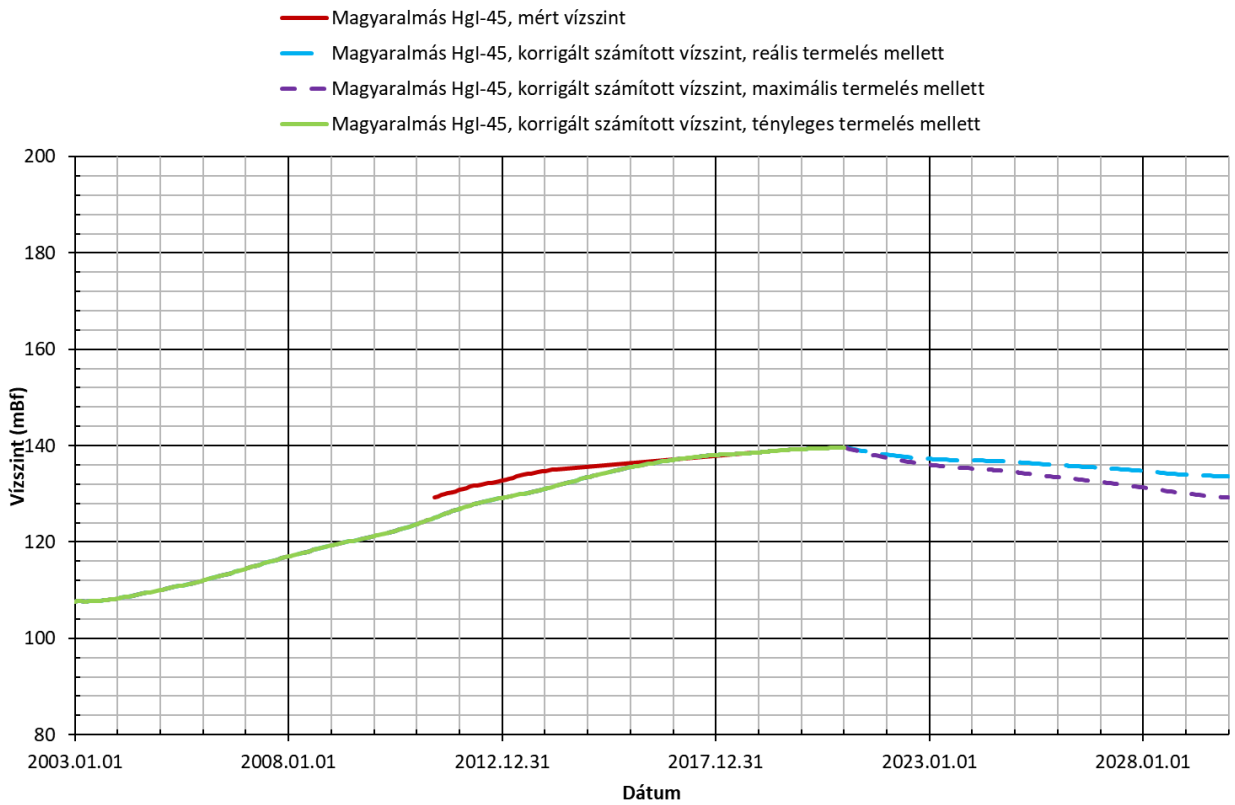
64. ábra: Az Iszkaszentgyörgy Kp-248 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora



65. ábra: Az Iszkaszentgyörgy HgI-37 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora



66. ábra: Az Iszkaszentgyörgy HgI-38 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora

