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

BODAJK LOKÁLIS MODELL

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

TERVLAP

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

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

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

Jóváhagyta:

Gondár Károly

……..
Gondár Károly Ügyvezető

TARTALOMJEGYZÉK

1. Feladat meghatározás 7
2. A lokális modellterület bemutatása 10
2.1 Elhelyezkedés 10
2.2 Hidrogeológiai viszonyok 12
2.2.1 Földtani felépítés 12
2.2.2 A kőzetek vízföldtani tulajdonságai 15
2.2.3 Természetes megcsapolódások 17
3. A lokális numerikus modellezés bemutatása 19
3.1 A numerikus modell geometriai felépítése, numerikus rétegek 19
3.2 A numerikus modell rácshálójának kialakítása 27
3.3 A numerikus modell hidraulikai paraméterezése 30
3.3.1 Szivárgási tényező értékek a numerikus modellben 30
3.3.2 Fajlagos tározás értékek a numerikus modellben 42
3.3.3 Beszivárgás a numerikus modell felszínén 46
3.3.4 A diszkrét elemek a numerikus modellben 48
3.4 Peremfeltételek a numerikus modellben 50
3.4.1 1. típusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel 50
3.4.2 3. típusú (Transfer)-Cauchy peremfeltétel 51
3.4.3 4. típusú (Well)-Kút peremfeltétel 52
3.5 A tranziens modellezés 54
3.5.1 A tranziens modellezés kezdeti feltételei 54
3.5.2 A tranziens modell időléptéke 55
3.5.3 A numerikus modell kalibrálása 55
3.5.3.1 A karsztvízszint kalibrálása a 2019 állapotra 55
3.5.3.2 A forráshozamok kalibrálása a 2019 állapotra 58
3.5.3.3 Az üzemi vízszintek kalibrálása a 2019 állapotra 58
4. A lokális modellezés eredményei 61
4.1 A 2019-es állapot 61
4.2 Prognózis 2030-ra 66
5. Veszélyeztetettség 72
5.1. A karsztvíztároló fedőjének földtani értékelése a veszélyeztetett területeken 73
5.2 A modellezett veszélyeztetett területek összevetése az állapotértékelés során tapasztaltakkal 74
5.3 Javaslatok 74
6. Felhasznált irodalom 76

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A lokális modellek területei a regionális modellen belül 8
2. ábra: A lokális modell területe topográfiai térképen 11
3. ábra: Fedett földtani térkép a lokális modell területén (Magyarország fedett földtani térképe 1:100 000 Magyar Állami Földtani Intézet 2005 [11]) 14
4. ábra: Bodajk lokális modellterület domborzatának 3D ábrája 16
5. ábra: Bodajk lokális modellterület szerkesztett prealbai felszínének 3D ábrája 17
6. ábra: A bodajki Tó-forrás és Nádastavi-forráscsoport vízhozam idősora (1950-2019) 18
7. ábra: A bodajki numerikus modellterület É-D-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás) [mBf] 22
8. ábra: A bodajki numerikus modellterület Ny-K-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás) [mBf] 22
9. ábra: Példa a főkarszt kibúvás geometriai leképezésére egy numerikus modellben (5x túlmagasítás) (forrás: *Smaragd GSH 2020 [3]*) 23
10. ábra: Az 1. numerikus modellfelszín [mBf] 23
11. ábra: Az 1. numerikus modellréteg vastagsága 24
12. ábra: A 2. numerikus modellfelszín [mBf] 24
13. ábra: A 2. numerikus modellréteg vastagsága 25
14. ábra: A 3. numerikusmodellfelszín [mBf] 25
15. ábra: A 3. numerikus modellréteg vastagsága 26
16. ábra: Az 5. numerikus modellfelszín [mBf] 26
17. ábra: A FEFLOW szoftverben alkalmazható elemek 27
18. ábra: Pont elemek 28
19. ábra: Egyszerűsített folyóhálózat 28
20. ábra: Egyszerűsített vetőhálózat 29
21. ábra: A numerikus modell rácshálójának Bodajk lokális modellterületre eső részlete 29
22. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 32
23. ábra: A 2. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 33
24. ábra: A 3. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 34
25. ábra: A 4. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 35
26. ábra: Az 5. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 36
27. ábra: A 6. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 37
28. ábra: A 7. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 38
29. ábra: A 8. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás 39
30. ábra: A szivárgási tényező eloszlás É-D-i irányú szelvényen (2,5x túlmagasítás) 41
31. ábra: A szivárgási tényező eloszlás Ny-K-i irányú szelvényen (2,5x túlmagasítás) 41
32. ábra: K-tényező változása azonos rétegekben, Ny-K-i irányú szelvényen kinagyítva (2,5x túlmagasítás) 42
33. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 43
34. ábra: A 2. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 44
35. ábra: A 3. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 44
36. ábra: A 4. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 45
37. ábra: Az 5. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 45
38. ábra: A 6. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás 46
39. ábra: A 2018-as év végére számolt beszivárgás a numerikus modellben 47
40. ábra: A különböző évekre számított beszivárgás értékek kapcsolása a tranziens modellben 48
41. ábra: A numerikus modellbe beépített vetők szivárgási tényező értékei az 5. rétegben 49
42. ábra: A numerikus modellben a források összekötése az 5. rétegig 1D elemmel Sötét szürkével az 5. réteg látható 50
43. ábra: A numerikus modellben szereplő 1.tipusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel 51

44. ábra: A numerikus modellben szereplő 3. típusú (Transfer)-Cauchy peremfeltétel 52
45. ábra: A főkarsztot (5. réteg) megcsapoló termelőkutak a numerikus modellben 53
46. ábra: A főkarsztot (6. réteg) megcsapoló termelőkutak a numerikus modellben 53
47. ábra: A vízkivételek modellbeli leképezése bodajki vízmű példáján 54
48. ábra: A tranziens modell kezdeti (2000.01.01) vízszinteloszlása az 5. rétegben 55
49. ábra: A lokális modellterületen található monitoring kutak elhelyezkedése és a modellezett-mért vízszintek eltérése 2019. január 1-i állapotra 56
50. ábra: A numerikus modell számított vízszinteloszlása 2019. január 01-i állapotra (mBf) 56
51. ábra: A bodajki Tó-forrás mért és számított vízhozam idősora 59
52. ábra: A Nádastavi-forráscsoport mért és számított vízhozam idősora 60
53. ábra: A Csókakő-1 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett vízszint idősora (pesszimista 2. verzió) 62
54. ábra: A Bodajk HgI-43 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett vízszint idősora (pesszimista 2. verzió) 63
55. ábra: A Csákberény-86/a monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett vízszint idősora (pesszimista 2. verzió) 64
56. ábra: Az Magyaralmás HgI-45 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett vízszint idősora (pesszimista 2. verzió) 65
57. ábra: A bakonynánai meteorológiai állomás adatai alapján, HELP szoftverrel számított 10 éves átlagos beszivárgás mennyiségek (mm/év) 67
58. ábra: Mért és kétféle modellszcenárióval (pesszimista 1/2.) modellezett karsztvízszintek Csákberény-86/a kút példáján 68
59. ábra: A pesszimista szcenárió esetén figyelembe vett éves csapadékmennyiség és a beszivárgásmennyisége a bakonynánai meteorológiai állomáson mért adatok alapján 69
60. ábra: A pesszimista 2. szcenárió esetén figyelembe vett éves csapadék mennyiség és a beszivárgás mennyisége a bakonynánai meteorológiai állomáson mért adatok alapján 69
61. ábra: A lokális modellben a pesszimista 1. szcenárió alapján 2030-ra prognosztizált karsztvízszintek (5. réteg) [mBf] 70
62. ábra: A lokális modellben a pesszimista 2. szcenárió alapján 2030-ra prognosztizált karsztvízszintek (5. réteg) [mBf] 70

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat: A Bodajk lokális modell sarokpontjainak koordinátái 10
2. táblázat: A bodajki modellterület fontosabb karsztforrásainak kiindulási, mért minimum és jelenlegi hozamadatai 18
3. táblázat: A numerikus modellfelszínek szerkesztéséhez felhasznált elvi rétegbeosztás a feldolgozott fúrások alapján a különböző földtani helyzetek esetén 21
4. táblázat: Az egyes képződmények K-tényező értéke a numerikus modellben 40
5. táblázat: Az egyes képződmények vertikális elterjedése a numerikus modellben 42
6. táblázat: A szerkezeti elemek hidraulikai paraméterei 49
7. táblázat: A mért és modellezett vízszintek a megfigyelőkutakban a kalibráció időpontjában 57
8. táblázat: A regionális modellezés során használt szcenáriók 67
9. táblázat: A bodajki Tó-forrás és Nádastavi-forráscsoport 2019/2020-ban mért és 2030-ra prognosztizált forráshozam értékei 71

TÉRKÉPMELLÉKLETEK

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

DIGITÁLIS FÜGGELÉK

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

1. FELADAT MEGHATÁROZÁS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

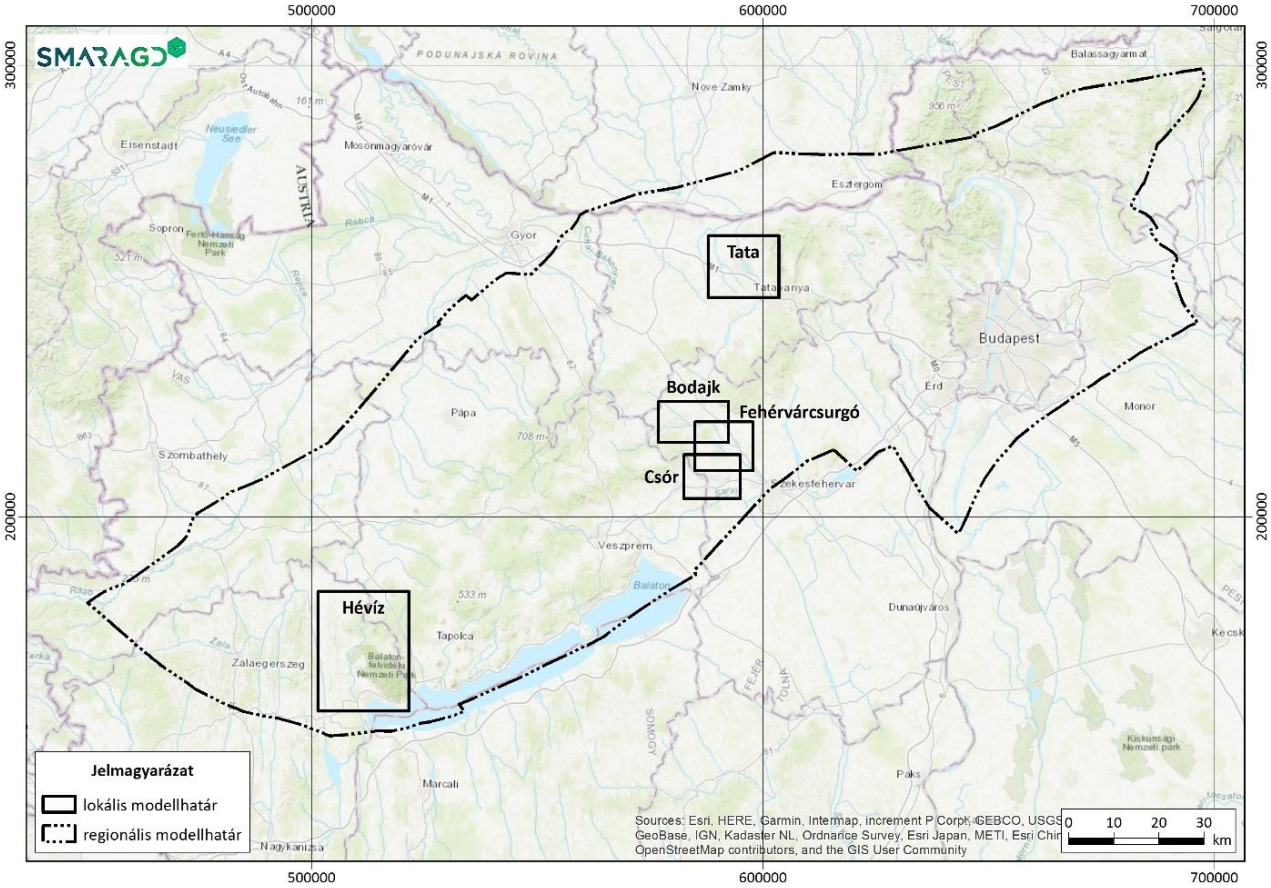
00010. Vízháztartási modellezés és állapotértékelés – III. kötet. *A karsztvíztároló állapotának összefoglaló értékelése*. Jelentés.

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

2. A LOKÁLIS MODELLTERÜLET BEMUTATÁSA

2.1 Elhelyezkedés

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

A Bodajk lokális modellterület határát a regionális modell alapján, a bodajki Tó-forrás és Nádastavi-forráscsoport környezetében határoztuk meg. A lokális modell DK-i része a k.1.1 Veszprém-Várpalota, Vértes D-i források vízgyűjtője karsztvíztestre esik, míg ÉNy-i része már a k.1.2 karsztvíztesten helyezkedik el.

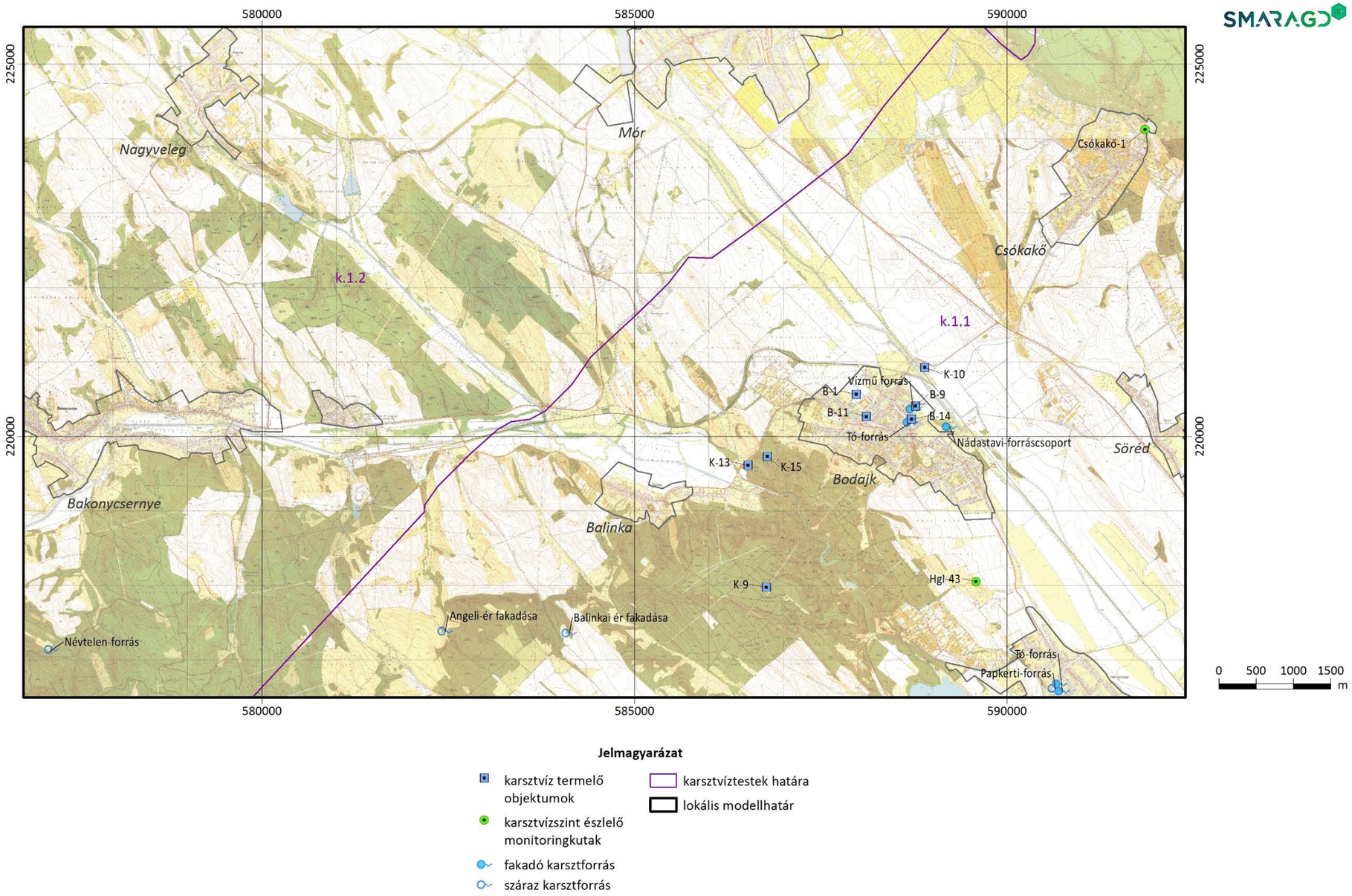
Földrajzilag a lokális modell a Keleti-Bakony peremi részén található, valamint a modellterület magába foglalja a Móri-árok északi részét is (***2. ábra***).

Határoló koordinátát az ***1. táblázat*** mutatja, területe 140,4 km^2.

1. táblázat: A Bodajk lokális modell sarokpontjainak koordinátái

EOV X_{min}	216500
EOV X_{max}	225500
EOV Y_{min}	576800
EOV Y_{max}	592400

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



2. ábra: A lokális modell területe topográfiai térképen

2.2 Hidrogeológiai viszonyok

2.2.1 Földtani felépítés

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

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

A bodajki modellterület egy ÉK-DNy-i tengelyű szinklinális DK-i oldalán helyezkedik el. A prealbai aljzat nagy részén a késő-triász Fődolomit jelenik meg. A területtől D-re a kora-triásszal kezdődő üledéksorozat is megtalálható.

A triász karni korszakának végére a korábbi szerkezeti mozgások eredményeként létrejött medencék jórészt feltöltődtek és az így kialakult sekélytengeri platformon kezdődött meg a nagy vastagságú Fődolomit képződése. A Fődolomit fölött a klíma csapadékossá válásával a Dachsteini Mészkő képződött.

Bodajktól DNy-ra a Fődolomit nagy területen a felszínen is megtalálható, ugyanakkor a Dachsteini Mészkő csak kisebb foszlányokban jelenik meg a felszínen. Bodajk és Fehérvárcsurgó közötti területen a triász képződményei nehezen különíthetők el egymástól. Ezeket a nehezen elkülöníthető középső-, késő-triász karbonátos képződményeket a Vértesi Formációcsoportba szokás sorolni.

A modellterület Ny-i fele (nagyjából a Mór-Balinka-Bakonycsernye-Nagyveleg határolta területen) a triásznál fiatalabb jura és kora-kréta képződményekkel fedett.

A Dunántúli-középhegységi egység területén az ausztriai tektonikai fázis hatására ÉK-DNy irányú tengelyű szinkliníris 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 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 ÉNy-i részének jelentős részén megtalálható.

A prealbai aljzat Bodajktól, Balinkától D-re (Fődolomit és Dachsteini Mészkő), valamint Bakonycsernyétől D-re (Tatai Mészkő, Zirci Mészkő és Polányi Márga) a felszínen jelentős területeken megtalálható. Legmélyebben (-600 mBf mélységben) a Móri-árok területén Mórtól D-re van a prealbai felszín. A késő-kréta képződményekkel fedett területeken Bakonycsernye környékén +100 mBf szintről a Móri-árok irányába fokozatosan lejt a prealbai felszín, Mórnál már a késő-kréta képződmények is -600 mBf szint mélységben vannak.

A kréta utáni szerkezeti mozgások eredményeként szárazulattá vált a Dunántúli-középhegységi egység. 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 is sok helyen 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 jelentős részén (Bakonycsernyétől D-re) a felszínen is megtalálható. A priabonai korszakban kezdődő harmadik eocén transzgresszió során a sekélytengeri karbonátos rámpákon ekkor keletkeztek a jelentős biogén anyagot (kagylók sünök, foraminiferák, bryozoák) tartalmazó Szépvölgyi Mészkő rétegei, melyeket Balinka környékéről ismerünk fúrásokban.

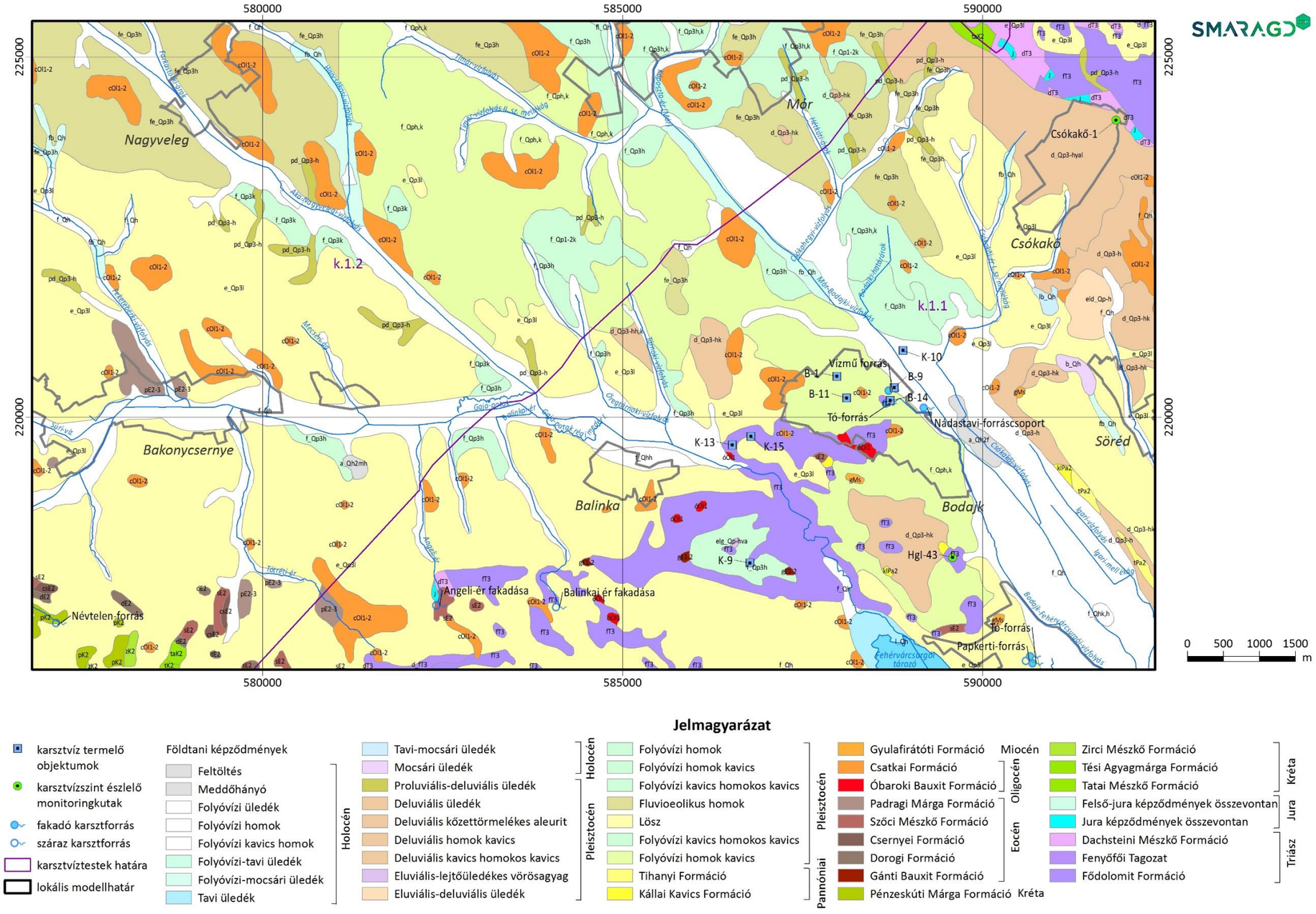
Az eocént követő infraoligocén denudáció eredményeként az eocén képződmények a teljes Dunántúli-középhegységi egység területén nagymértékben lepusztultak. Ekkor jött létre a nagy vastagságú folyóvízi törmelékes üledékösszlet (Csatkai Kavics), amely a modellterület 2/3-án megtalálható, vastagsága ÉNy-i irányban 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 m 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 Bodajk és Fehérvárcsurgó közötti területen jelenik meg.

A bádeni korszak közepén tengeröblökben kialakult parti mocsarakban jött létre a Hidasi Kőszén (Fehérvárcsurgó környékén a Padragi Márgára települve találjuk). A késő-miocén elején jött létre a Kárpátokkal körbevett Pannon-tó. A késő-miocén során a Pannon-tó fokozatosan feltöltődött, kiédesedett. 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 (Bodajktól D-re egy kisebb területen írták le). A hullámveréses parti zónában keletkeztek a Kállai Kavics, tiszta homokos rétegei. Ezt a homokot bányásszák Fehérvárcsurgó 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 modellterületen csak a DK-i részen fordulnak elő kisebb területen).

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

A közvetlen Bodajk környéki terület 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 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.



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

2.2.2 A kőzetek vízföldtani tulajdonságai

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

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

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

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

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

Prealbai képződmények (főkarsztvíztároló):

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

Függőkarsztos rétegek hidrosztratigráfiai egység:

A kréta, illetve eocén korú mészkövek, ha közvetlenül települnek, a triász korú karbonátokra szintén a főkarsztot alkotják, ha a triász karbonátoktól márga és agyag rétegek különítik el, akkor a főkarszttól független, függőkarszt alakul ki. Regionális elterjedésűek. A bodajki modell területén főként annak nyugati felén találhatók nagy kiterjedésben függőkarsztos képződmények. Azok közül is eocén és kréta rossz vízadó márgák (pl.: Padaragi Márga, Kisgyóni F.) fordulnak elő rendkívül nagy kiterjedésben, de kisebb területen jó vízadó eocén (Szépvölgyi és Szőci Mészkő) és kréta (Tatai Mészkő) karbonátok is megtalálhatók. 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 elsősorban, nagy vastagságú és kiterjedésű Csatkai

Formációt jelent, mely változatos szemcseméretű porózus képződmény, de összességében jó vízadó tulajdonságú kőzetnek tekinthető.

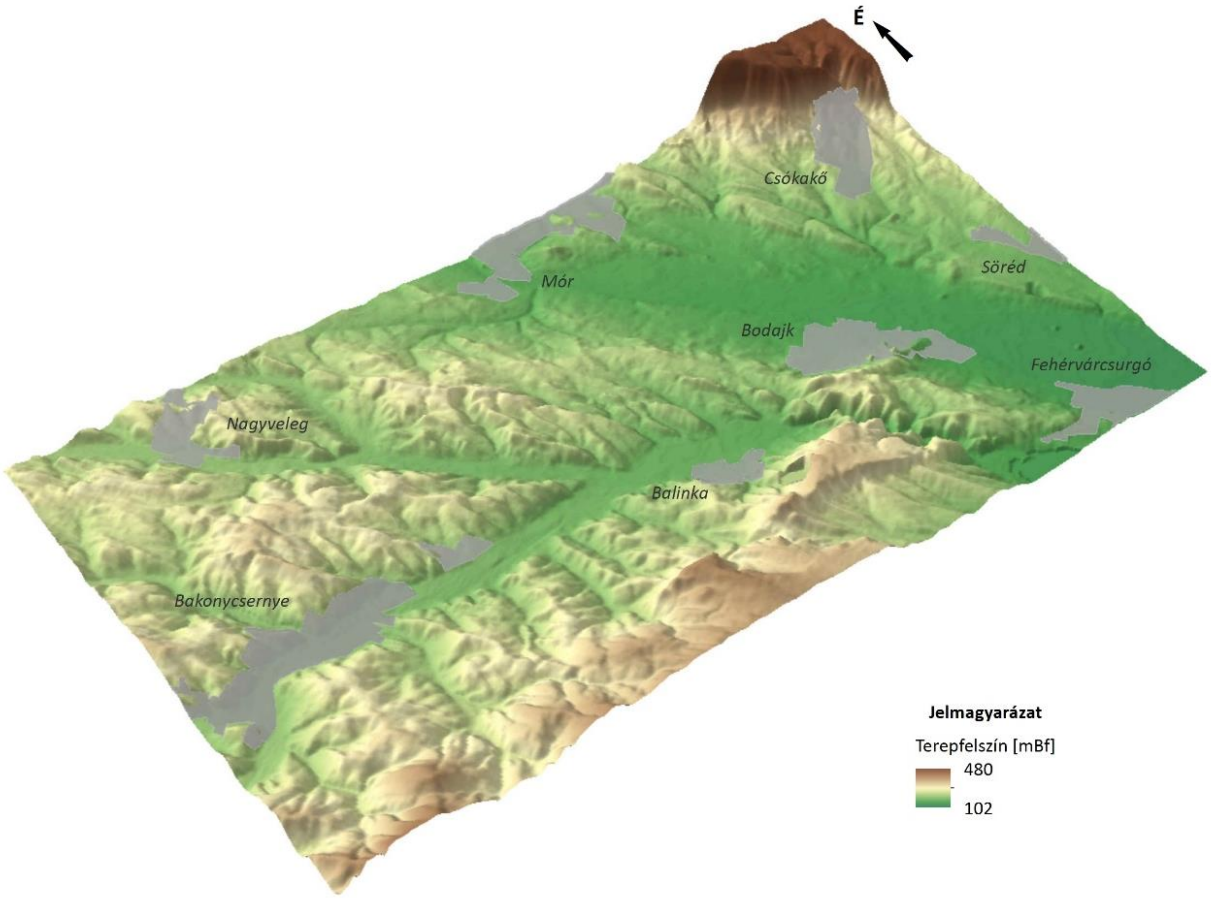
Kvarter – Felső-pannon porózus képződmények hidrosztratigráfiai egysége:

A főkarsztvíztároló fedőjének képződményei tartoznak ide. A bodajki modellterületen ez jellemzően jó vízadó tulajdonsági löszös és homokos képződmények formájában található meg. De a nyílt karsztos területek környezetében kisebb kiterjedésben rosszabb vízvezető tulajdonságú áthalmozott finomszemcsés üledék is előfordul.

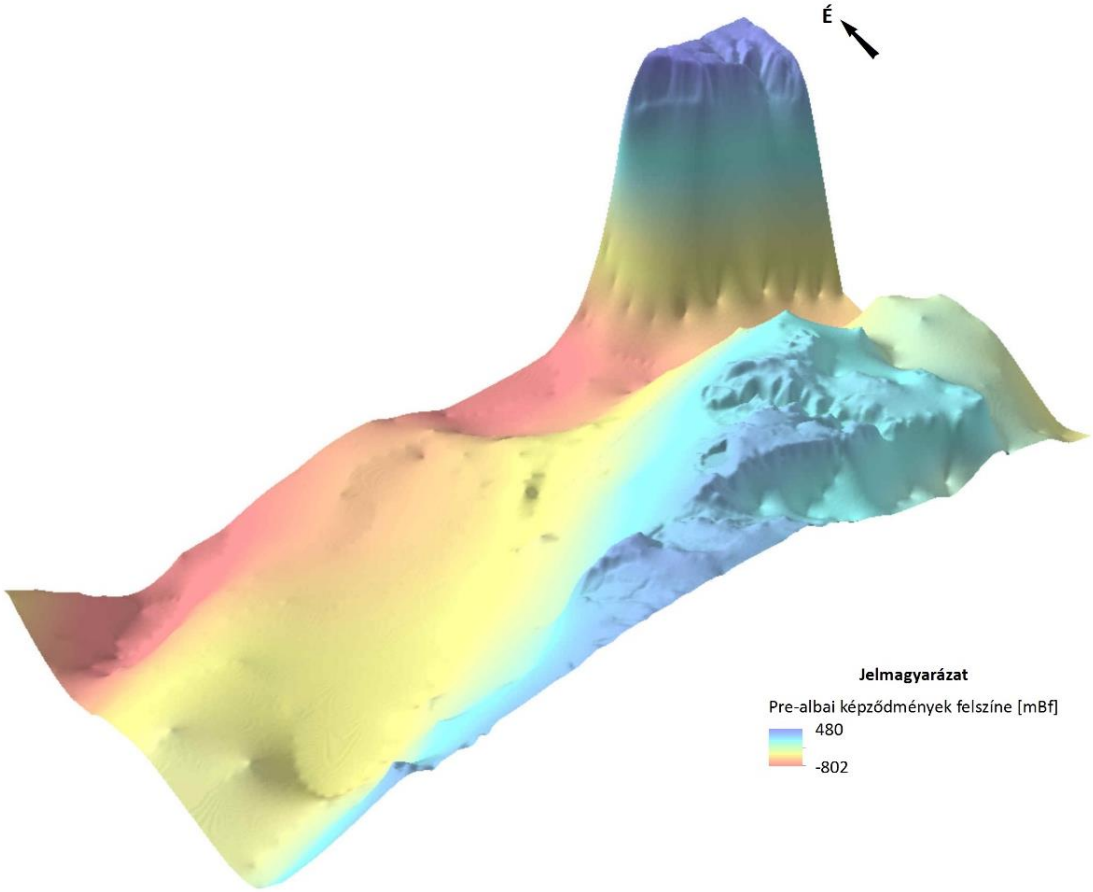
A lokális modellterületeken szükségessé vált ezen hidrosztratigráfiai egységek elterjedésének és vastagsági viszonyainak pontosítása, valamint a porózus fedőképződmények elterjedésének és kőzetminőségének sokkal részletesebb kidolgozása is. Ez a munkafolyamat a lokális modellterületeken található összes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

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

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



4. ábra: Bodajk lokális modellterület domborzatának 3D ábrája



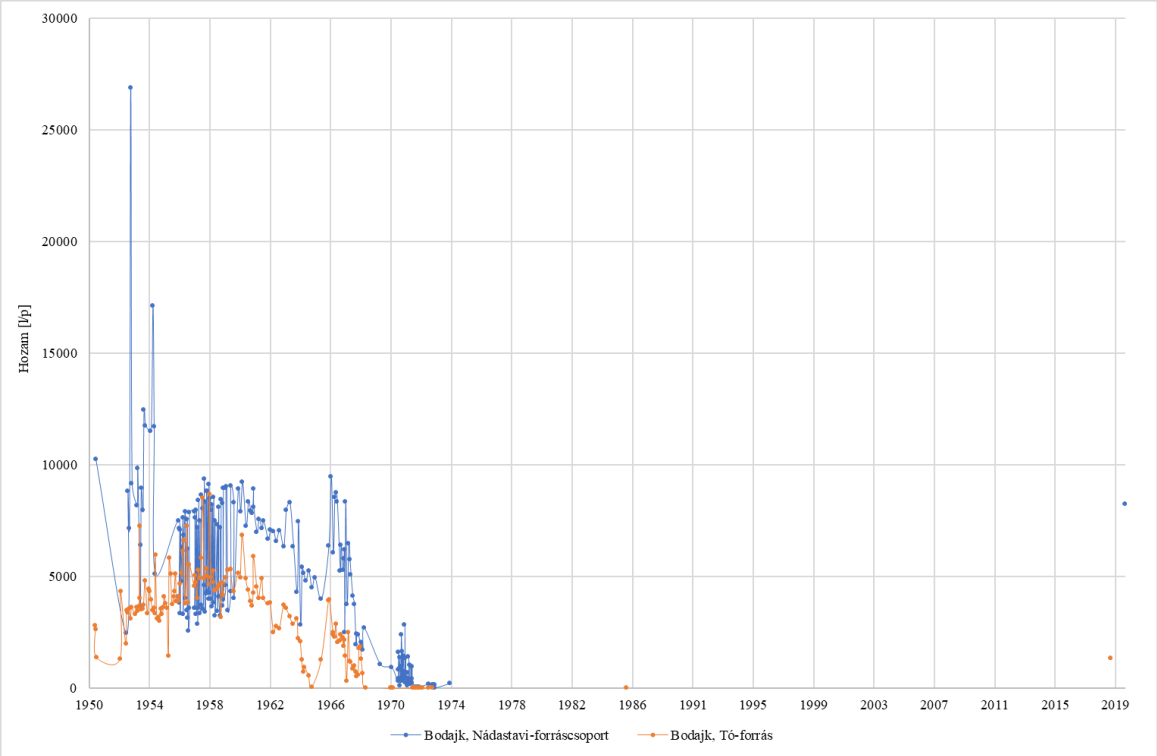
5. ábra: Bodajk lokális modellterület szerkesztett prealbai felszínének 3D ábrája

2.2.3 Természetes megcsapolódások

A modellterületen források elsősorban annak keleti részén jelennek meg a nyílt karsztos képződmények körüli területeken, ahol vékonyabb fedő a jellemző.

A területeken 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 között változott, a legnagyobb értékeket 1958-ban mérték (***6. ábra***). A forrás 2019-ben mért hozama 1333 l/p volt.

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



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

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

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

Település	Forrás	VITUKI forráskataszter szerinti vízhozam		Legkisebb hozam		2019 kataszterezés során mért hozam	
		Év	Hozam (l/p)	Év	Hozam (l/p)	Év	Hozam (l/p)
Bodajk	Nádastavi-forráscsoport	1950	10250	1975	0	2020	8260
Bodajk	Tó-forrás	1950	2790	1968	0	2019	1333
Fehérvárcsurgó	Tó-forrás	1950	600	1957	0	2019	285
	Haja-kút	1946	144	1957		2019	1.22
	Papkerti-forrás	1953	41	1957		2019	0

Nagyobb állóvizek közül fehérvárcsurgói víztározó lóg át kis területen DK-i irányból a modellhatáron. A területen É-D irányban elnyúltan, a Móri-árok vonalában helyezkednek el a Móri-halastavak, amely szintén csak kisrészben található modellhatáron belül. Ezen kívül még néhány kisebb állóvíz helyezkedik el itt: a Balinka melletti Pallos-tó, a Velegi-víztározó és tavak, valamint Bakonycsernye környékén egy víztározó és a Feketeberki-tó.

3. A LOKÁLIS NUMERIKUS MODELLEZÉS BEMUTATÁSA

3.1 A numerikus modell geometriai felépítése, numerikus rétegek

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

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

A lokális modellterületeken szükségessé vált ezen hidrosztratigráfiai egységek elterjedésének és vastagsági viszonyainak pontosítása, valamint a porózus fedőképződmények (alsó- és felső-pannon) elterjedésének és kőzetminőségének sokkal részletesebb kidolgozása is. Ez a munkafolyamat a lokális modellterületeken található összes olyan fúrás (72 db) figyelembevételével történt, amelyből a teljes rétegsor rendelkezésünkre állt, azaz elérte a prealbai képződményeket. Ez alapján el tudtuk különíteni a jobb és rosszabb vízvezető fedőképződménnyel fedett területeket. A függőkarsztos rétegcsoporton belül pontosabban le tudtuk határolni azokat a területeket, ahol az eocén/kréta márgák fordulnak elő, illetve azokat a területeket, ahol eocén/kréta karbonátos képződmények találhatóak. A fúrások alapján az egyes képződménycsoportok megjelenési mélységét is pontosítani tudtuk, mely alapján az azokat elválasztó vezérszintek (felszínek) is korrigálásra kerültek a regionális modellhez képest.

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

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

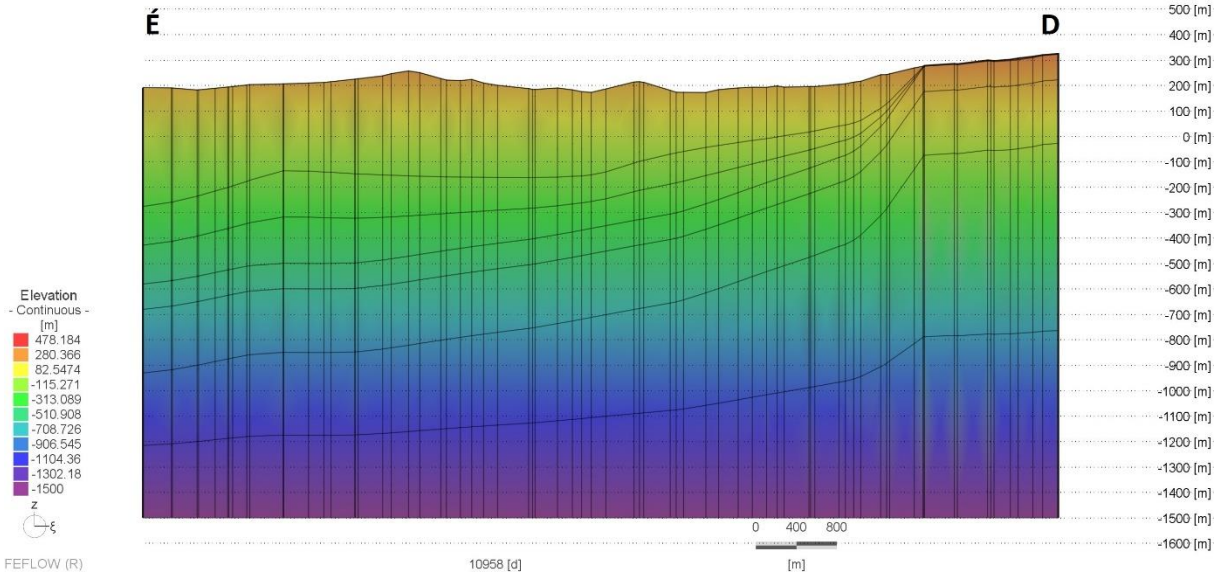
A fúrásokból kinyert információ alapján az egyes rétegek felszínét az ArcGIS Desktop 10.5.1 térinformatikai szoftvercsaládd szerkesztettük. A numerikus modellben a terepszint képezi a felső felületet. A modellben felszíni domborzat az OVF 10 méteres digitális domborzat modellje alapján készült. A szerkesztett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