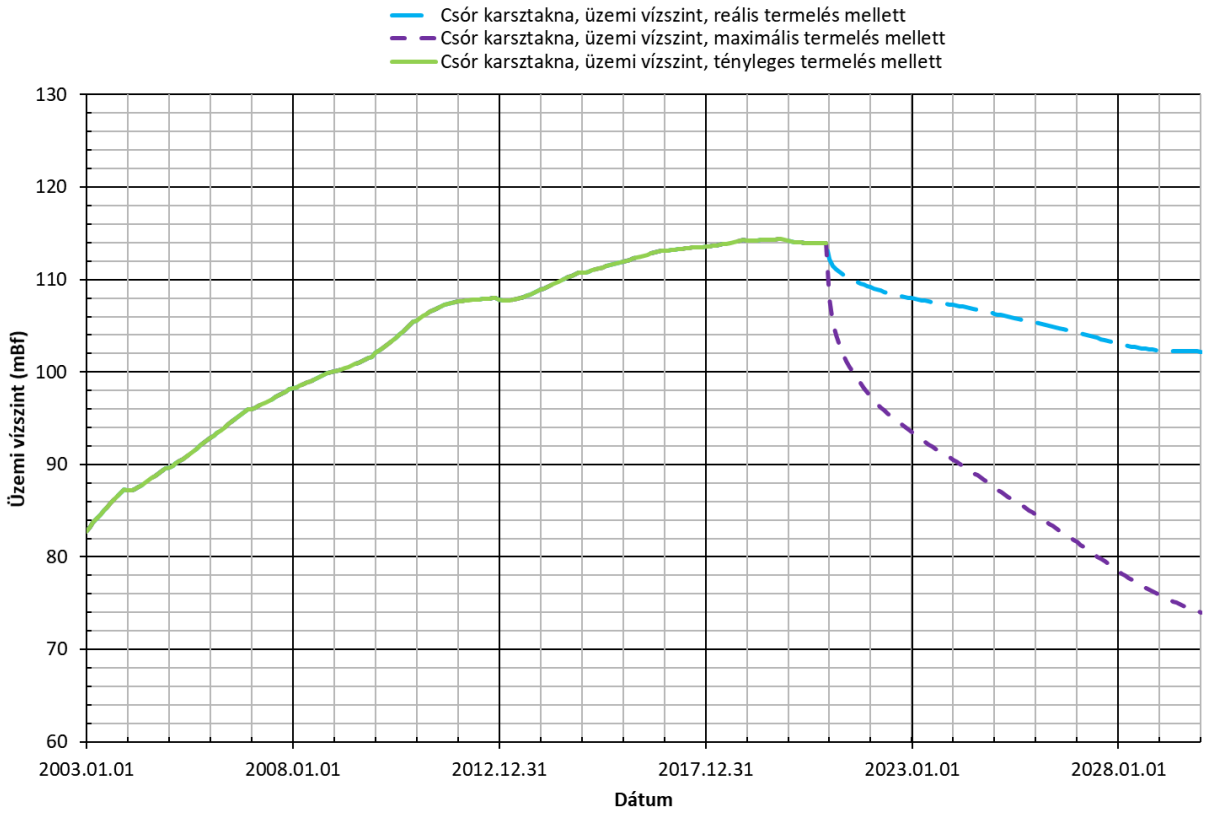


67. ábra: A Magyaralmás HgI-45 monitoring kút mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízszint idősora

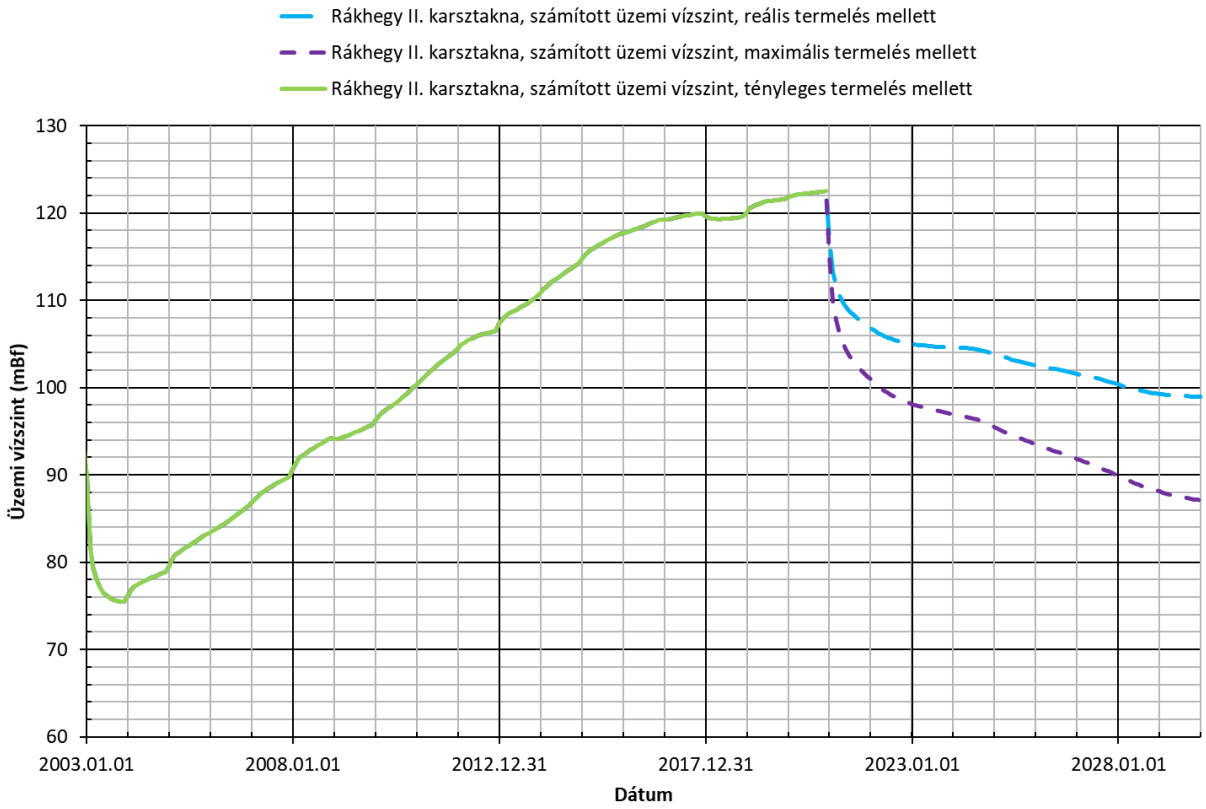
9. táblázat: A lokális modellterületen található figyelőkutak vízszintváltozásai reális és maximális termeltetés mellett a 2019-es állapothoz viszonyítva

Monitoring kút neve	Többlet termelés – reális változat		Többlet termelés – maximális változat	
	2028	2030	2028	2030
	Változás mértéke a 2019-es referencia vízszinthez képest (m)			
771 Csókakő-1	-1,57	-1.64	-2,08	-2.33
769 Csákberény-86/a	-2,12	-2.17	-2,8	-3.08
3985 Bodajk HgI-43	-1,42	-1.36	-1,71	-1.74
Magyaralmás HgI-45	-3,87	-4.95	-7,29	-9.34
3428 Isztimér-3	-9,05	-7.75	-9,59	-8.49
3791 Tés-1, Királyszállás	-11,23	-9.63	-11,81	-10.44
3984 Bakonykúti HgI-41	-9,79	-8.70	-10,05	-9.68
3987 Iszkaszentgyörgy Kp-248	-5,42	-6.69	-12,87	-16.22
Iszkaszentgyörgy HgI-37	-6,08	-7.33	-15,4	-19.09
Iszkaszentgyörgy HgI-38	-6,95	-8.07	-18,92	-22.88
3986 Csór HgI-44	-9,87	-10.78	-30,04	-34.45

A csóri karsztakna, valamint a Rákhegy II. karsztakna modellezéssel számított reális és maximális termeltetés melletti üzemi vízszint idősorát mutatja a ***68. ábra*** és a ***69. ábra***. A 2003-2020 közötti vízszint emelkedést követően – a megemelt termelések hatására - mindkét idősorban megfigyelhető a 2030-ig tartó csökkenő trend. A Csór karsztakna prognosztizált üzemi vízszint idősorában a számított reális és maximális termeltetés melletti (a termelési értékeket lásd a ***8. táblázat***ban) 2030-as vízszintek jobban eltérnek egymástól (38 méter), mint a Rákhegy II karsztaknában (21 méter).