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

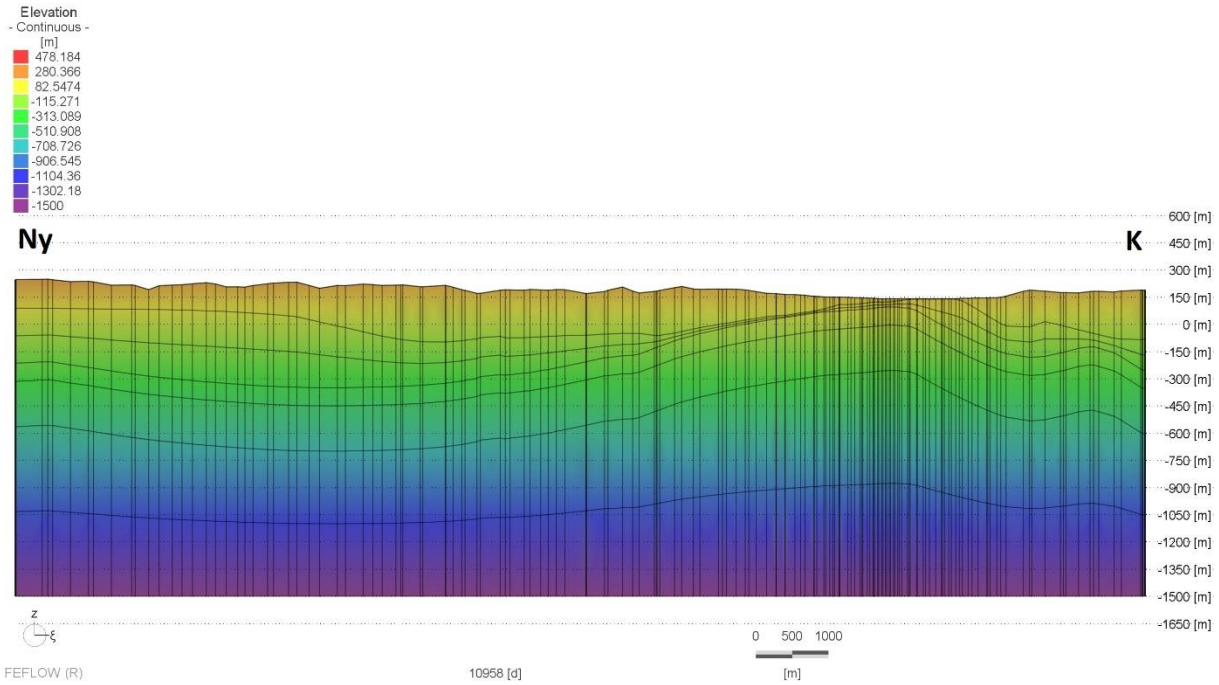
- 1. réteg: Kvarter és felső-pannon képződmények
- 2. réteg: Alsó-pannon – miocén – oligocén képződmények
- 3. réteg: Függőkarsztos rétegcsoport – mészkő
- 4. réteg: Függőkarsztos rétegcsoport – vízrekesztő képződmények
- 5. réteg: Főkarszt felső 100 m-es vastagságú része
- 6. réteg: Főkarszt 250 m vastagságú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

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

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

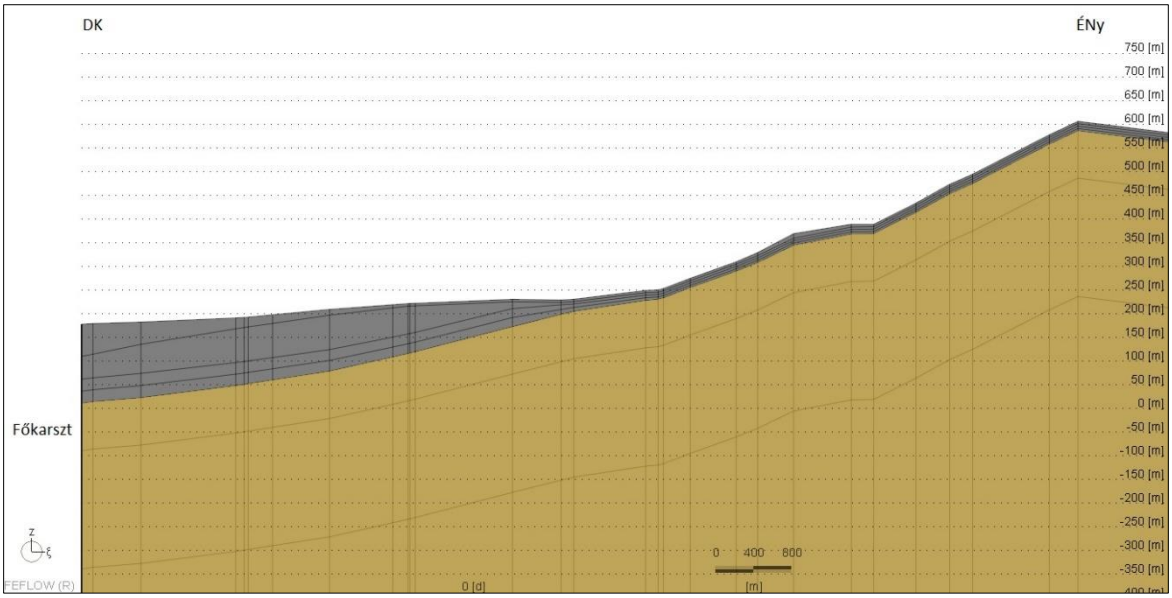


7. ábra: A bodajki numerikus modellterület É-D-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás) [mBf]



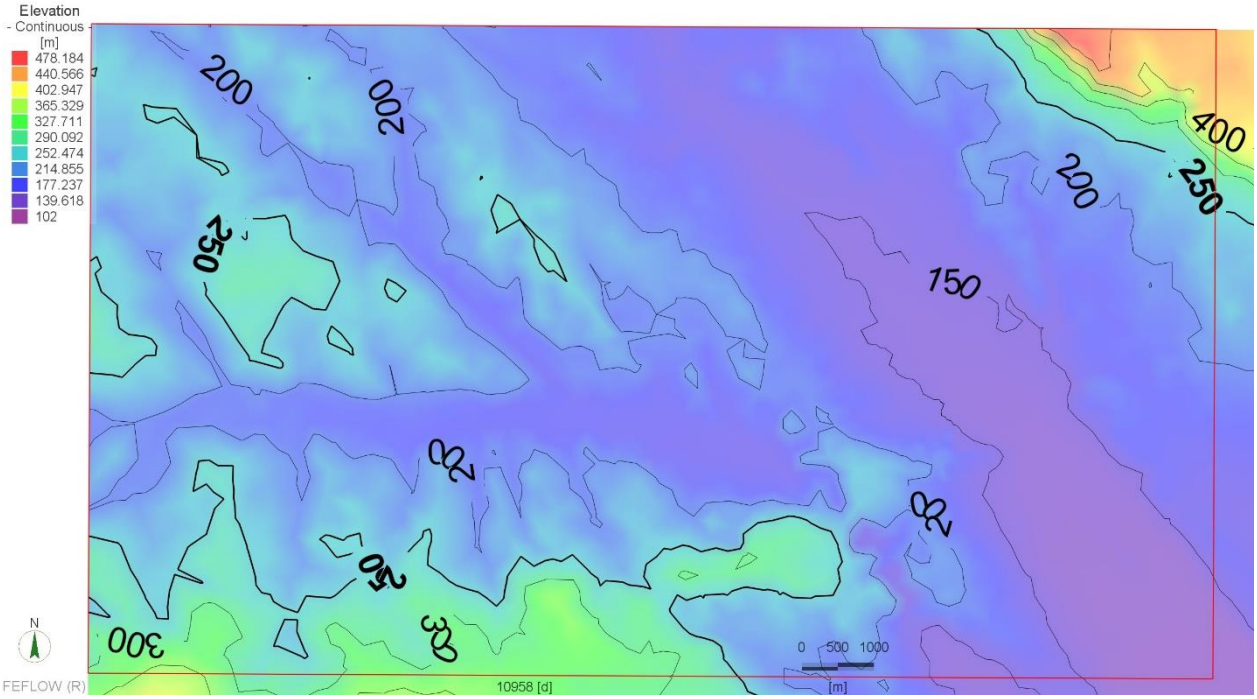
8. ábra: A bodajki numerikus modellterület Ny-K-i irányú szelvénye (2,5x túlmagasítás) [mBf]

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

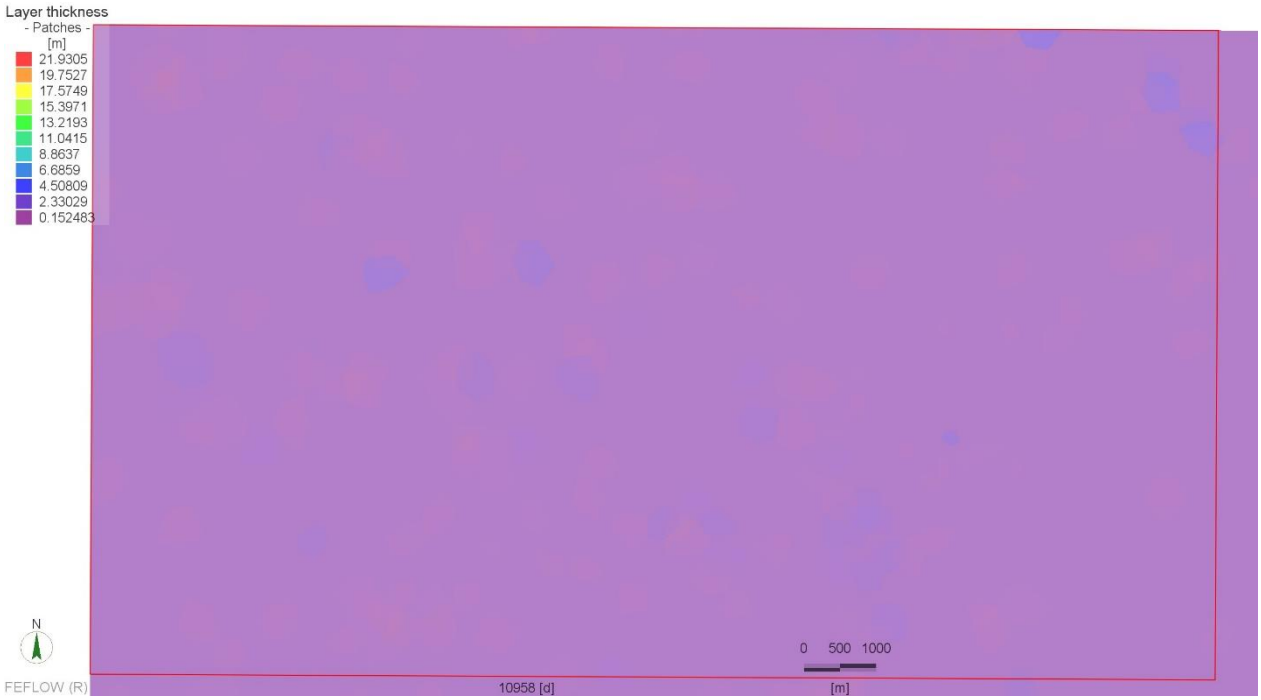


9. ábra: Példa a főkarszt kibúvás geometriai leképezésére egy numerikus modellben (5x túlmagasítás) (forrás: *Smaragd GSH 2020 [3]*)

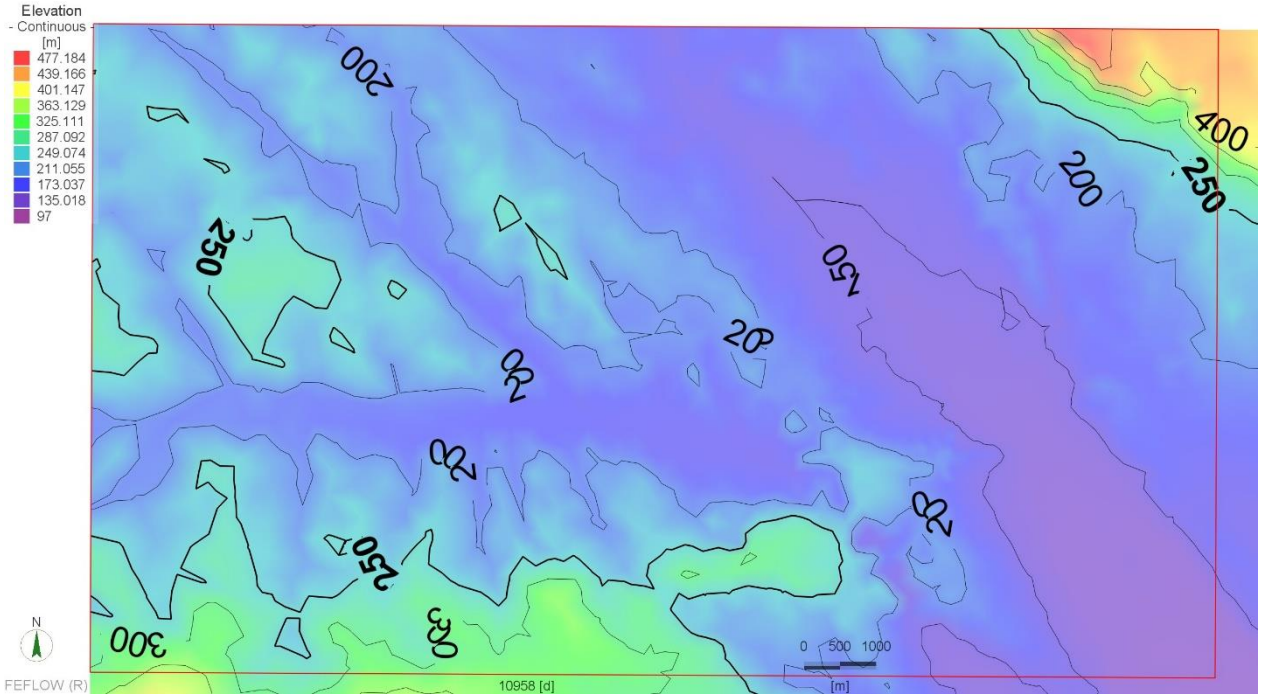
A ***10-16. ábra*** sorozat mutatja be a numerikus rétegek egyes felszíneit Bodajk lokális modell területén.



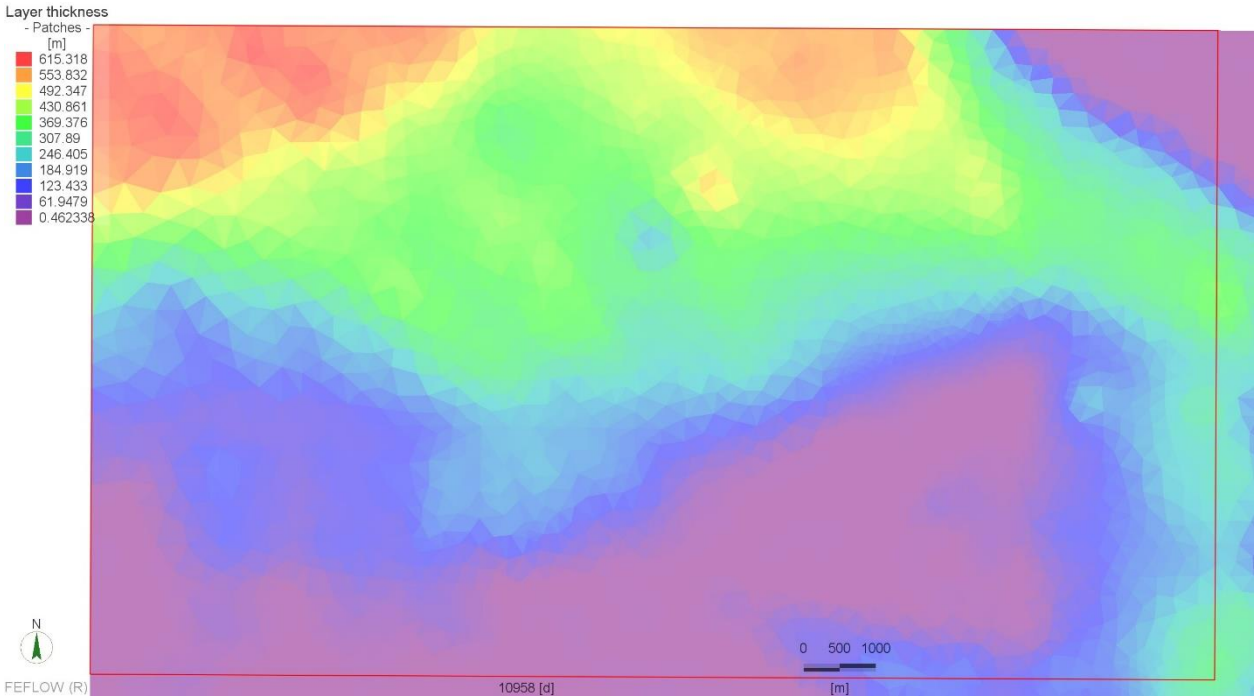
10. ábra: Az 1. numerikus modellfelszín [mBf]



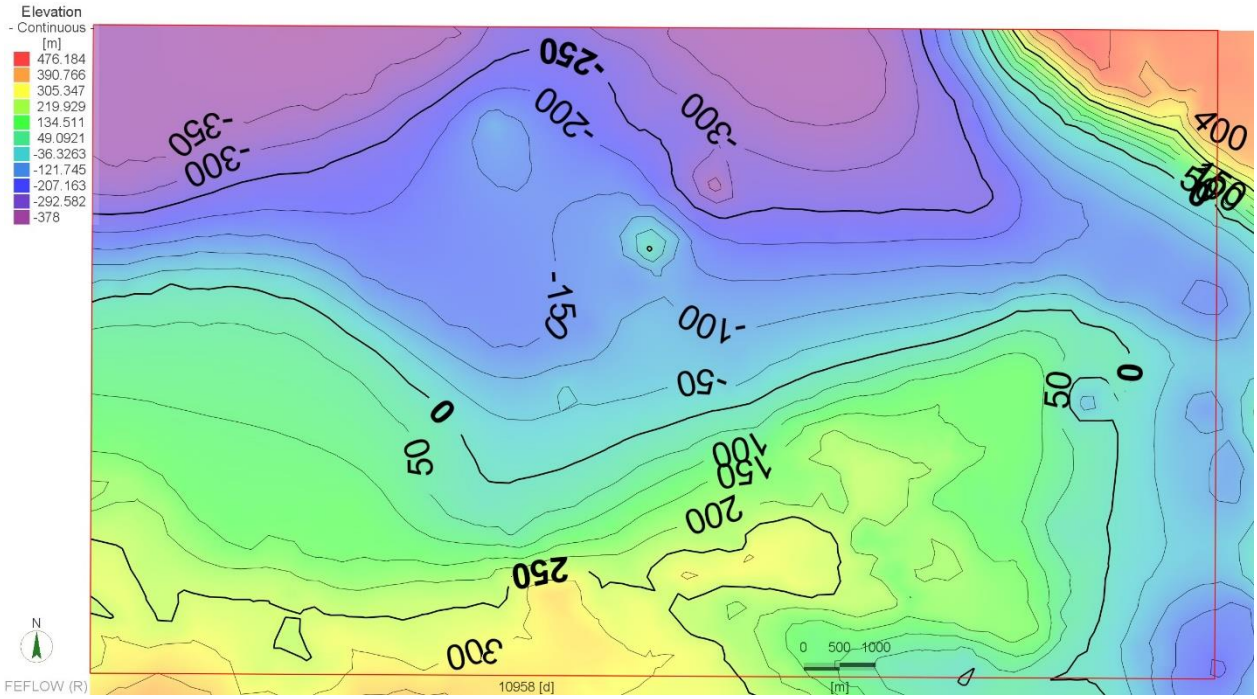
11. ábra: Az 1. numerikus modellréteg vastagsága



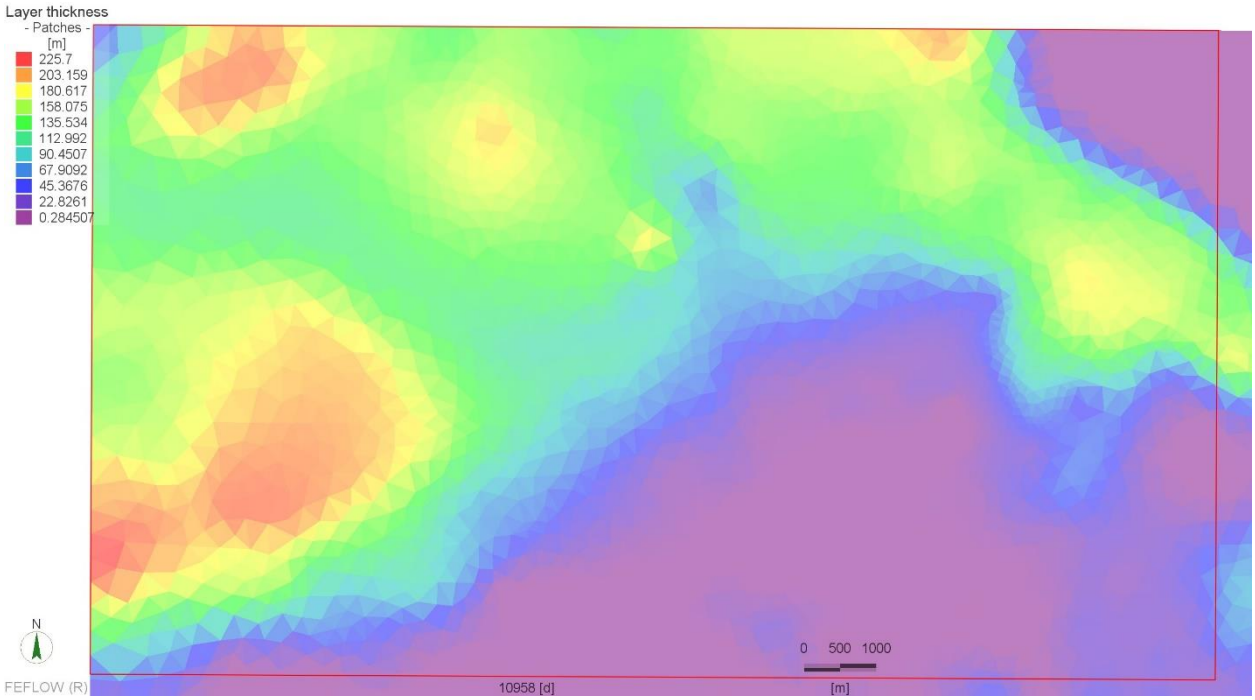
12. ábra: A 2. numerikus modellfelszín [mBf]