68. ábra: A csári karsztakna számított üzemi vízszint idősora különböző termelési szcenáriók mellett



69. ábra: A Rákhegy II. karsztakna számított üzemi vízszint idősora különböző termelési szcenáriók mellett

A törzshálózati kutak többsége a karsztvíztároló nyíltkarsztos, vagy sekély fedettségű részein található. 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 modellezés referencia időpontja, a nyíltkarsztos, vagy sekély fedettségű részeken a karsztvízszint visszatöltődése kvázi befejeződött. Napjainkra új egyensúly alakult ki: a főkarsztvíztároló vízforgalma, vízkészlete, nyomásállapota és áramlási viszonyai hosszú idő átlagában egyensúlyban maradnak.

A prognózis időszakára (2019-2030) a numerikus modellezés eredményeiből következtethetünk. A jelenlegi termelési szint mellett a karsztvíztároló nyíltkarsztos, vagy sekély fedettségű részein a klimatikus viszonyoknak megfelelően a csapadékesemények, valamint a helyi vízkivételek nagysága befolyásolja a tárolt vízkészlet mennyiségét, a karsztvízszinteket, és a forráshozamok változását.

A nyomás alatti, nagy vastagságú porózus kőzettel fedett karsztvíztároló részeken, ilyen a lokális modellezési terület peremi részein található, a modell további emelkedést prognosztizál 2030-ig.

A nyíltkarsztos, vagy sekély fedettségű karsztvíztároló részeken a kialakult egyensúlyi állapotot az is előidézte, hogy 1995 óta a termelés stabilizálódott, 2007 óta alig változik. A többlet termelés hatására a karsztvízszint megint csökkenni fog.

A 2019-es referenciaév modellezett karszvízszintjét az ***1. térképmelléklet,*** a 2030-ra modellezett karsztvízszinteket a ***2***. és a ***3. térképmelléklet***, a karszvízszintcsökkenés mértékét a ***4***. és a ***5. térképmelléklet*** mutatja be.

A térképeken jól látszik a Rákhegy II. és csóri karsztaknák megemelt termelésének hatása, az aknák körül kialakult depressziós tér.

A Kincsesbánya modellterületen, reális termelési szcenárió mellett 2030-ban a legmagasabb vízszintek a Tési-fennsíkhoz tartozó beszivárgási területen lesznek, 157 mBf érték körül. Ez kb. 10 méterrel alacsonyabb, mint a tényleges termelési értékekkel modellezett 2019-es legmagasabb érték, amely 167 mBf körül alakul. A legalacsonyabb vízszint a vízkivételi helyek (Csór és Rákhegy) környezetében tapasztalható.

A reális termelési változat esetén a modellezett vízszintsüllyedés a vízkiemelési központok környezetében a legjelentősebb, a csóri aknánál a 10 métert is meghaladhatja, míg Rákhegy II. akna környezetében akár a 20 méter körüli értéket is elérheti. A teljes modellterületre vonatkozóan a vízszintváltozás az előrejelzési időszakban -21 – 6 m között változik. A depressziós tér irányultságát elsősorban a területen található két jelentősebb vető – egy ÉK-DNy-i irányú, Fehérvárcsurgótól Inotáig húzódó feltolódás, valamint egy ezzel összemetsző Fehérvárcsurgótól ÉNy-DK-i irányba húzódó vetők befolyásolják. A depressziós tér – bár a tér minden irányában kifejti hatását a vízszintekre - a szerkezeti elemek hatására elsősorban D-DK-i irányban okozza a legnagyobb vízszintsüllyedést.

A maximális termelési változat esetén a vízszintek térbeli eloszlása a reális szcenárióhoz hasonló, azonban a süllyedés mértéke – elsősorban a vízkiemelési központok környezetében – jóval magasabb lehet. A modellezett vízszintsüllyedés -40 – 6 m között változik. A modellezett legnagyobb vízszintsüllyedés a Rákhegy II. karsztakna körül 30 m, a csóri karsztakna körül a 40 méter körüli értéket is elérheti. A depressziós tér iránya szintén D-DK-i irányban a legkiterjedtebb.

A reális és maximális termelési szcenáriók mellett a legmagasabb és legalacsonyabb vízszintértékek a 2019-hez hasonló területi eloszlást mutatnak, a legmagasabb vízszintek a Tési-fennsíkhoz tartozó

beszivárgási területen, míg a legalacsonyabb vízszintek a termelési központok környezetében jelennek meg.

- A reális termelési szcenárió esetén 2030-ban a legmagasabb vízszint 157 mBf körül alakul, míg maximális termelés mellett 2030-ban szintén nagyon hasonló, 156 mBf körüli legmagasabb vízszintértékeket várhatunk.
- A termelési központoknál tapasztalható legalacsonyabb vízszintek nagyobb eltérést mutatnak a két szcenárió esetén. Reális termelés mellett a legalacsonyabb vízszintek Rákhegy II. akna környékén 103 mBf körül lehetnek, míg a csóri akna körül 105 mBf körüli vízszintet prognosztizáltunk. A maximális termelési szcenárió esetén a várható legalacsonyabb vízszintek ennél jóval kisebbek: Rákhegy II. akna környezetében 91 mBf, míg Csór akna környezetében 79 mBf vízszintértékek várhatók. A legnagyobb depresszió e szcenáriók esetén is a modellterület D-DK-i része felé jelenik meg.

3.4.2 A többlet termelés hatása a forrásokra és vízfolyásokra

A bányászati víztelenítés jelentős hatása volt, hogy a karsztforrások hozama csökkent, vagy akár teljesen el is apadt, amely a kisvízfolyások teljes kiszáradásához vezetett. A megemelt termelés hatása a források hozamának csökkenésében, vagy újbóli elszáradásában nyilvánulhat meg.