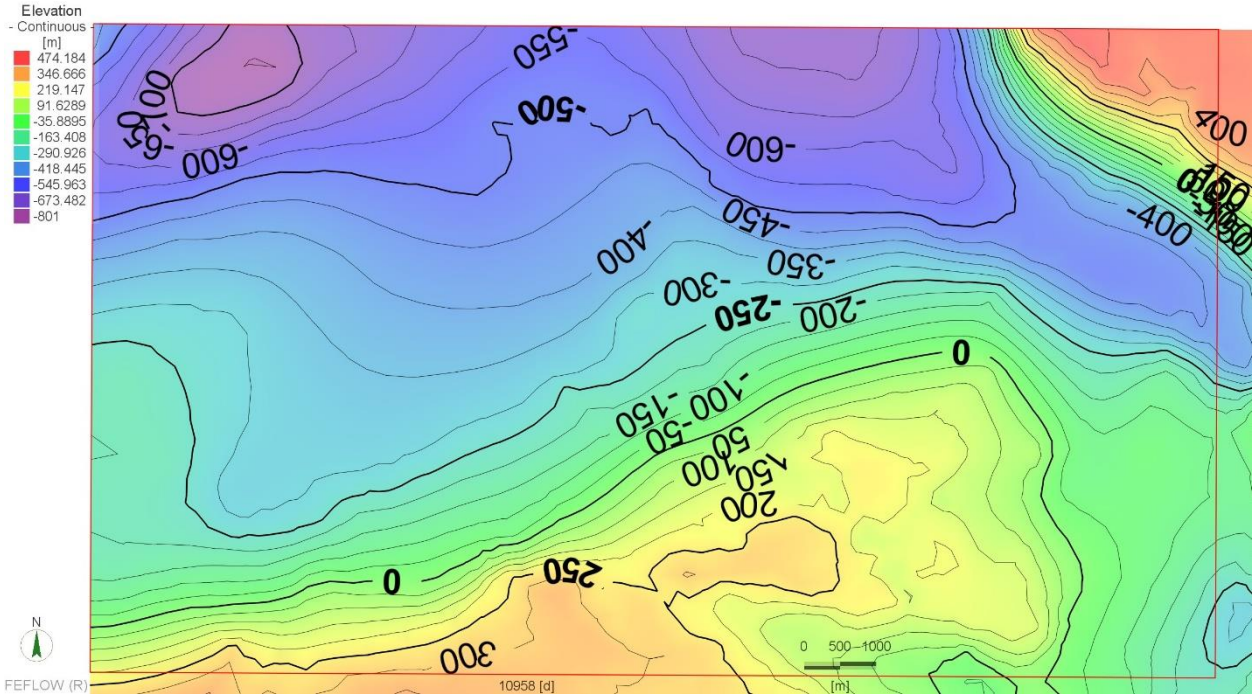
13. ábra: A 2. numerikus modellréteg vastagsága



14. ábra: A 3. numerikusmodellfelszín [mBf]



15. ábra: A 3. numerikus modellréteg vastagsága



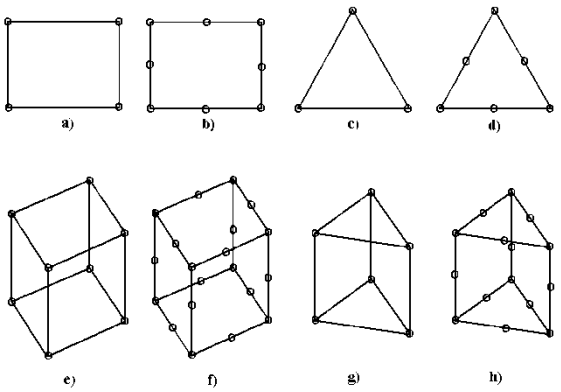
16. ábra: Az 5. numerikus modellfelszín [mBf]

3.2 A numerikus modell rácshálójának kialakítása

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

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

A végeselem módszer lényege, hogy a modellezni kívánt teret tetszőleges számú és alakú elemre bontjuk (***17. ábra***). Az elemek egymással csomópontjaikon keresztül kapcsolódnak, illetve a csomópontok koordinátái határozzák meg térbeli helyüket. Az elemek lehetnek egy-, két- és háromdimenziósak, ezáltal az elemháló rugalmasan alakítható és fontos számítási helyeken (pl.: kutak, források, vetők) tetszőlegesen sűríthetők, így biztosítva a változatos geológiai felépítésű terek modellezését.



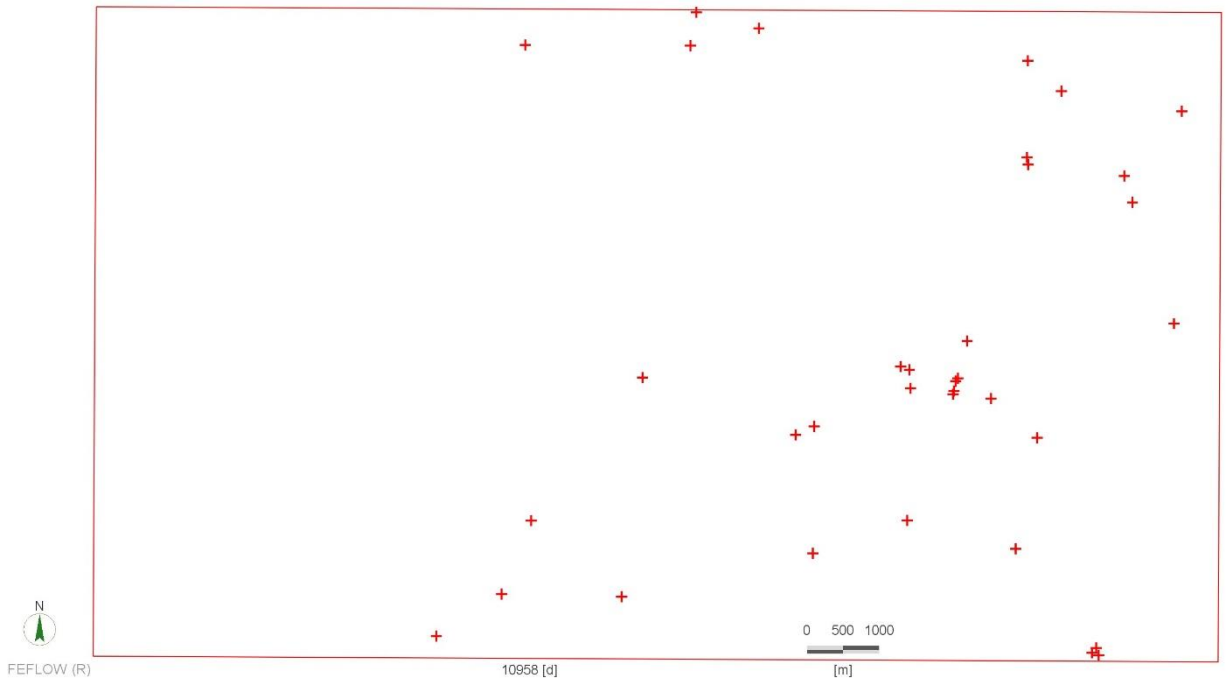
2D modul:
a) 4-csomópontos
b) 8-csomópontos négyoldalú elemek
c) 3-csomópontos
d) 6-csomópontos háromoldalú elemek
3D modul:
e) 8-csomópontos
f) 20-csomópontos négyoldalú prizmák
g) 6-csomópontos
h) 15-csomópontos háromoldalú prizmák

17. ábra: A FEFLOW szoftverben alkalmazható elemek

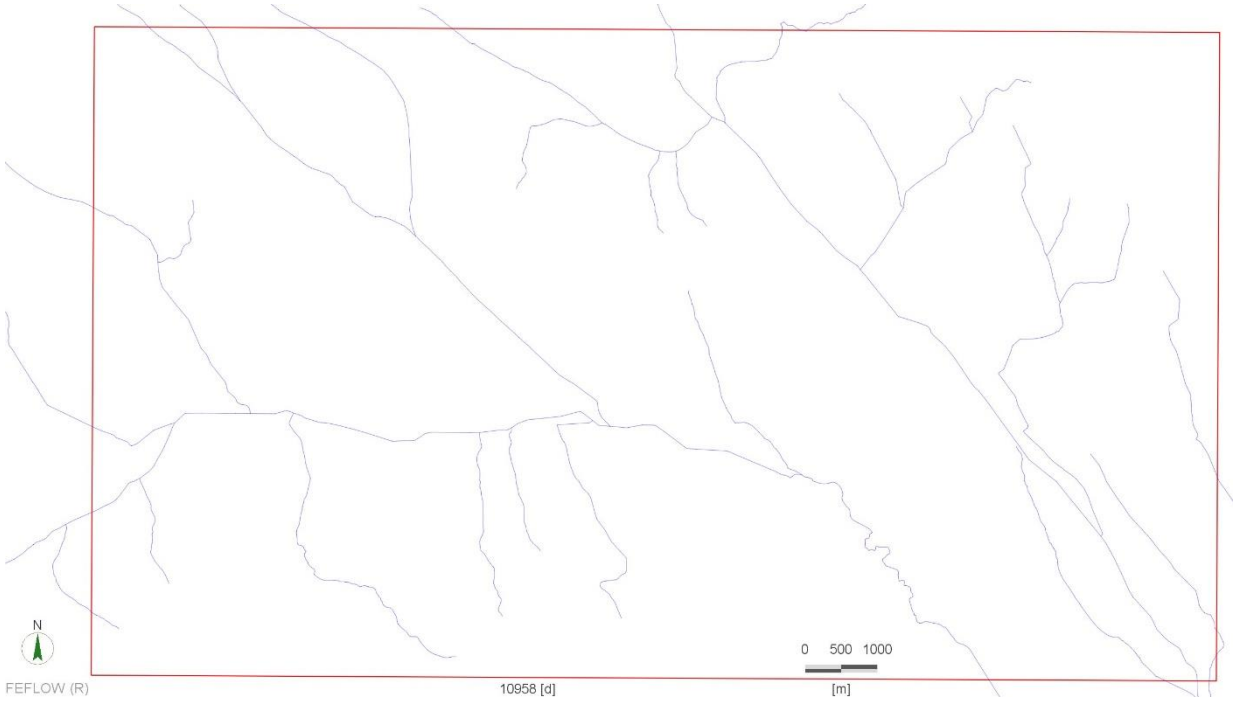
A hálókiosztás során a modellezett térrészt háromszög alapú prizmákkal definiáltuk (6-csomópontos háromoldalú lineáris prizmák). A rácsháló kialakításánál a következő elemekhez rendeltünk csomópontot:

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

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

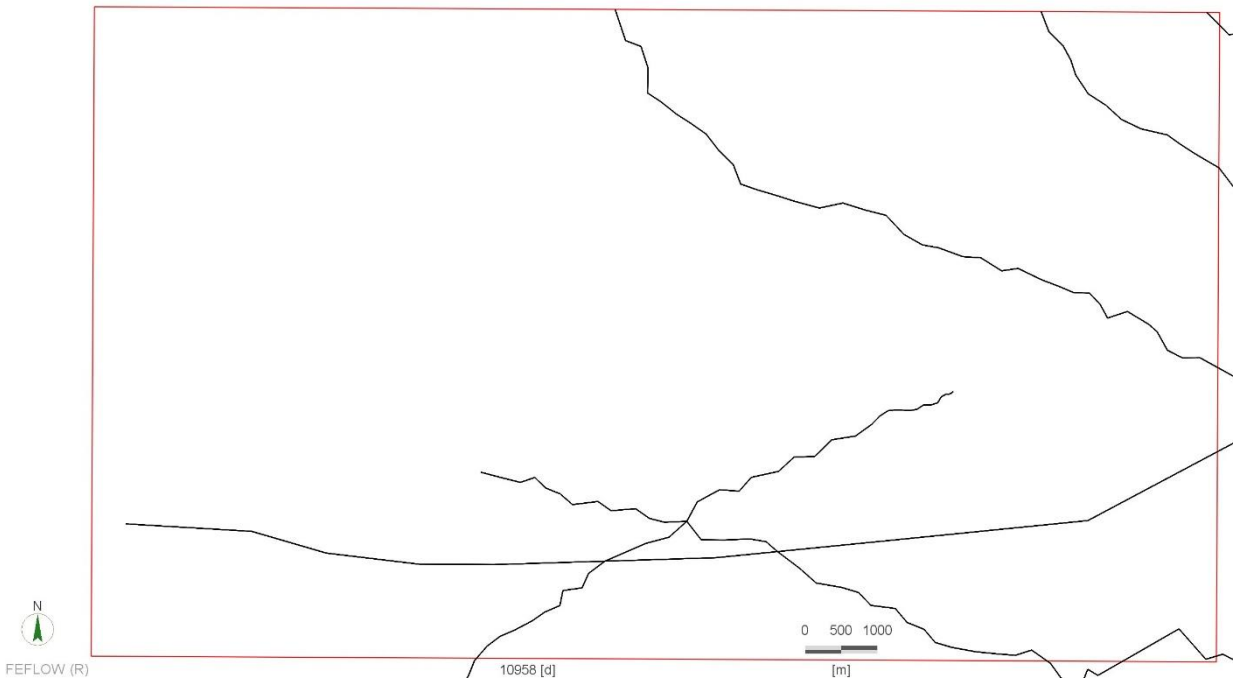


18. ábra: Pont elemek



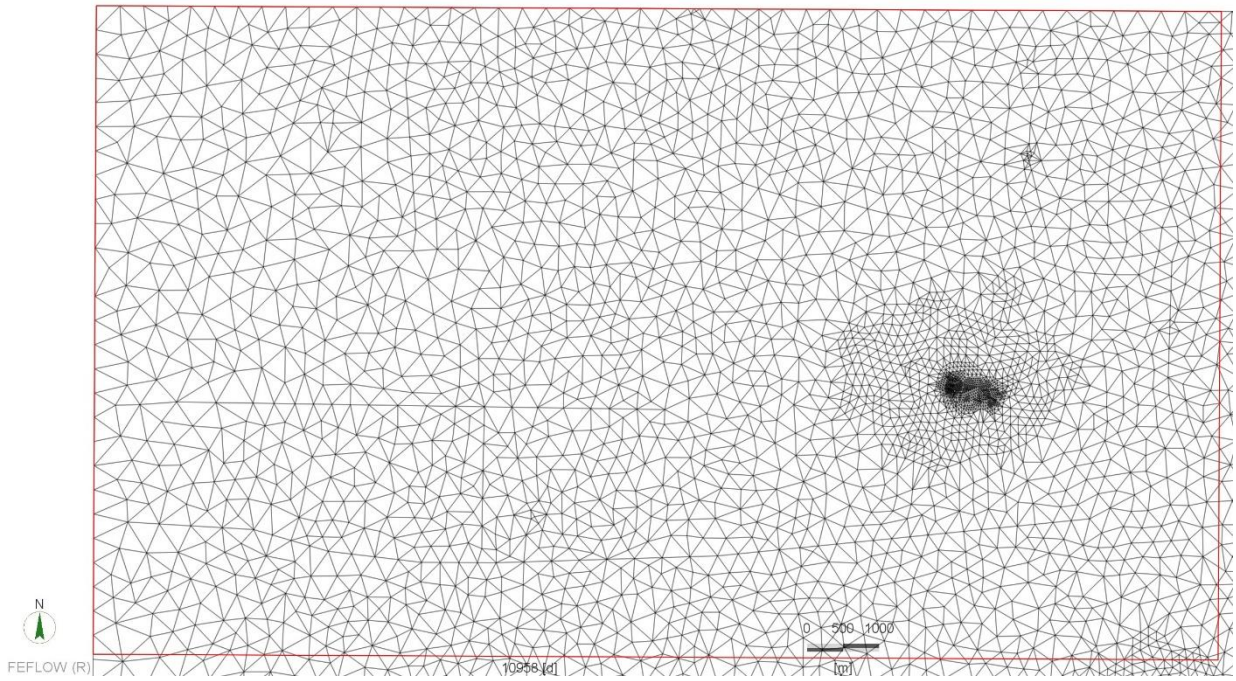
19. ábra: Egyszerűsített folyóhálózat

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



20. ábra: Egyszerűsített vetőhálózat

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



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

3.3 A numerikus modell hidraulikai paraméterezése

3.3.1 Szivárgási tényező értékek a numerikus modellben

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

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

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

ahol h: a hidraulikus emelkedési magasság [m]

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

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

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

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

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

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

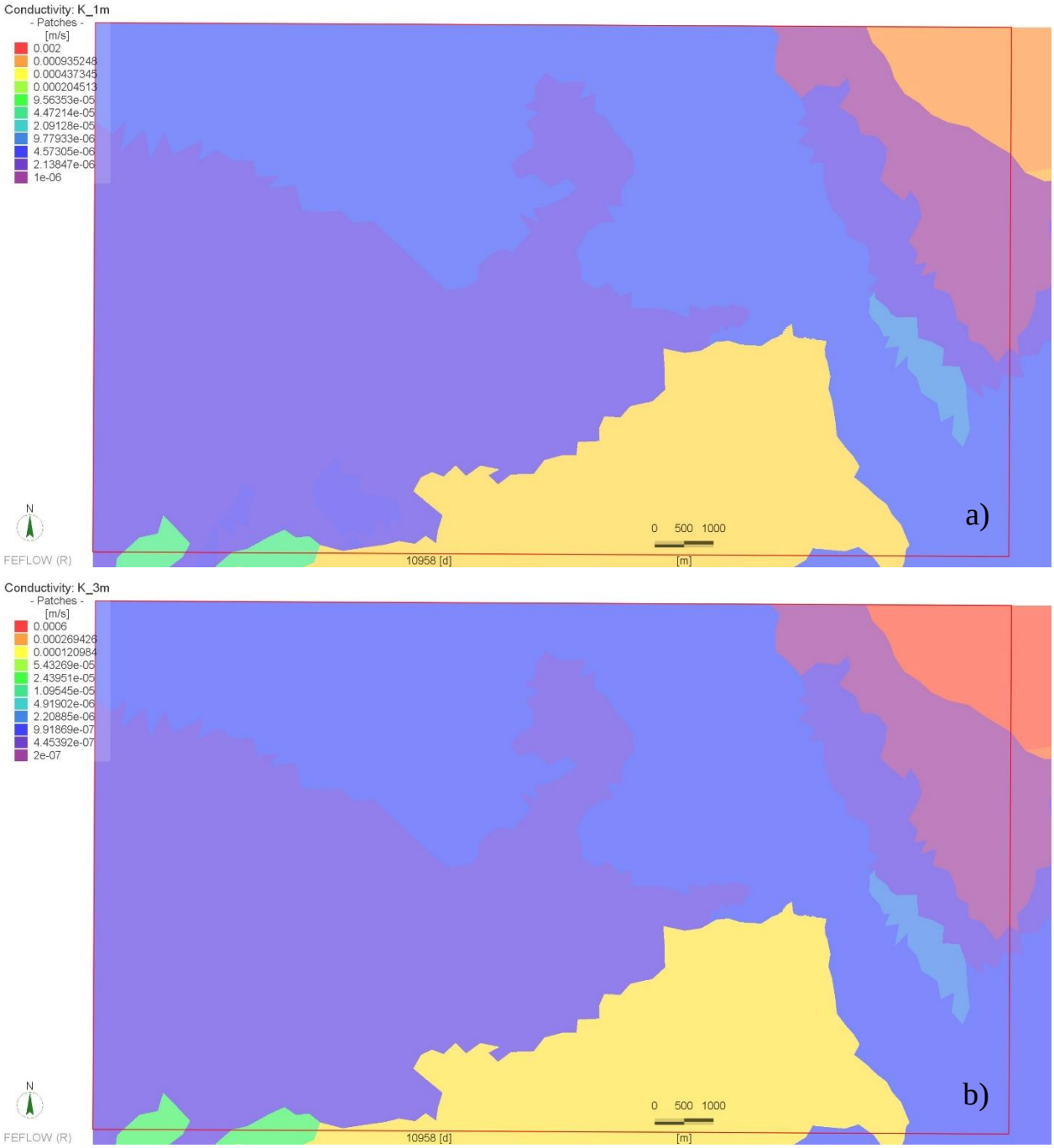
A numerikus rétegekben, a kalibrálás után elfogadott K-tényező eloszlást a ***22-29. ábrák*** mutatják, a különböző hidrosztratigráfiai egységek, illetve kőzettestek szivárgási tényező értékeit a ***4. táblázat*** szemlélteti. A lokális modellek elkészítése során egyre nagyobb szerepet kaptak a kisebb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

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

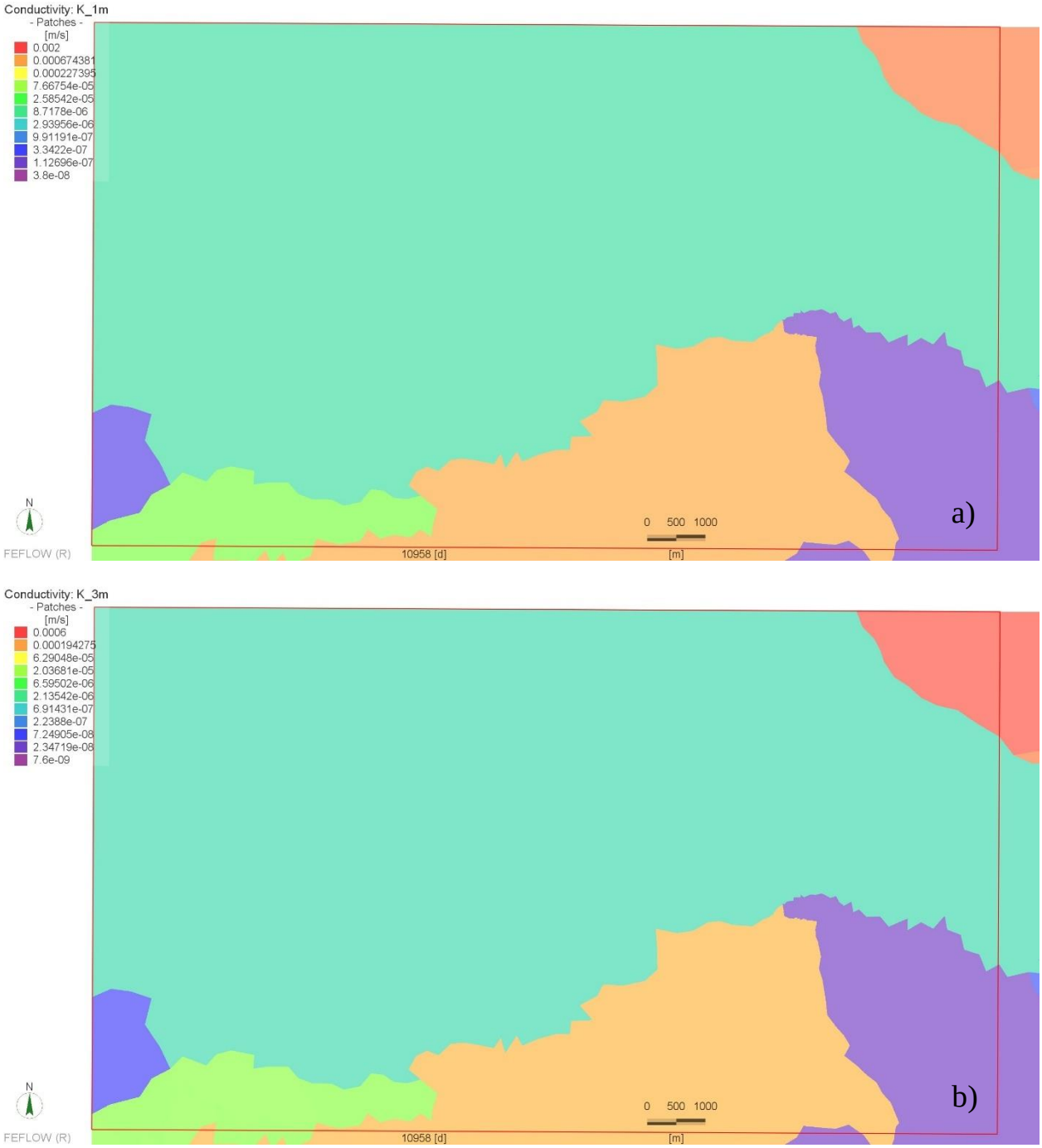
A modellben a konduktivitási mező rétegenként inhomogén és anizotróp. Ez azt jelenti, hogy a vertikális szivárgási tényező meghatározásánál, minden képződménynél feltételeztünk anizotrópiát, ez képződményenként eltérő mértékű. A horizontális szivárgási tényezőknél csak a karsztban definiáltunk anizotrópiát,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

A Bodajk lokális modellterületen két nyílt karsztos területrészt tudunk elkülöníteni. A modellterület D-i részén található nyílt karsztos rész a Tési-fennsíkhoz kapcsolódik, míg az É-i 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, mely földtanilag is elválasztja azokat. 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.

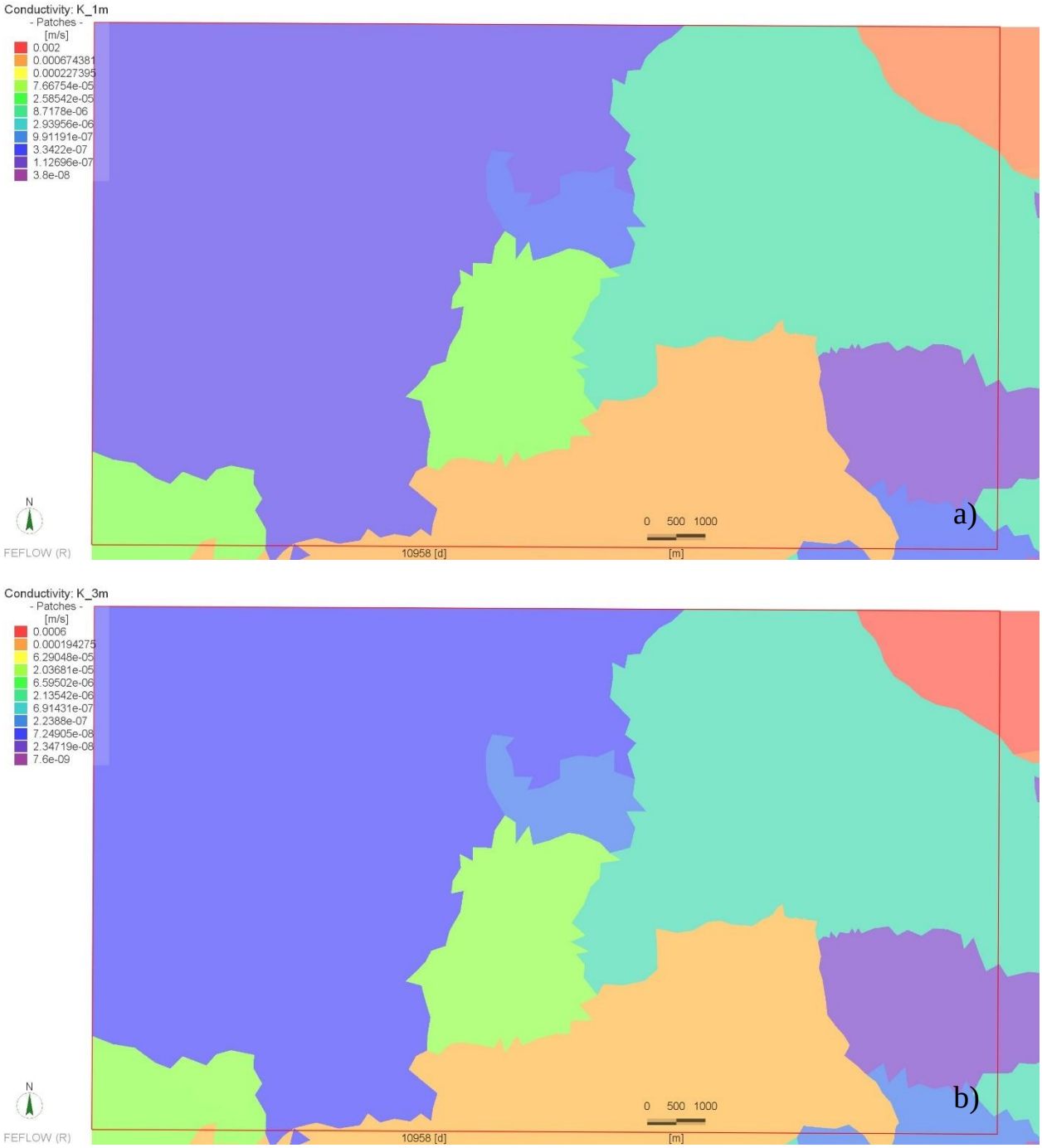
Az 1. réteg fiatal porózus képződményei alatt a 2-4. rétegekben nagy kiterjedésben jelenik meg a jó vízadó képességgel jellemezhető Csatkai Formáció ($K_x=5{,}8\cdot10^{-6}$ m/s), melynek kiterjedése a mélységgel csökken a modellterület nyugati felén megjelenő eocén és kréta függőkarsztos képződmények mellett. A függőkarsztos képződmények közül nagyobb kiterjedésben jelennek meg az alacsony szivárgási tényezővel bíró márgák ($K_x=2\cdot10^{-7}$ m/s), de kisebb területen jó vízadó mészkő ($K_x=5\cdot10^{-5}$ m/s) is előfordul.



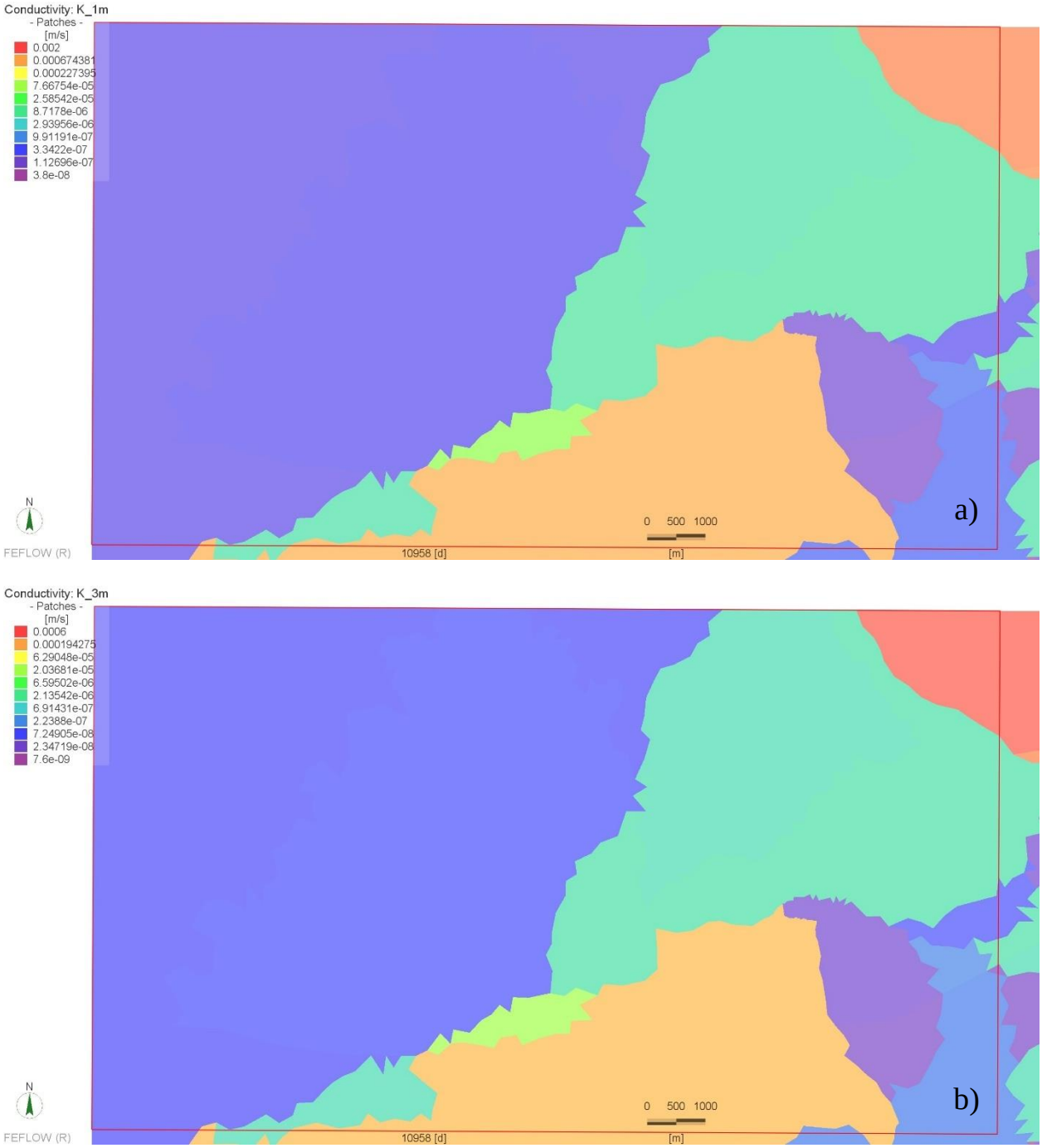
22. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



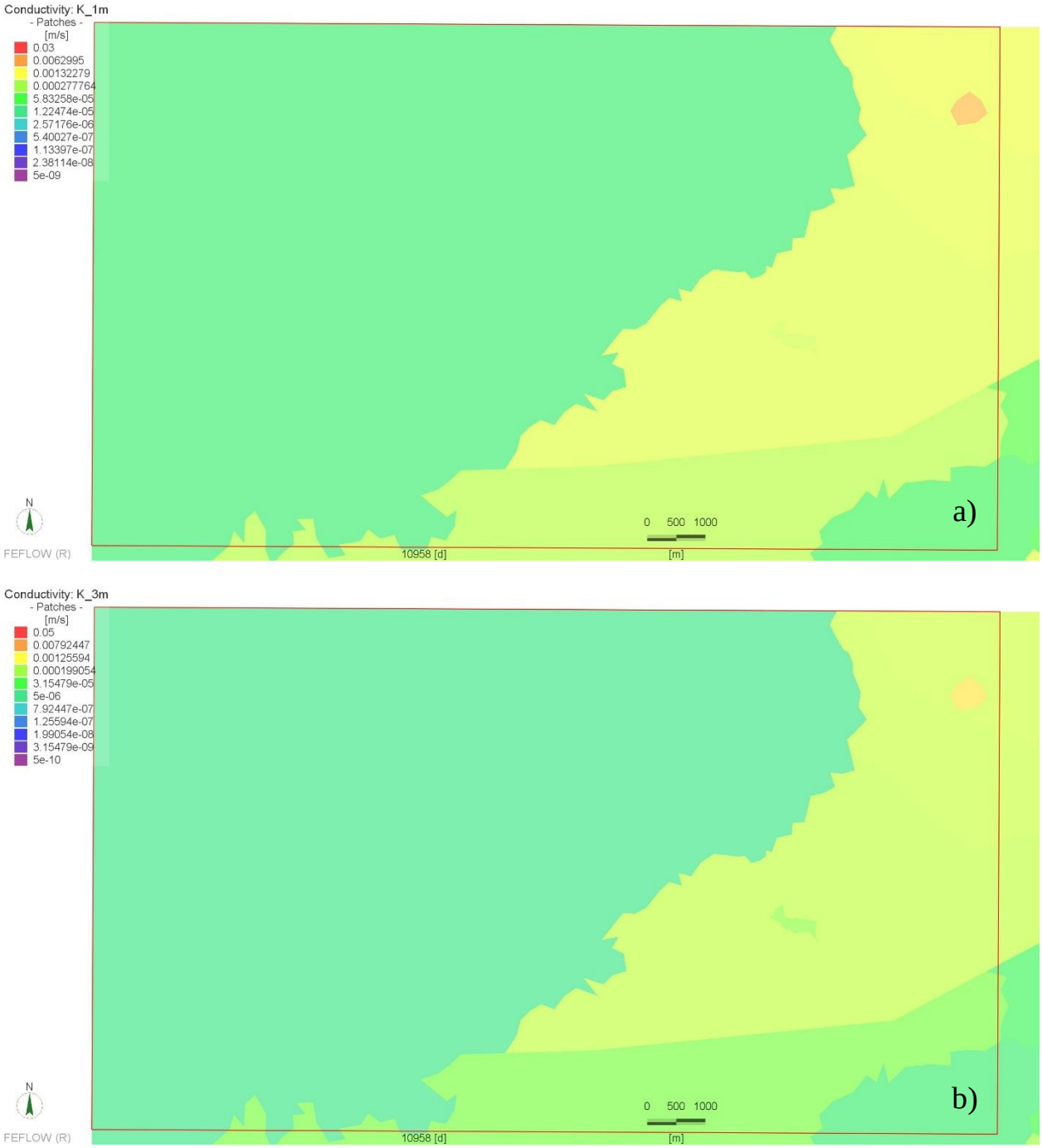
23. ábra: A 2. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



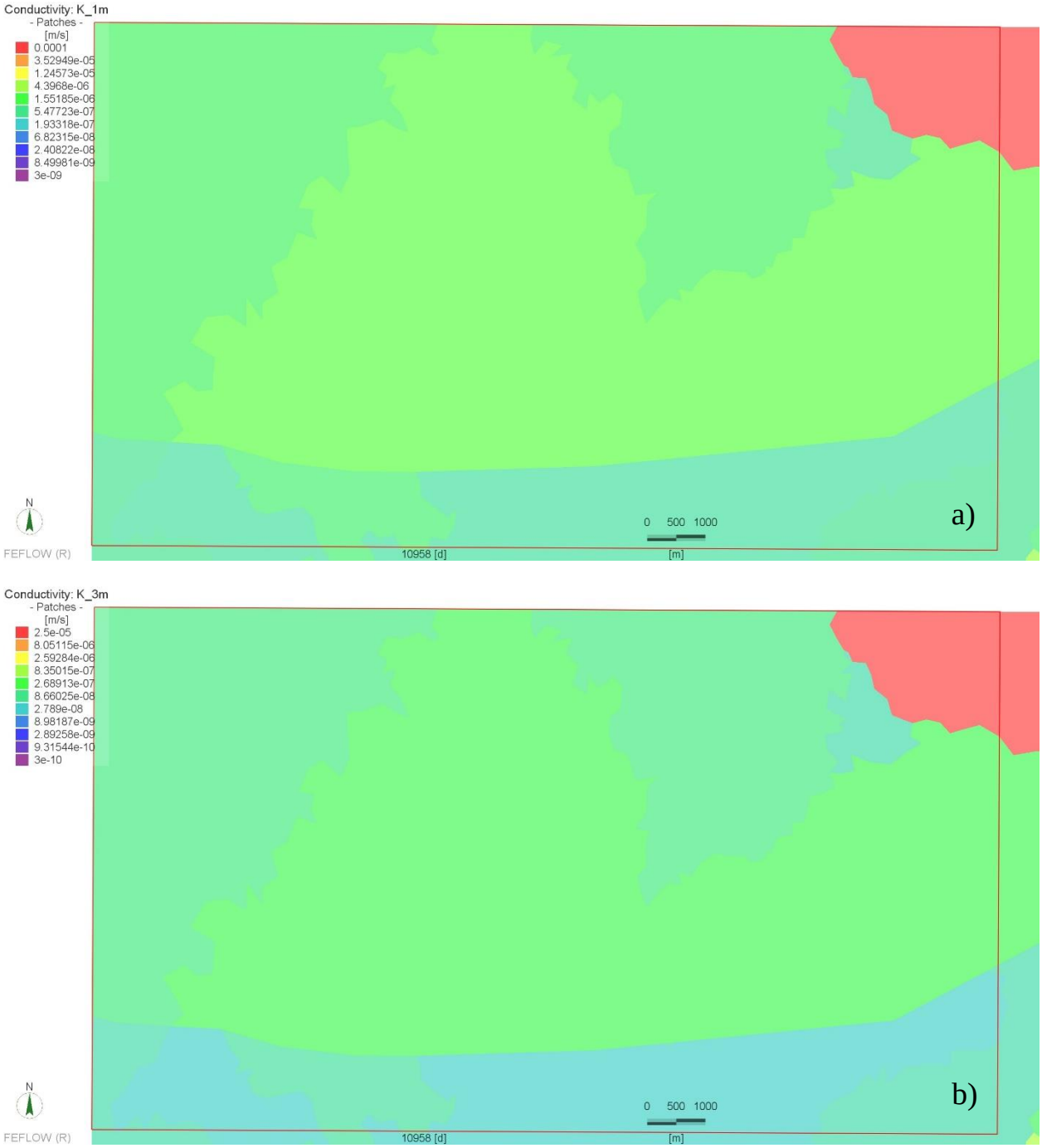
24. ábra: A 3. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