Az ***1. térképmellékleten*** a forrásokat a 2019 évi, a forrásfelmérés időszakában tapasztalt állapotuk szerint tüntettük fel. A ***2-5. térképmellékleteken*** a modellezés eredményei alapján tüntettük fel a 2030-ban fakadó, illetve a száraz forrásokat. A reális termelési szcenárió esetén várhatóan 7 db olyan forrás (Bodajk, Vízmű-forrás; Nádastavi-forráscsoport; Fehérvárcsurgó, Tó-forrás; Inota környéki források) marad a területen, amely továbbra is fakadni fog, hozamuk azonban a megnövekedett termelés hatására jelentősen csökkenhet (***10. táblázat***). A maximális termelési szcenárió esetén a prognosztizáció szerint további 1 db forrás (Inota, Tó-forrás 2) apadhat el a megnövekedett termelés hatására.
A terület jelentősebb forrásai a Bodajkon található Tó-forrás és Vízmű-forrás, a Nádastavi-forráscsoport, illetve a fehérvárcsurgói Tó-forrás.

A bodajki források hozamára elsősorban a Rákhegynél történt vízkivétel volt hatással. Ennek eredményeként következett be 1968-ban a Tó-forrás, míg 1975-ben a Nádastavi-forráscsoport elapadása.

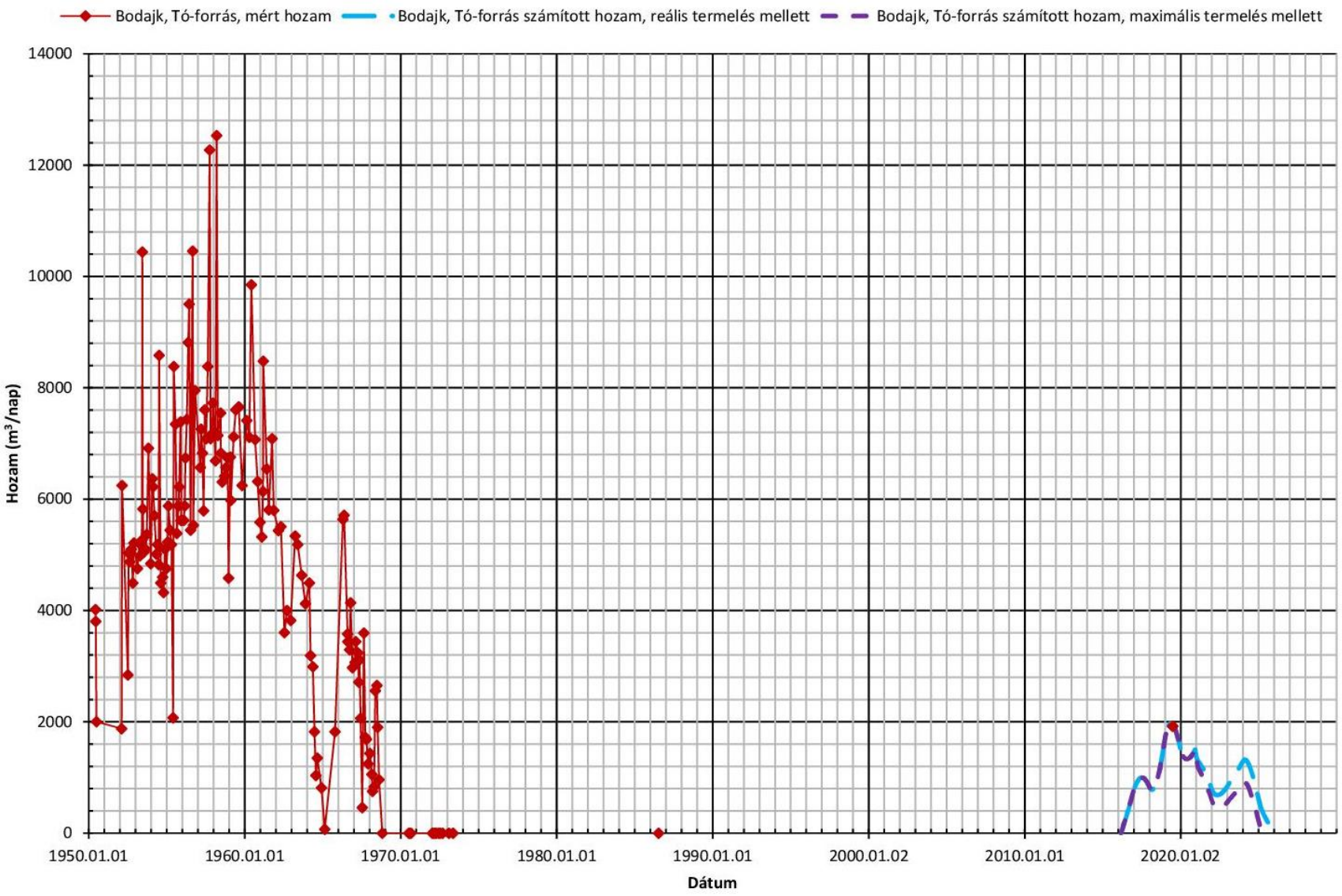
A bodajki források hozamának mért idősorát, valamint a modell által számított hozamértékeket az ***70.*** ábra - ***72. ábra*** mutatja be. A Tó-forrásban és a Nádastavi-forrásban az 1970-es években megszűnt a rendszeres hozammérés és a források újra fakadását követően sem indult újra, a Vízmű-forrás esetében pedig archív hozamadatok, korábbi mérések nem voltak. Ennek következtében 2019-ből csak 1 db, a forrásfelmérés során felvételezett mért értékkel rendelkezünk, mely erősen függ az aktuális időjárási viszonyoktól. Mindhárom forrásnál viszonylag jól fedik a 2019-ben mért értékek, a modell által számolt értékeket.