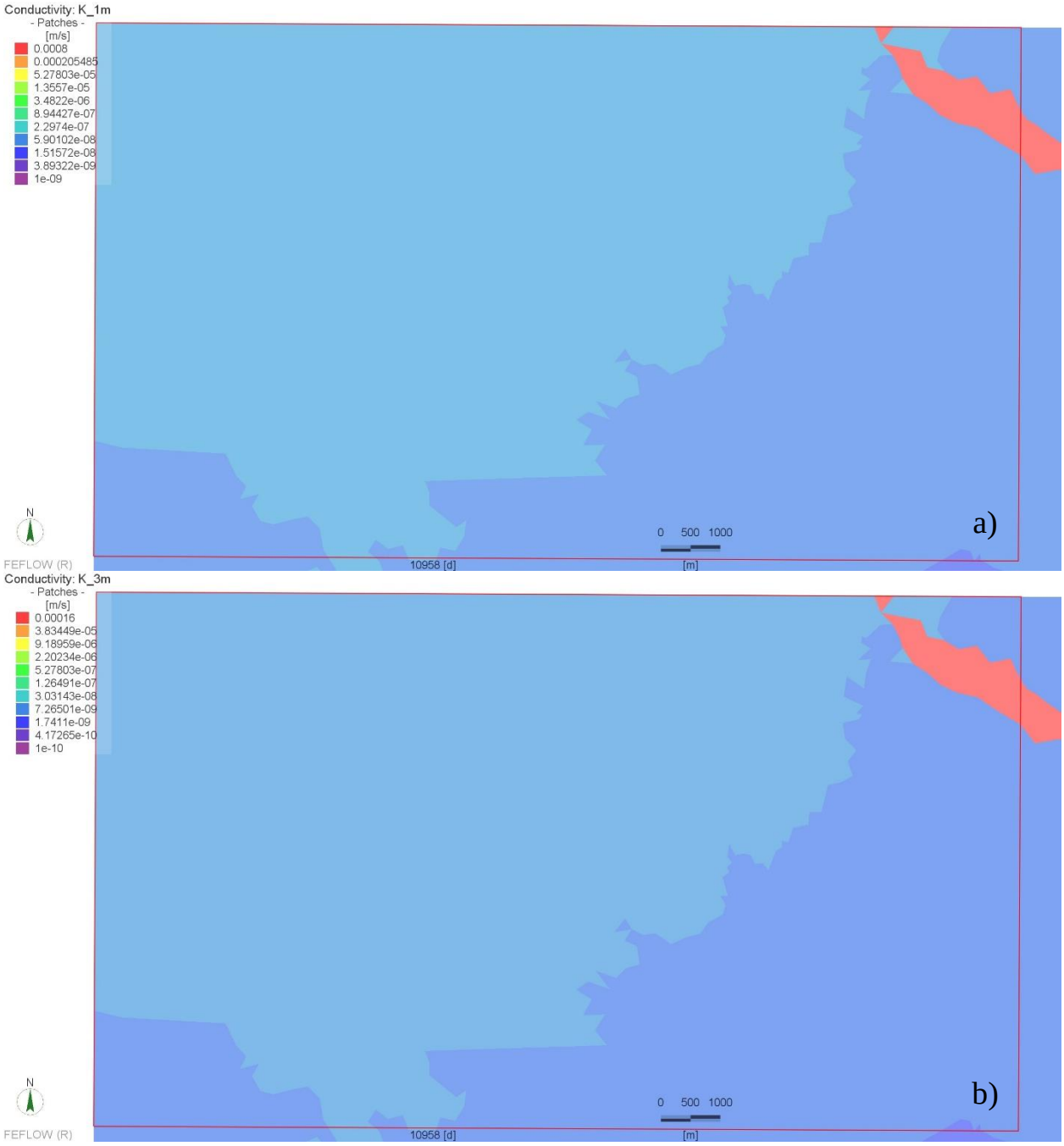
25. ábra: A 4. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



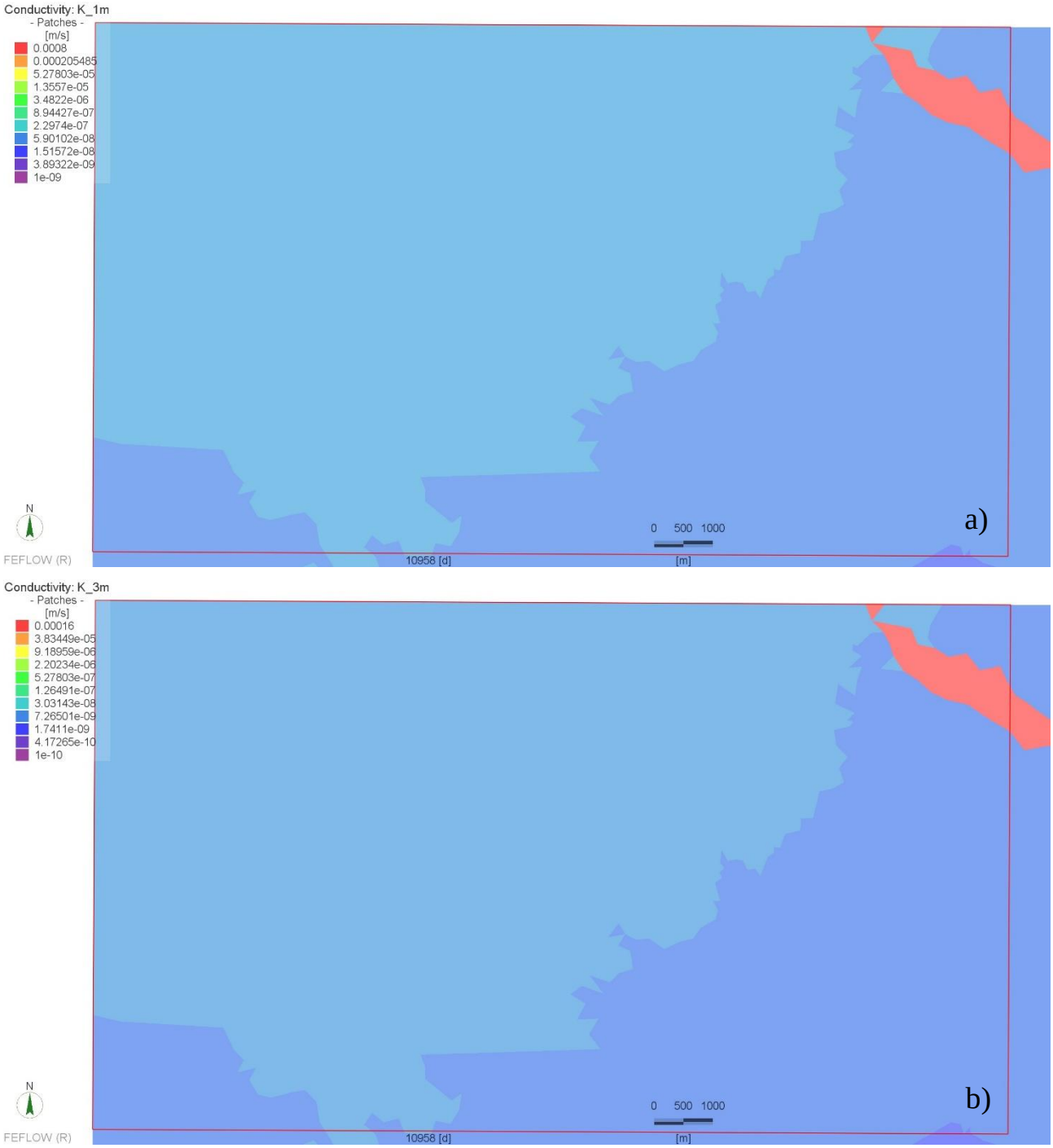
26. ábra: Az 5. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás



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



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

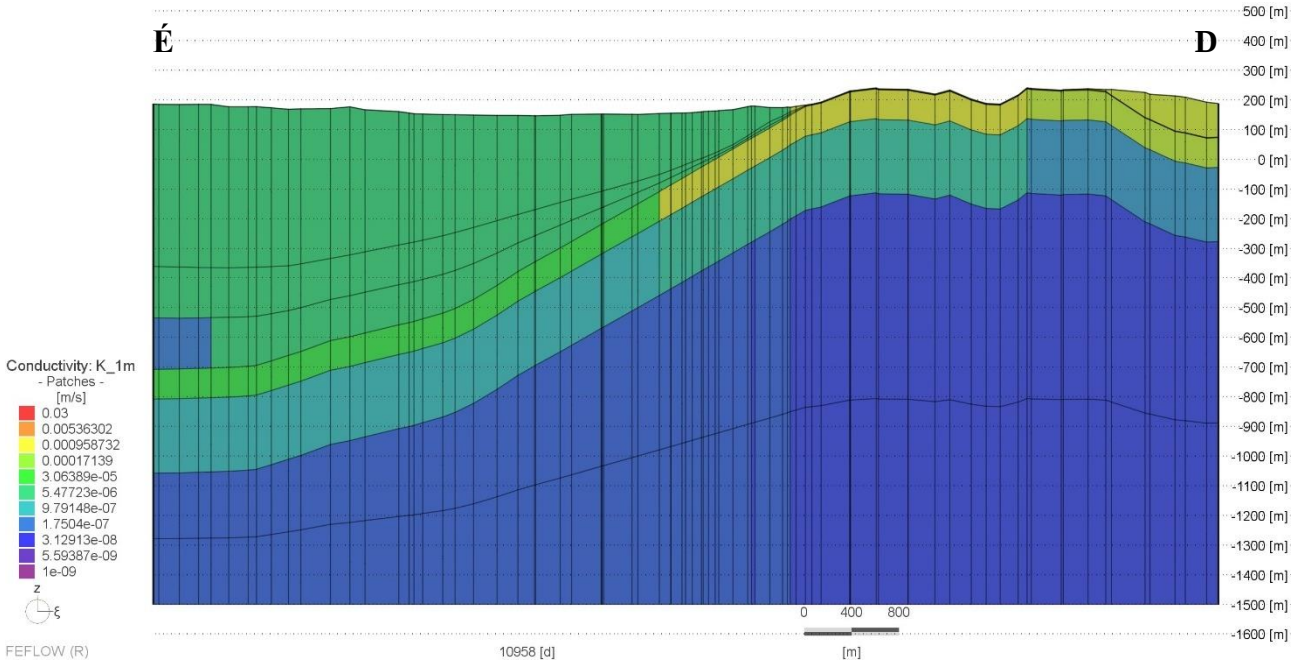


29. ábra: A 8. rétegben alkalmazott horizontális (a,) és vertikális (b,) K-tényező eloszlás

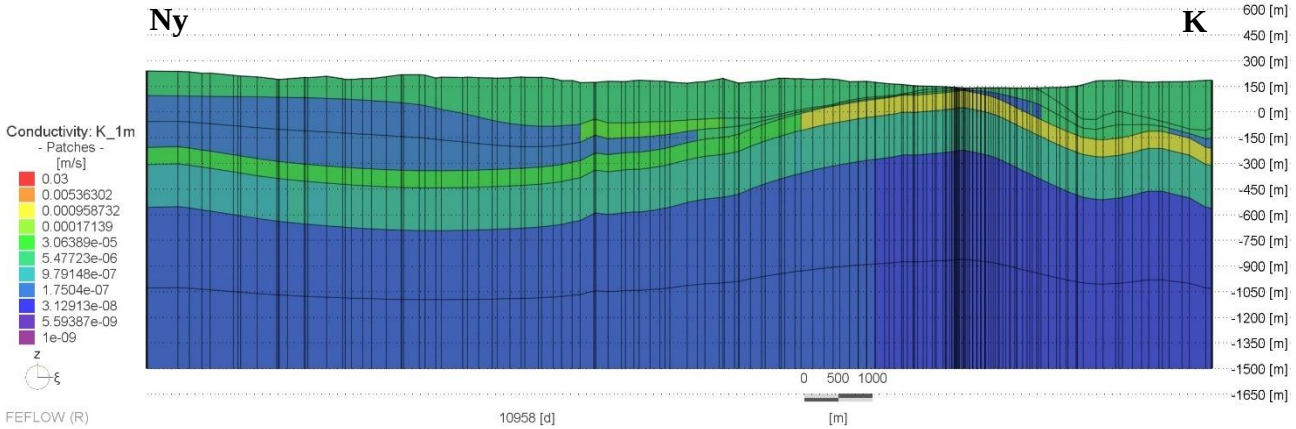
4. táblázat: Az egyes képződmények K-tényező értéke a numerikus modellben

Numerikus réteg		Nyílt karsztos területek				Medence területek															
		kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	kor/kőzet	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)
1	Q-Pa2	Pre-albai (T3 Fődolomit Fm./Dach-steini Mkő.)	1E-03-6E-04	Kx*0.5	1,5E-04-5E-04	Q-Pa2	3E-06-5E-05	Kx*0.5-1	6E-07-1,7E-05	Q-Pa2	3E-06-5E-05	Kx*0.5-1	6E-07-1,7E-05	Q-Pa2	1E-06-1E-05	Kx*1	2E-07-1,16E-06	Q-Pa2	1E-07-1E-05	Kx*1	2E-08-1,16E-06
2	Pa1-M-Ol					Pa1-M-Ol	5,8E-06	Kx*1	1,16E-06	Függő-karszt (mészkő/márga)	5-6E-05/2E-07	Kx*0.5	1,67-2E-05/6,67E-08	Pa1-M-Ol	5,8E-06		1,16E-06				
3	Függőkarsztos rétegcsoport - mészkő					Függőkarszt (mészkő/márga)	5-6E-05/2E-07	Kx*0,5	1,67-2E-05/6,67E-08												
4	Függőkarszt rétegcsoport - vízrekesztő																				
5	Pre-albai*		4E-04-8E-04		1E-04-4E-04	Pre-albai (T3 Fődolomit Fm./Dachsteini Mkő.)	2E-05		5E-06	Pre-albai (T3 Fődolomit Fm./Dachsteini Mkő.)	2E-05		5E-06	Pre-albai (T3 Fődolomit Fm./Dachsteini Mkő.)	2E-05-8E-04	Kx*0.5	5E-06-4E-04	Pre-albai (T3 Fődolomit Fm./Dach-steini Mkő.)	2E-05-8E-04	Kx*0.5	5E-06-4E-04
6	Pre-albai segédréteg		4E-07-1E-04		3,2E-08-2,5E-05		4E-07-1E-04		3,2E-08-2,5E-05		4E-07-1E-04		3,2E-08-2,5E-05		4E-07-1E-04		3,2E-08-2,5E-05		4E-07-1E-04		3,2E-08-2,5E-05
7	Pre-albai segédréteg		5E-08-8E-04		5E-09-1,7E-04		5E-08-8E-04		5E-09-1,7E-04		5E-08-8E-04		5E-09-1,7E-04		5E-08-8E-04		5E-09-1,7E-04		5E-08-8E-04		5E-09-1,7E-04
8	Pre-albai segédréteg																				

* 5. rétegben, nyílt karszton kis (lokális) területen: Kx=0,004; Ky=Kz=0,002

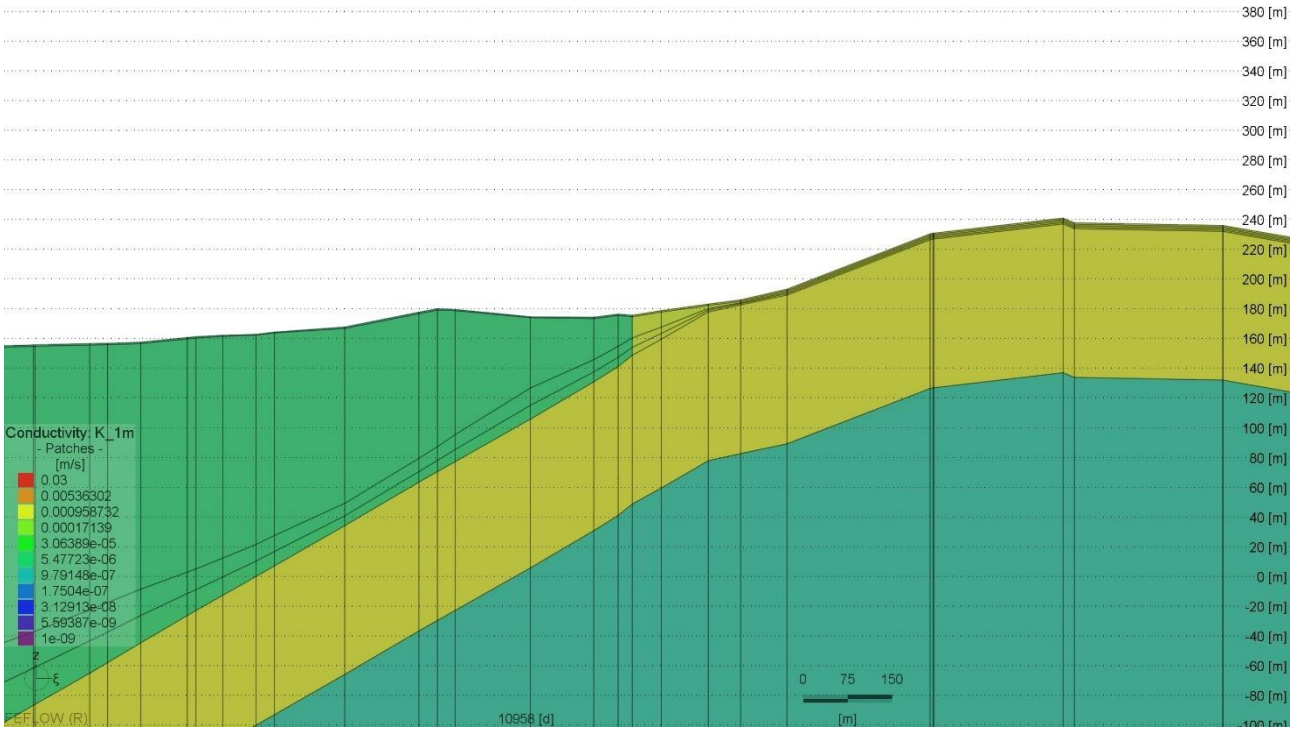


30. ábra: A szivárgási tényező eloszlás É-D-i irányú szelvényen (2,5x túlmagasítás)



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

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



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

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

5. 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								
Oligocén-miocén vízvezető (Csatkai F.)	M-Ol								
Eocén/kréta mészkő	E2								
Eocén/kréta vízrekesztő	E2								
Fődolomit/Dachsteini Mkő.	T3								

3.3.2 Fajlagos tározás értékek a numerikus modellben

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

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

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

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

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

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

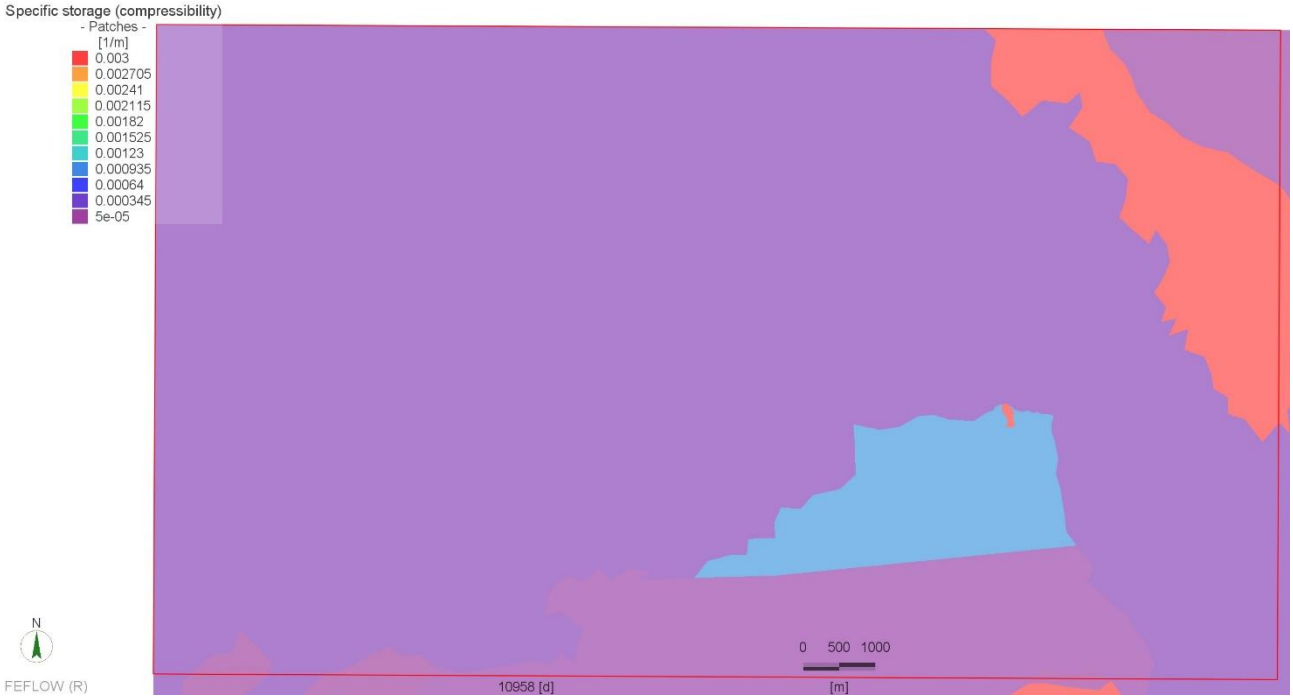
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K(x)\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K(y)\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K(z)\frac{\partial h}{\partial z}\right) = S_0\frac{dh}{dt}$$

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

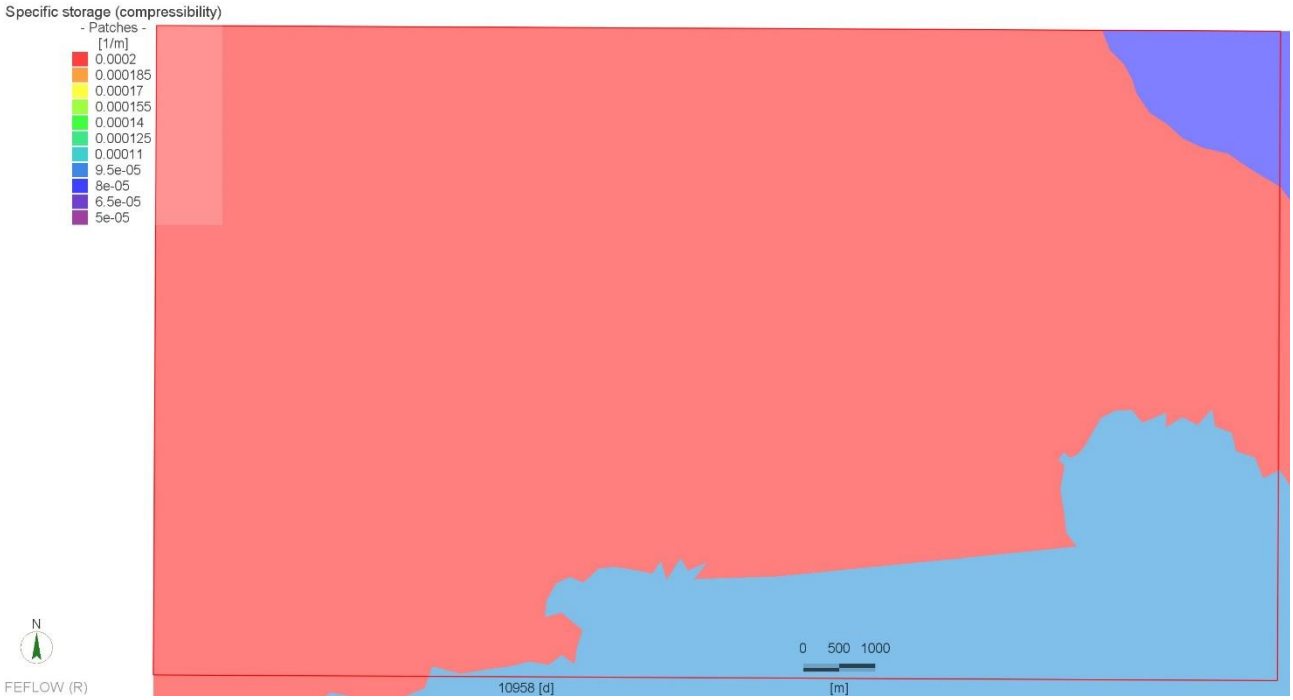
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T}\frac{dh}{dt}$$

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

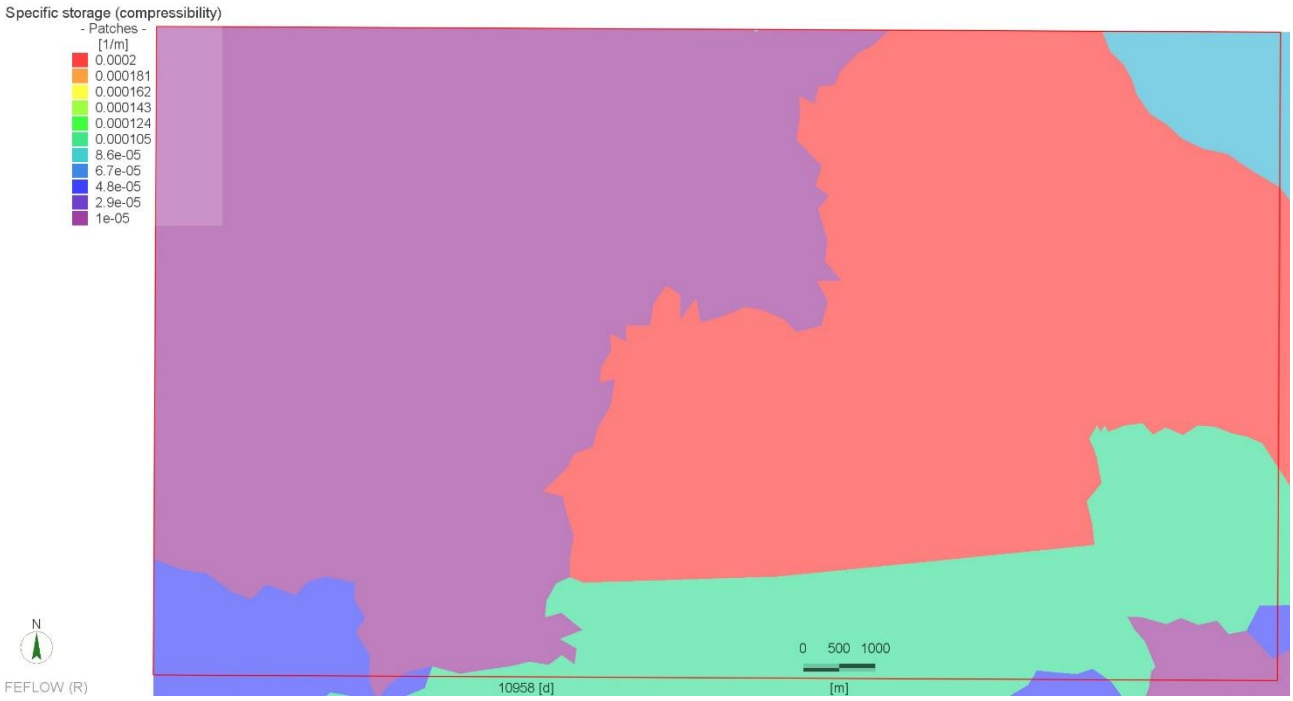
Első lépésben a fajlagos tározás értékeket irodalmi adatok alapján számoltuk ki a Dunántúli-középhegység regionális modell bemeneti paramétereihez [3]. A fajlagos tározás számításához szükséges, kőzetre jellemző teljes porozitást a T-JAM [10] alapján, míg a közeg kompresszibilitását (α) *Domenico & Schwartz,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



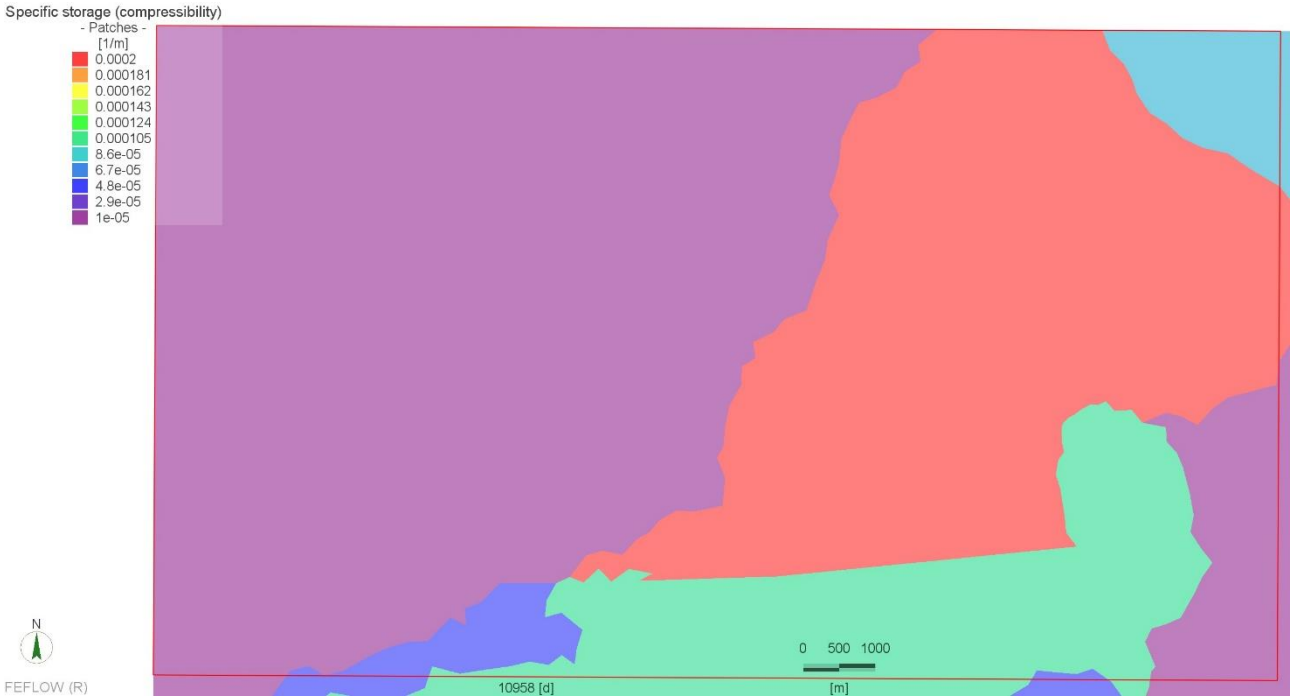
33. ábra: Az 1. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



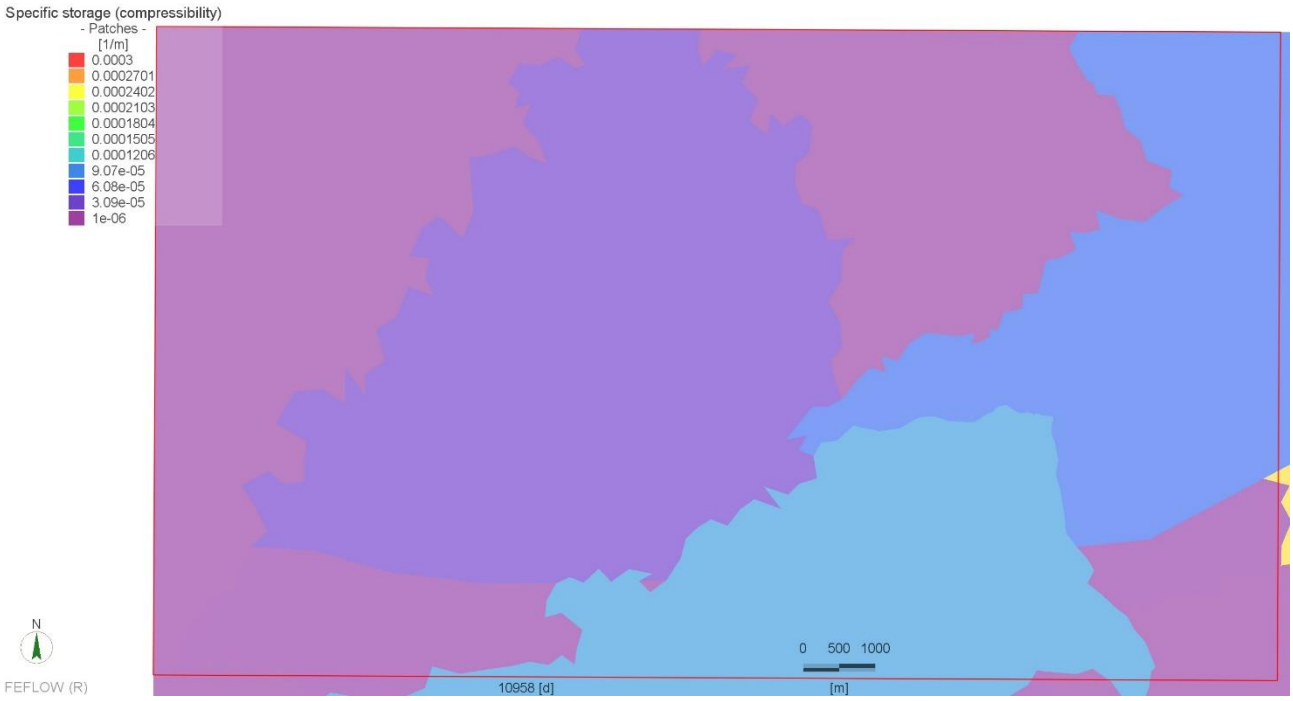
34. ábra: A 2. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



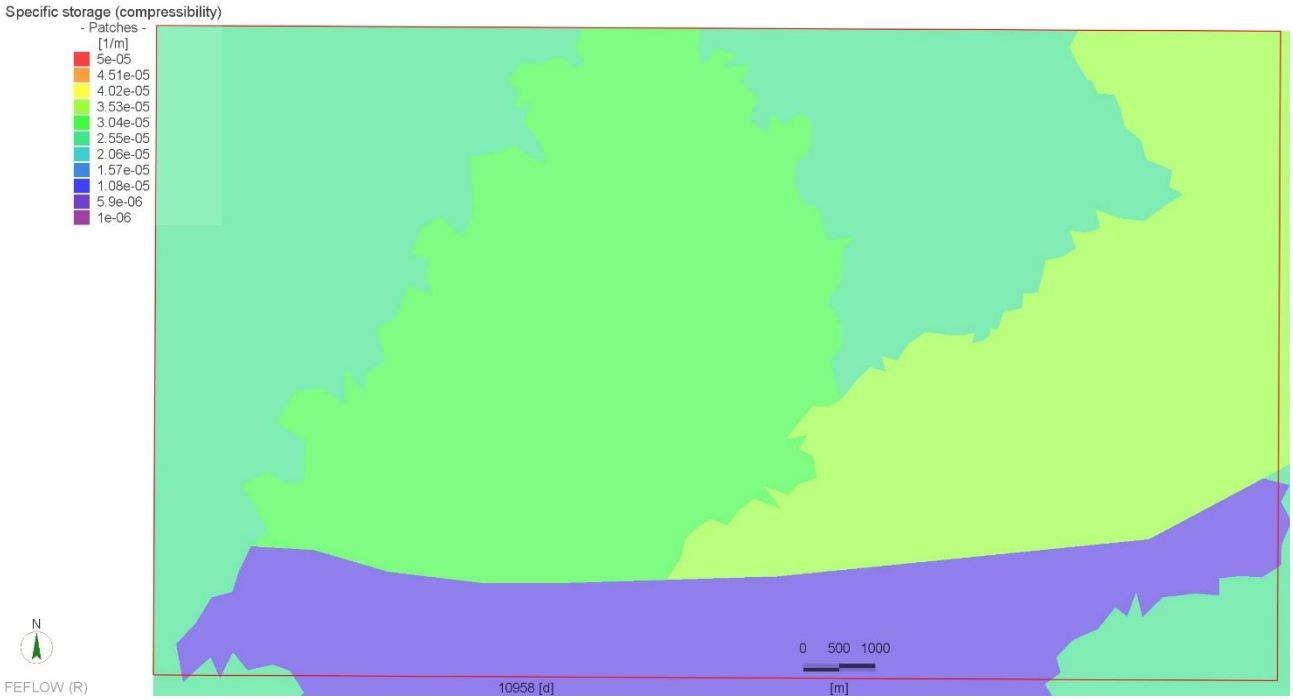
35. ábra: A 3. rétegben alkalmazott fajlagos tározás eloszlás



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



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



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

3.3.3 Beszivárgás a numerikus modell felszínén

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

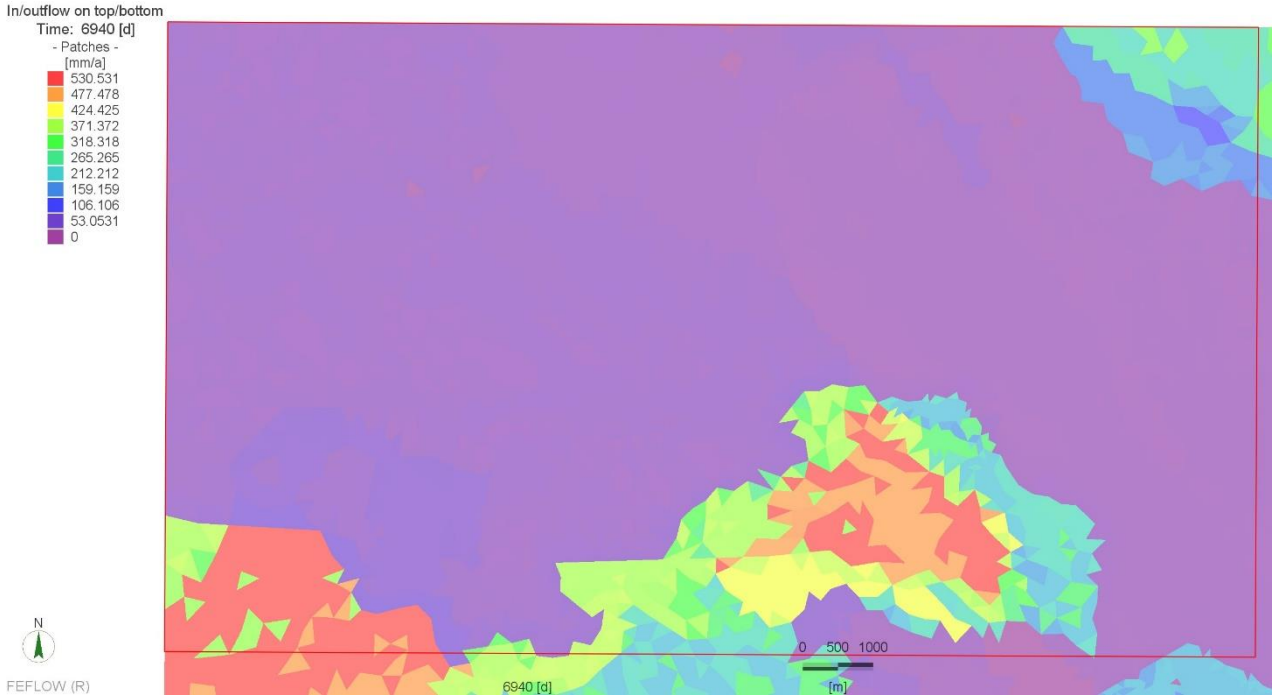
A nyílt karsztos területeken a felszíni beszivárgás megegyezik a karsztvíztárolóba történő beszivárgással. A fedett területeken csak a felszínen beszivárgó csapadék egy hányada jut el a karsztvíztárolóba. Ennek mennyisége eltérő a természetes áramlási rendszerben, és a bányászati víztelenítés időszakában,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

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

A Bodajk lokális modellterületen két fő beszivárgási területet különíthetünk el. A modell déli részén a Tési-fennsíkhoz kapcsolódó nyílt karsztos képződmények találhatók, amely terület beszivárgás szempontjából a Bakonynánához tartozó csapadékzónába sorolható. A Csókakő település környékén elhelyezkedő, a Vérteshez tartozó nagyobb kiterjedésű nyílt karszton történő beszivárgás mennyisége

azonban a sólyi csapadékmérő állomás adatai alapján került kiszámításra. Ezen állomások adatai alapján a Tési-fennsíkot viszonylag nagy mennyiségű csapadék éri el, ezzel összhangban a területet megnövekedett beszivárgás jellemzi. A kalibráció során szükségessé vált a HELP szoftver által erre a területre számolt értékeket az itt található megfigyelő kutak vízszintértékei alapján tovább növelni. Ezt a vízszintnövelés több lépcsőben végeztük el olyan módon, hogy először a Tési-fennsíkhoz tartozó teljes beszivárgási felületen (nyílt karszt) a megadott érték 120%-át vettük. Ezt követően pedig már nem az egész nyílt karszton, csak annak a magasan fekvő részei által körül határolt poligonon belül a kevésbé csapadékos évek (pl.: 2011) beszivárgás értékeit további 120%-kal növeltük. A Vérteshez tartozó beszivárgási területen a beszivárgás értéke a HELP szoftverrel számolthoz képest csak kis területen, a nyílt karsztos terület peremi részén került csökkentésre olyan módon, hogy a kalkulált érték 70%-át vettük a teljes futtatási időszakra.

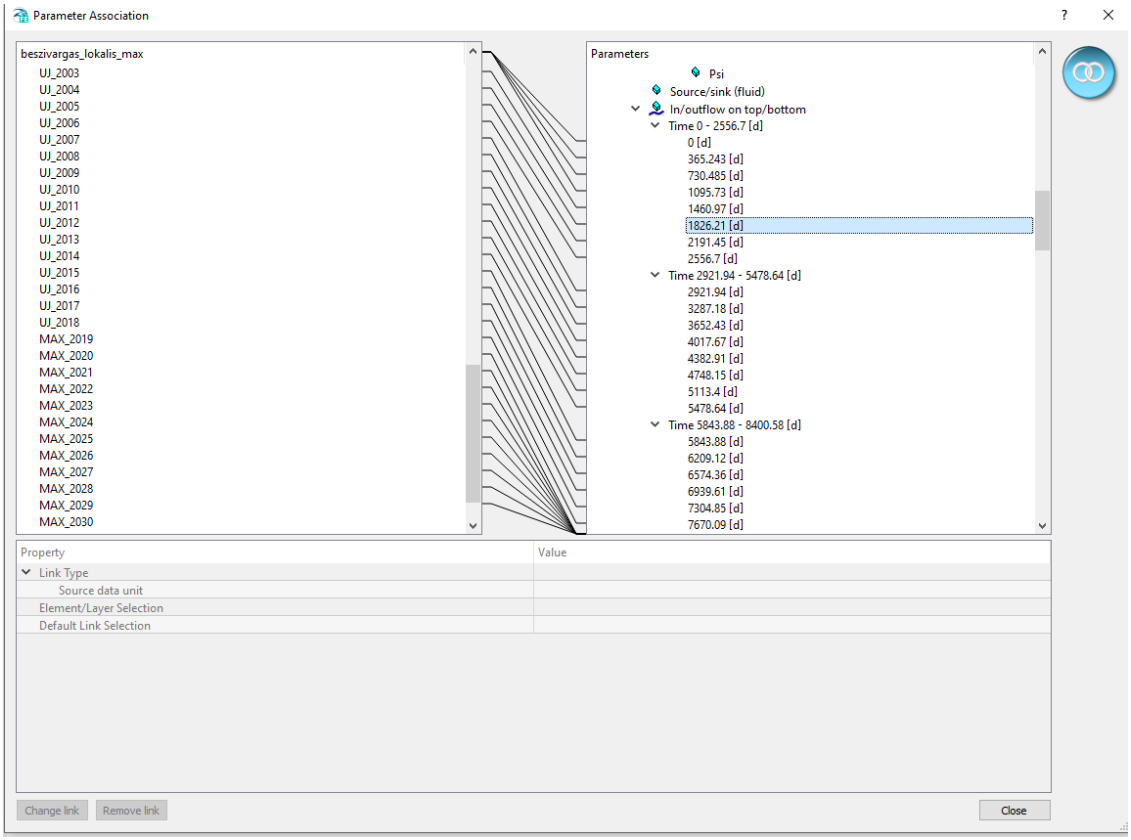
A beszivárgást az 1. numerikus felszínre adtuk meg, a cellák teljes területére, „inflow on top” paranccsal (***39. ábra***).