A görbéken látszódik, hogy a Tó-forrás vízhozamát nagyobb ingadozás jellemzi, az a beszivárgás mennyiségétől erősen függő. A Nádastavi-forráscsoport egy nagyobb, és sokkal stabilabb alaphozammal rendelkezik, mely az 1970 előtt mért és az újrafakadás utáni időszakra a modell által számított vízhozam értékek alapján is megfigyelhető.

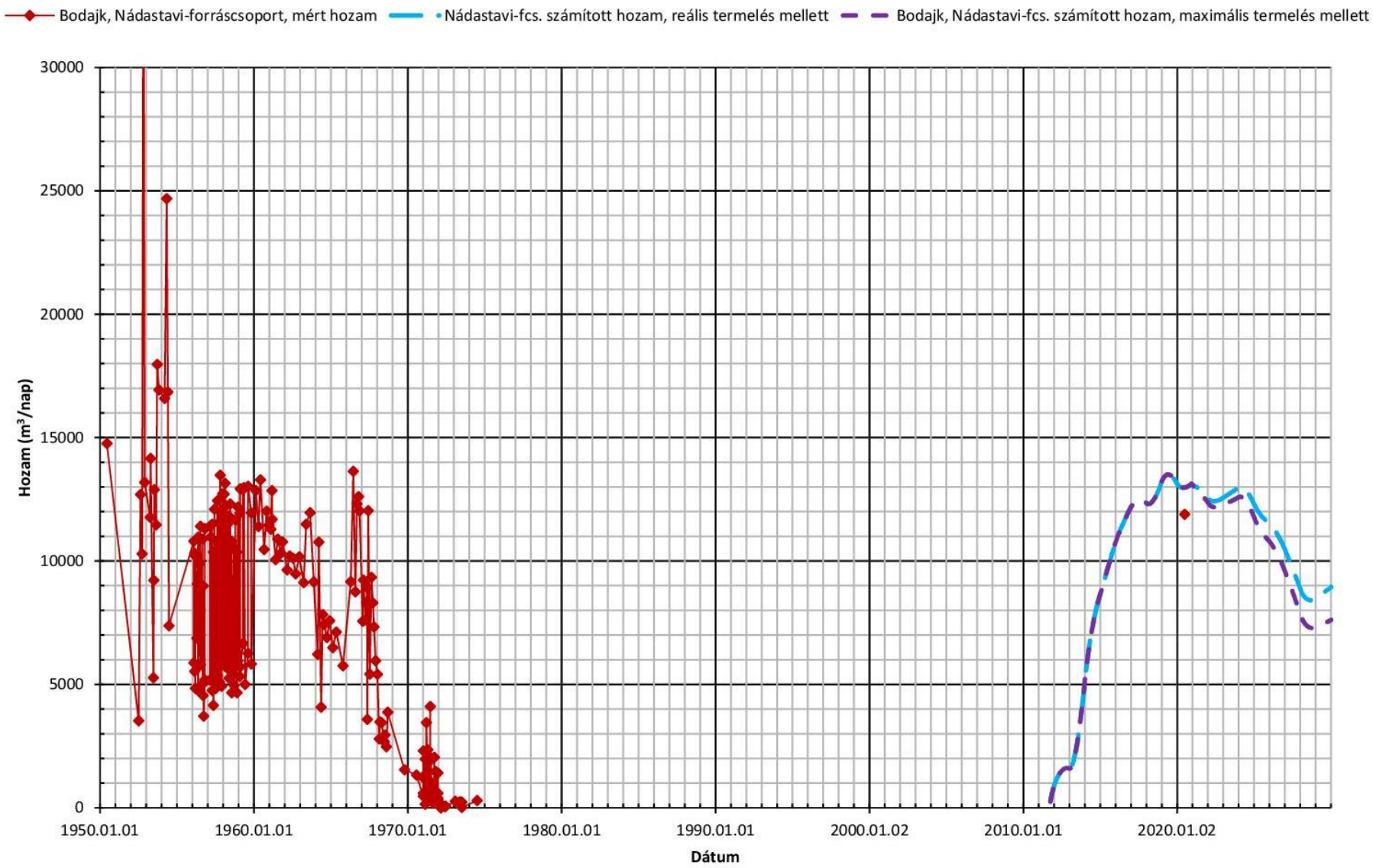
A Tó-forrás esetében a modellezés alapján hozamcsökkenés várható, mind a reális, mind a maximális termeltetés mellett, a forrás 2025-2026-ra újra elapadhat. A Nádastavi-forráscsoport hozamában lassú csökkenés látszik, a modellezés szerint hozama a termeltetés függvényében a jelenlegi 12 000-13 000 m^3/nap-ról 7500-9000 m^3/nap-ra csökken 2030-ra. A Vízmű-forrás hozamában ugyancsak lassú csökkenés figyelhető meg, 2030-ra a reális termeltetés mellett 300, míg a maximális termeltetés mellett 50 m^3/nap hozam várható.

Fehérvárcsurgó jelentős fakadása a *Tó-forrás*, melyből mindössze egyetlen archív hozamadattal rendelkezünk, amit 1950-ben mértek, akkor a hozam 600 l/p (864 m^3/nap) volt, 1957-ben elapadt. Hozamát később sem mérték, a következő mérés a 2019-es forrásfelmérésből származik. A forrás hozamának mért idősorát, valamint a modell által számított hozamértékeket a ***73. ábra*** mutatja. A forrás hozamában 2019 után lassú csökkenés látható, 2030-ra a reális termeltetés mellett 1300 m^3/nap, míg a maximális termeltetés mellett 600 m^3/nap hozam várható.

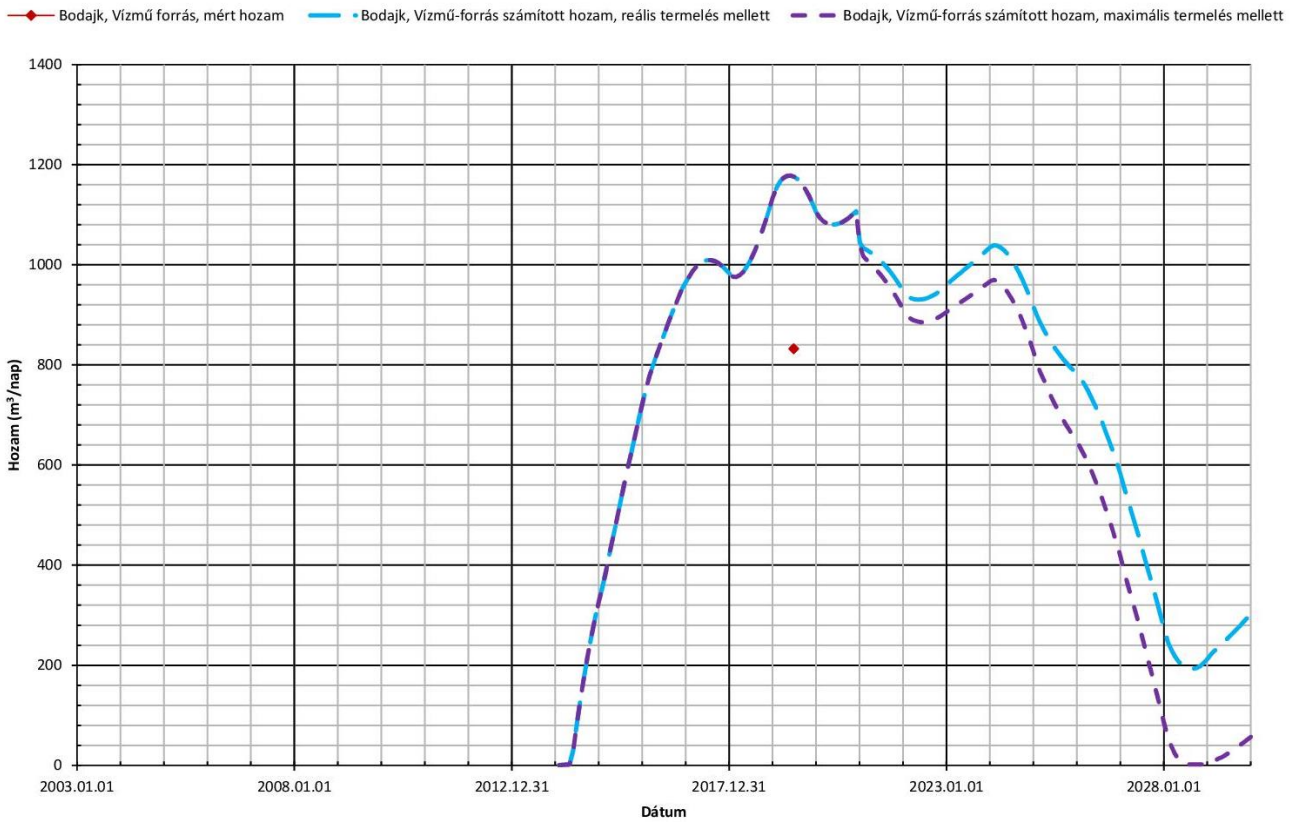
A fontosabb források kezdeti (2019-re modellezett), illetve 2030-ra prognosztizált hozamváltozásait a reális és maximális termeltetés mellett a ***10. táblázat*** mutatja, ahol a százalékos érték a 2019-es értékhez viszonyított megmaradó hozamot mutatja. A táblázatban feltüntettük a források 2028-ra prognosztizált, legalacsonyabb beszivárgáshoz tartozó hozamait is.



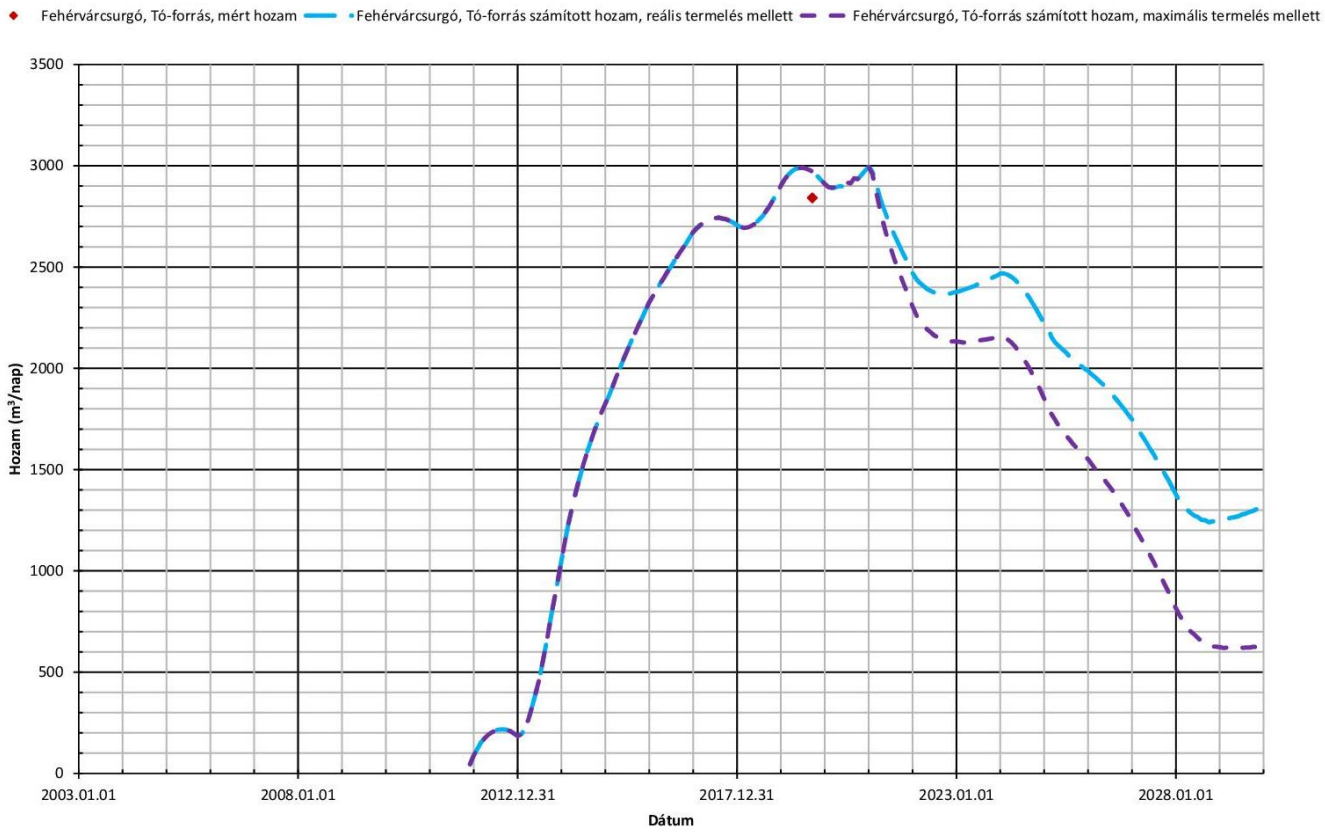
70. ábra: A bodajki Tó-forrás mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízhozam idősora (m^3/nap)



71. ábra: A Nádastavi-forráscsoport mért különböző termelési szcenáriók mellett számított vízhozam idősora (m^3/nap)



72. ábra: A Vízmű-forrás mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízhozam idősora (m^3/nap)



73. ábra: A fehérvárcsurgói Tó-forrás mért és különböző termelési szcenáriók mellett számított vízhozam idősora (m^3/nap)

10. táblázat: A lokális modellterületen található jelentősebb források hozamváltozásai reális és maximális termeltetés mellett

Monitoring kút neve	Tényleges termelés		Többlet termelés – reális változat				Többlet termelés – maximális változat			
	2019		2028		2030		2028		2030	
	Modellezett hozam (m^3/nap)	Százalék (%)	Modellezett hozam (m^3/nap)	Százalék (%)	Modellezett hozam (m^3/nap)	Százalék (%)	Modellezett hozam (m^3/nap)	Százalék (%)	Modellezett hozam (m^3/nap)	Százalék (%)
Bodajk, Tó-forrás	1725,7	100	-	0	-	0	-	0	-	0
Nádastavi-forráscsoport	13240	100	8853,6	66,87	8946,5	67,57	7828,4	59,13	7612,4	57,5
Bodajk, Vízmű-forrás	1134,7	100	274,43	24,19	302,62	26,67	84,91	7,48	57,374	5,06
Fehérvárcsurgó, Tó-forrás	2907,5	100	1377,8	47,39	1321	45,43	815,76	28,06	632,86	21,77

A kisvízfolyások hozama több helyről származik. Egyrészt a forrásból, másrészt a felszíni lefolyásból, harmadrészt az alluviális megcsapolásból. A bányászati víztelenítés jelentős hatása volt, hogy a karsztforrások hozama csökkent, vagy akár teljesen el is apadt, amely a kisvízfolyások teljes kiszáradásához vezetett. A kisvízfolyások tehát a főkarsztvíztárolóval hidraulikai kapcsolatban lévő felszíni vizek, de a vízcsere iránya a karszt nyomásszintjének függvényében változhat.

Természetes állapotban a karsztvíztároló és a fedőrétegek, valamint a felszíni vizek közötti vízcsere a karsztból a fedőrétegek, és a felszíni vizek felé irányul. Természetes állapotban is előfordul azonban ellentétes folyamat, abban az esetben, ha a meder mészkőből vagy dolomitból épül fel. Ilyenkor bizonyos vízhozam alatt, a mészkőből vagy dolomitból álló mederszakaszok nyelőként működnek. A földtani alapon lehatárolt meder nyelő szakaszokat a térképmellékleteken feltüntettük.

A 2019-2030 karsztvízszint különbség térképeken ahol a karsztvízszint változása negatív irányú, vagyis a többlet termelés hatására süllyed a karsztvízszint a feltüntetett mederszakaszok tartósan nyelővé válhatnak. Ennek több következménye is lehet. Egyrészt a nyelőszakaszok alatt tartósan csökken a kisvízfolyás vízhozama, másrészt szennyezőforrássá válhatnak, különösen, ha tisztított vagy tisztítatlan szennyvizet vezetnek a vízfolyásba a medernyelő szakasz felett.

4. VESZÉLYEZTETETTSÉG

A Kincsesbánya térségében a bányászati tevékenység befejeződése nyomán meginduló karsztvíz visszatöltődés napjainkra a végéhez közeledik. Azokban az évtizedekben azonban, amikor egy lecsökkent vízszintállapot volt jellemző, a területhasználat – elsősorban városi környezetben – jelentősen megváltozott, pl.: korábban lakatlan területek kerültek használatba vételre, beépítésre, ahol a vízszintek ismételt emelkedése némely esetben jelentős problémákat okozott.

A régióban jelentkező többlet vízigény kielégítésének céljából felmerült, hogy a területen található Kincsesbánya (Rákhegy II.) vízbázis termelésének növelésével a veszélyeztetettség mértéke csökkenthető-e. Ennek tükrében a Kincsesbánya lokális modell elkészítésének célja volt megvizsgálni, hogy egy 2021-2030 között esetlegesen bekövetkező termelésnövekedés a területen milyen hatással lenne annak hidrogeológiai környezetére. A projekt során ezért két többlet termelési szcenárió – egy reális és egy maximális – mellett vizsgáltuk az elkészült hidrodinamikai modell alapján, hogy az adott termelések mellett hogyan változik a terület vízszinteloszlása, valamint az itt található források hozama.

A modellezési időszak során a legkisebb beszivárgás 2028-ban jelentkezik, így a beszivárgás által leginkább érintett területeken (Tési-fennsík, Vértes DNy-i előtere) a legalacsonyabb vízszintek ebben az évben tapasztalhatók, itt tehát a vízszintekre várhatóan nem csak a megnövekedett kitermelés, de a jövőbeni csapadékmennyiségek értéke is jelentős hatással lesz. A vízkivételi helyekhez közelebb, fedett helyzetben lévő területeken a termelés hatása válik mérvadóvá, melynek következtében a beszivárgás esetleges ingadozása mellett – a jelentősen megnövekedett kitermelés hatására – egészen 2030-ig vízszintcsökkenés várható.

A 2019-es állapothoz viszonyítva 2030-ban a vízszinteloszlás reális és maximális termelési szcenárió esetén is hasonló képet mutat. A legmagasabb vízszintek a Tési-fennsíkhoz tartozó beszivárgási területen, míg a legalacsonyabb vízszintek a vízkitermelési helyek (Rákhegy és Csór) környezetében jelentkeznek. A depresszió terjedésének irányát elsősorban a földtani jellemzők (főbb szerkezeti elemek) befolyásolják, melynek hatására a legnagyobb vízszintcsökkenés a termelési területektől D-DK-re jelenik meg.

Veszélyeztetettek azok a területek, ahol az egykori források, forrásterületek ismét működni kezdtek és a forrástérségben úgy megemelkedett a karsztvízszint, hogy az épített környezetben kárt okozott, vagy a vízelvezetés nem volt megoldva. A kincsesbányai lokális modell területén ilyen veszélyeztetettség fordult elő Bodajkon, Fehérvárcsurgón, Csóron és Inotán. A források 2005 tájékán kezdtek újból működni, tehát a problémák régóta ismertek.

A források hozama a megnövekedett termelések hatására jelentősen lecsökkenhet. Reális többlet termelési szcenárió esetén a jelentősebb források hozamai a területen a 2019-es állapotukhoz viszonyítva reális termelési szcenárió esetén annak 0-70%-ára csökkenhetnek, míg maximális termelési szcenárió esetén 0-60% körüli visszamaradó hozamokra számíthatunk. A csökkenés mértéke várhatóan azokban a forrásokban lesz alacsonyabb, amelyek stabilabb alaphozammal rendelkeznek.

A források hozamának csökkentése azonban nem cél, és ezt az EU Víz Keretirányelv nem is engedi. A források hozamának csökkentése a karsztvíztestek vízgyűjtő-gazdálkodási szempontból gyenge állapotát idézik elő.

A veszélyeztetettség problémájára tehát nem megoldás a Rákhegy II. és a csóri karsztakna többlet termelése, mivel regionális süllyedést okoznak, ami ott is karsztvízszintsüllyedést és forráshozamcsökkenést idéz elő, ahol nincsenek problémák. A veszélyeztetett területek problémáit

inkább műszaki megoldásokkal, a vízelvezetés megoldásával vagy kisebb helyi vízkivételekkel célszerű kezelni.

A csóri karsztakna esetében a helyi probléma kezelésére alkalmas a többlet vízkivétel. A csóri karsztakna egykori forrásterületre épült. Az előrejelzés szerint a karsztakna pozitívvá fog válni a jelenlegi termelési viszonyok mellett. A karsztakna által megváltoztatott hidraulikai viszonyok miatt valószínűleg a termeléssel fel nem használt vízhozam nagyobb lesz, mint az egykori Csabafő-víz forrás hozama volt. Ennek a nagymennyiségű víznek az elvezetése problémát fog okozni.

A veszélyeztetett területek a projekt során egy másik módszerrel is meghatározásra kerültek. A regionális és lokális modellezés eredményei alapján le lettek határolva azok a térrészek, ahol a fedő vastagsága kisebb, vagy egyenlő 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.

Az ezzel a módszerrel meghatározott veszélyeztetett területeken nem mindenhol van tényleges probléma, vagy kár. Ugyanis a fedő kőzetek jelenleg védelmet nyújthatnak, sok esetben valamilyen emberi beavatkozás eredményezte a veszélyeztetett állapotot. A karsztvíz csak akkor okoz tényleges problémát, ha a fedő sérül. Ilyen beavatkozás lehet a nem szakszerűen kivitelezett vagy le nem zárt pozitív kút, külszíni bányászati tevékenység, rézsűk megbontása, megváltoztatása, épület alapozás, stb.

A vízszintek a többlet által üzemeltetett termelés hatására jelentősen csökkenhetnek a depressziós területen. Ez reális termelés mellett nagyjából maximum 20 méteres vízszintcsökkenést jelenthet, míg maximális termelési szcenárió esetén ehhez képest – akár további 20 méteres – megnövekedett vízszintcsökkenésre számíthatunk. Ennek következtében a fedett területeken is csökkenhet a karsztvíztároló felszínén a nyomás.

A fenti módszerrel 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. Az ilyen típusú szabályozott területeknél általában a terület „méretezése” a legrosszabb állapotra készül. Ebben az esetben így a kijelölendő veszélyeztetett területeket nem javasoljuk a többlet termelés miatt csökkenteni.

5. 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. 2020: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Veszélyeztetett területek lehatárolása. 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. Bodajk lokális modell. Jelentés

[7] Smaragd-GSH Kft. 2020: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Csór lokális modell. Jelentés

[8] Smaragd-GSH Kft. 2020: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Fehérvárcsurgó lokális modell. Jelentés

[9] Smaragd-GSH Kft. 2020: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Tata lokális modell. Jelentés

[10] Smaragd-GSH Kft. 2020: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Hévíz-Keszthelyi-hegység lokális modell. Jelentés

Felhasznált irodalom

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

[12] 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

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

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

[15] 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/

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

Felhasznált térképek

[17] 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

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

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