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

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

Az ***40. ábra*** szemlélteti azt a transzformációs lépést, amelyet az adatbázison kell elvégezni ahhoz, hogy a modellben fel lehessen használni a beszivárgás értékeit. A szoftver az éves időlépcsők közötti időkre lineárisan interpolálja az értékeket.



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

3.3.4 A diszkrét elemek a numerikus modellben

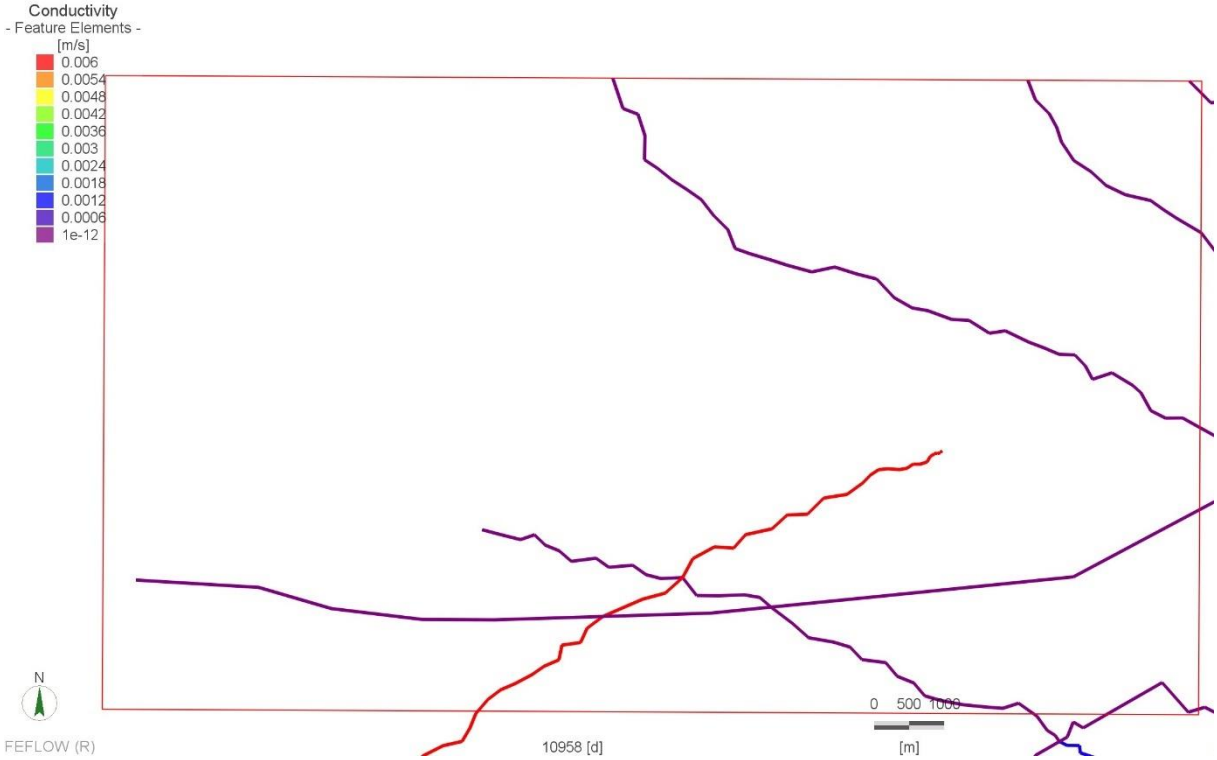
A dunántúli-középhegységi áramlások szimulációja nem készíthető el a térségre jellemző vetőrendszerek leképezése nélkül. A szerkezeti felépítéshez a MÁFI M=1:500 000 méretarányú Magyarország prekainoozos földtani térképét [12], valamint a pretercier földtani térképet [13] használtuk.

A vetők a teljes modellt átszelő 2D-s vertikális elemekkel adtuk meg. A paraméterezés első lépésben a ***6. táblázatban*** összefoglaltak alapján történt meg. Az 1D- és 2D-s elemek hidraulikai paramétereinek meghatározása, szintén kalibrációs feladat volt. Ennek eredményeként a vetők vastagság és szivárgási tényező értékei a megfelelő vízszinteloszlás kialakítása szerint változtak, így a különböző vetők vastagsága 0,001-10 méter között változik.

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

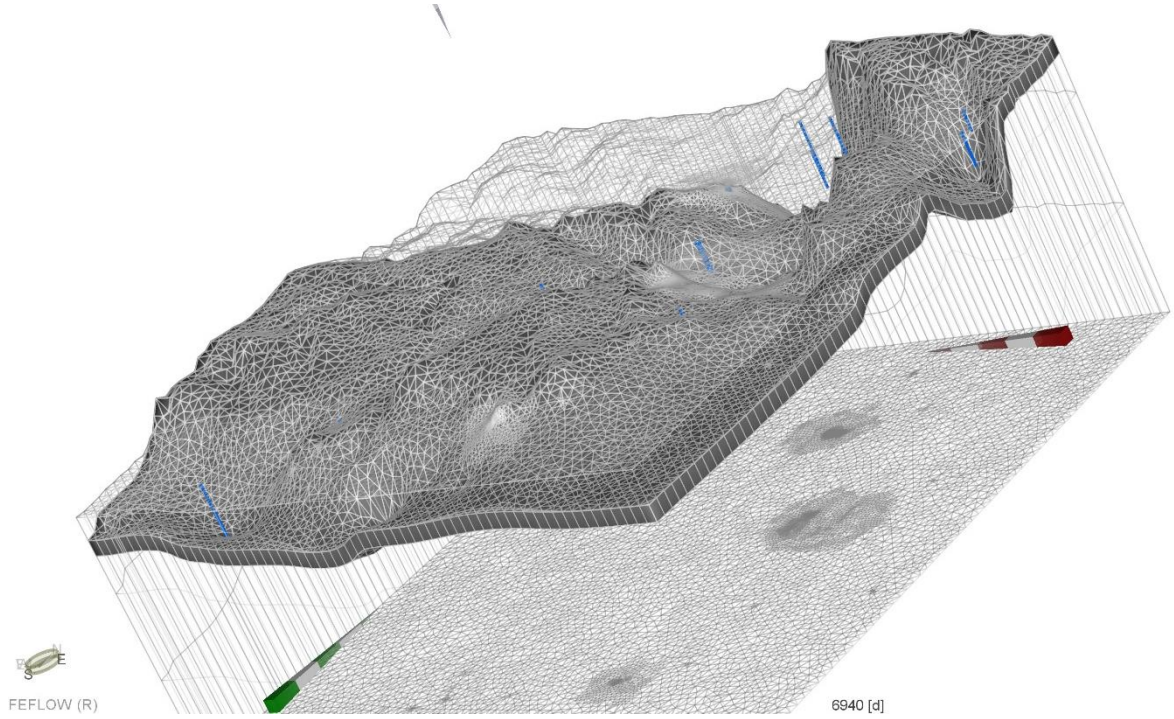
6. táblázat: A szerkezeti elemek hidraulikai paraméterei

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



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

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



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

3.4 Peremfeltételek a numerikus modellben

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

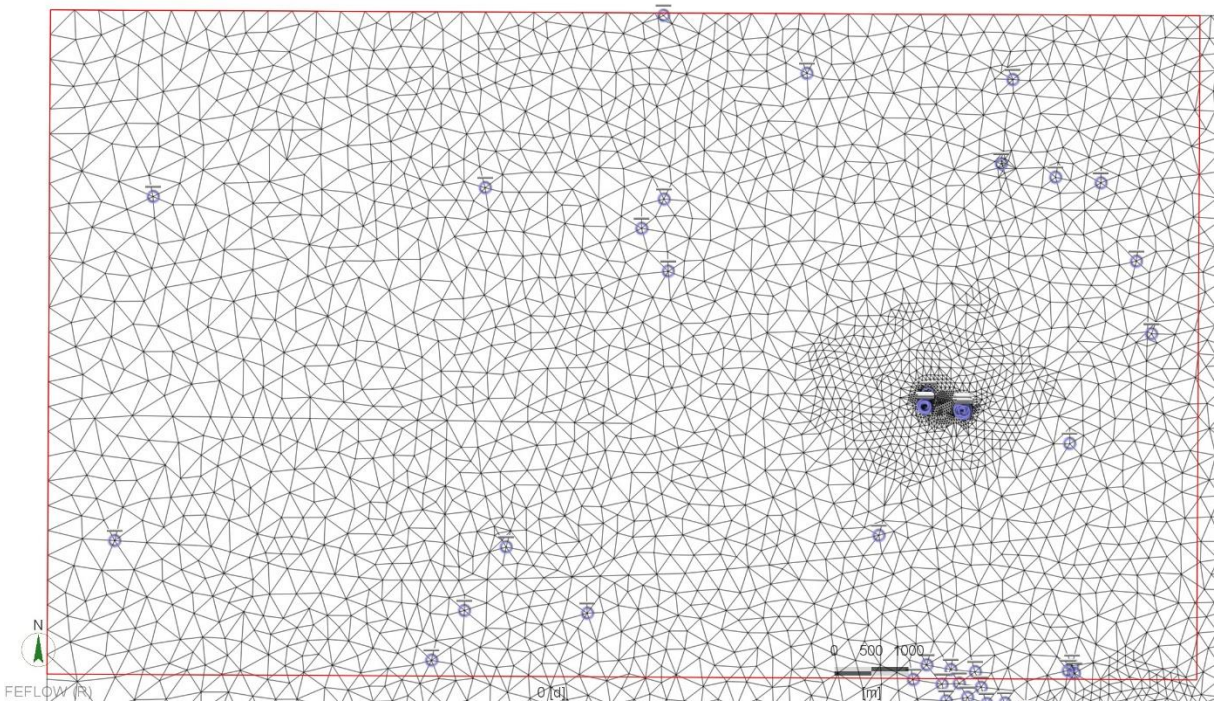
A modellezett területen természetes megcsapolók a források, vízfolyások, patakok, melyeket kötött peremként adtunk meg. Így a megcsapolódó vízhozamot a program számítja a vízszint, a fakadási szint és az átszivárgási együttható alapján. Mesterséges megcsapolóknak a kutas vízkivételeket tekintjük.

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

3.4.1 1. típusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel

A modellterület felmért forrásait fakadási szintjeikkel határoztuk meg az 1. numerikus felszínre, azzal a kitétellel, hogy mindenképp kifolyóként kell viselkedniük. A modellterületen lévő nagyobb állóvizes területként adtuk meg a fehérvárcsurgói víztározó szintjét, amely a 10 m-es ddm alapján került meghatározásra. A termelő forrásvízműveket szintén fakadási szintekkel definiáltuk (***43. ábra***). A modellterület központi részén elhelyezkedő bodajki Tó-forrást és a Nádastavi-forráscsoportot szintén 1. típusú peremfeltétellel határoztuk meg a 10 m-es ddm alapján, több rácspontban. A bodajki Tó-forrás szintje ~145 mBf, míg a Nádastavi-forráscsoport 141 mBf-es szinten fakad.

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



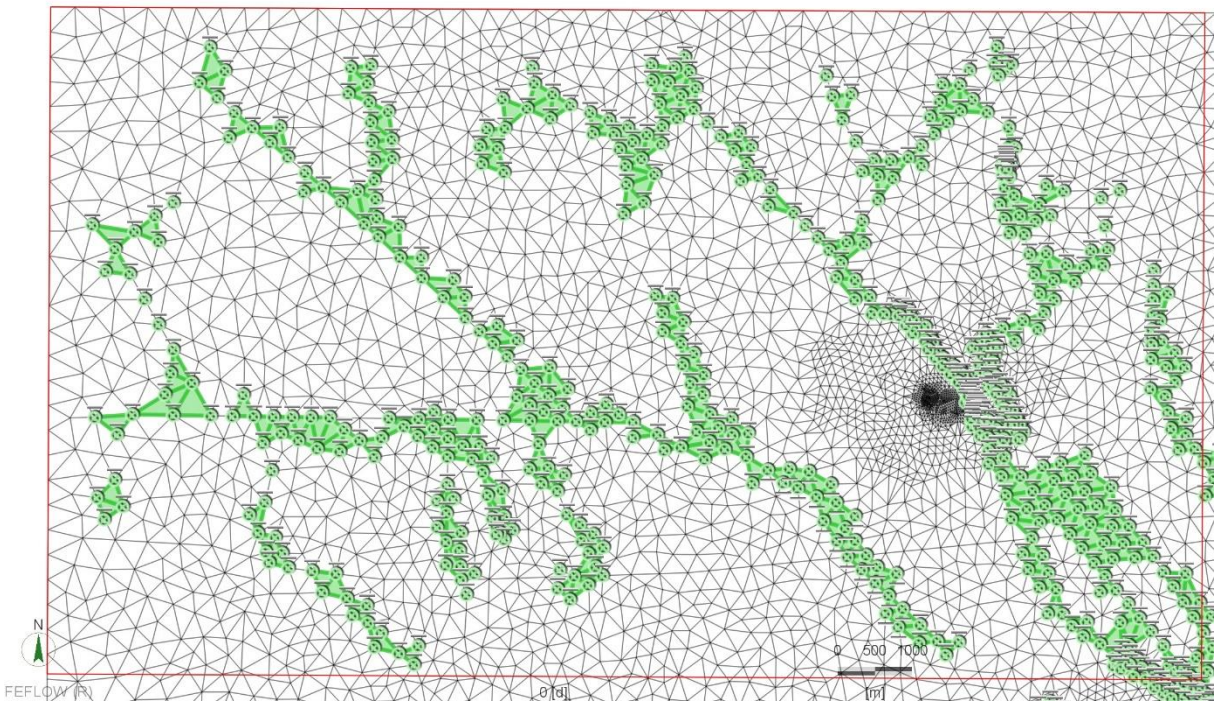
43. ábra: A numerikus modellben szereplő 1.tipusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel

3.4.2 3. típusú (Transfer)-Cauchy peremfeltétel

A vízfolyások vonalas objektumokként kerültek be az 1. numerikus felszínre. A patakok és folyók csomópontjait úgynevezett puha peremmel adtuk meg (Transfer), melyekhez egy referencia vízszintet határoztunk meg. A kisvízfolyások referencia vízszintjét a 10x10 m-es DDM alapján adtuk meg. A területen található legtöbb vízfolyás utánpótlódik a felszín alatti vízből. Ez alapján a kontrollálatlan hozambeáramlás miatt a peremfeltételt korlátoztuk, csak fakadást engedélyeztünk. Az átszivárgási együttható egységesen 0,04 1/nap.

A vizsgált terület jelentős vízfolyása a Gaja-patak, amely hidrológiai szempontból azért is érdekes, mert részben nyílt karsztos területen halad át, aminek következtében a vízfolyás egy szakaszán a felszíni víz beszivárog a karsztvíztárolóba, ezzel közvetlenül megemelve annak szintjét. A Gaja-patakot nemcsak a főkarsztból eredő források táplálják, hanem számos, a fedőkarsztból eredő kisebb forrás és vízfolyás. Az elnyelődésre vonatkozó mennyiségeket a Smaragd GSH 2014 évi mérései alapján becsültük [1]. Ekkor a Gaja-patak hozama a patak felső szakszán a Gaja-szurdok völgye előtt 20 200 m^3/nap volt. A Gaja-szurdokban a patak elnyelődik a fődolomitból álló karsztos felszínen, a patak alsóbb szakaszán végzett második mérés kisebb, 12 344 m^3/nap hozamot mutatott.

A gaja-szurdoki 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 (***44. ábra***).



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

3.4.3 4. típusú (Well)-Kút peremfeltétel

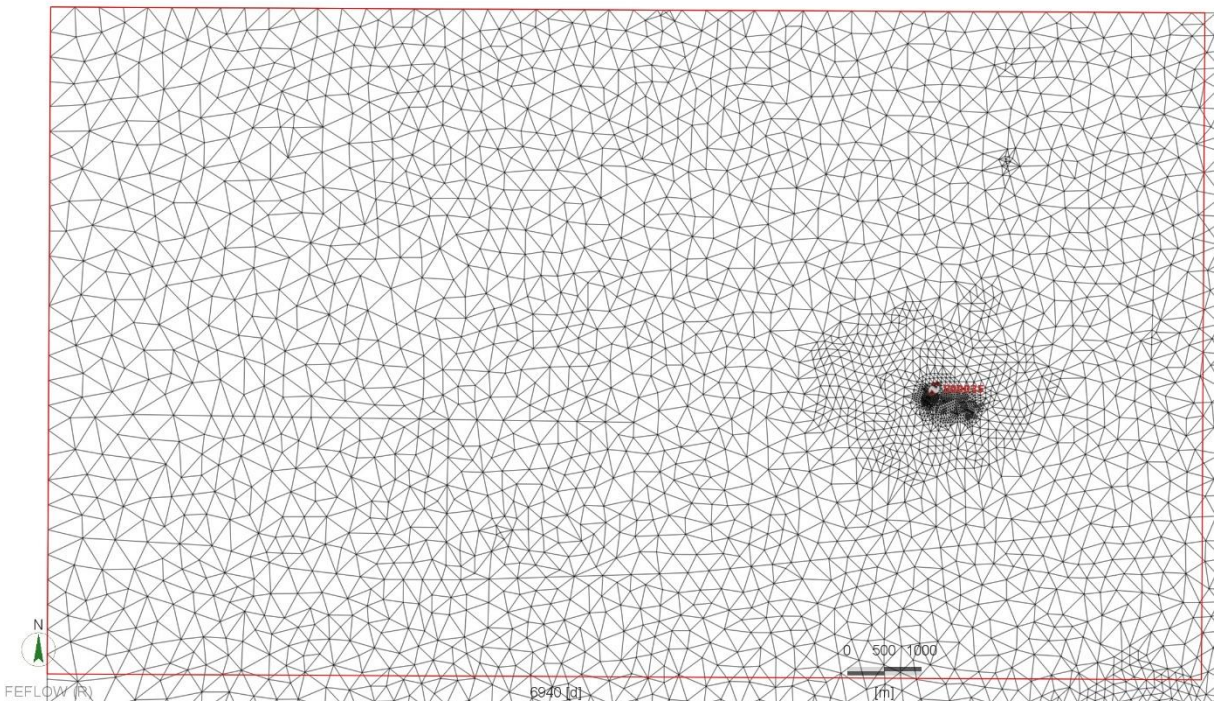
A termelő kutakat adott hozamú peremekként határoztuk meg (Well). A modellezés során az éves vízkivételeket m^3/nap-ra leosztva adtuk meg.

A numerikus modellben a következő termelőobjektumok szerepelnek:

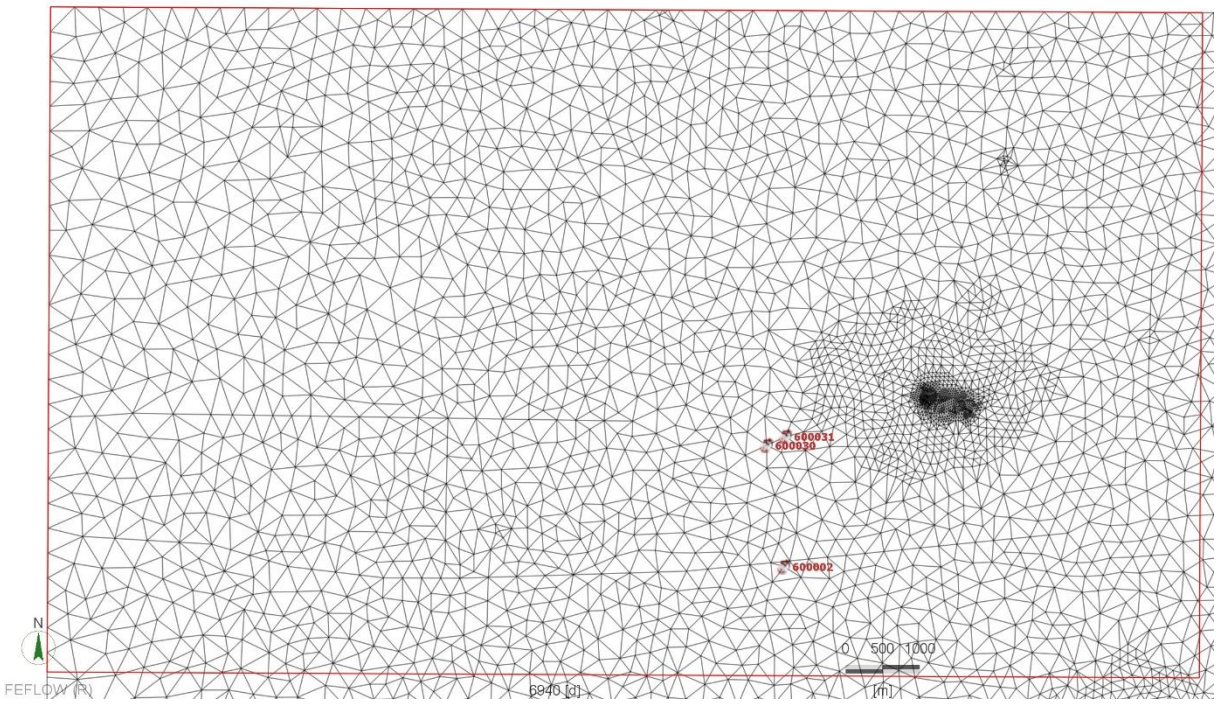
- A karsztot, illetve a fedőt megcsapoló termelőobjektumok, amelyekből van termelési adat 2003-2020 között.

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

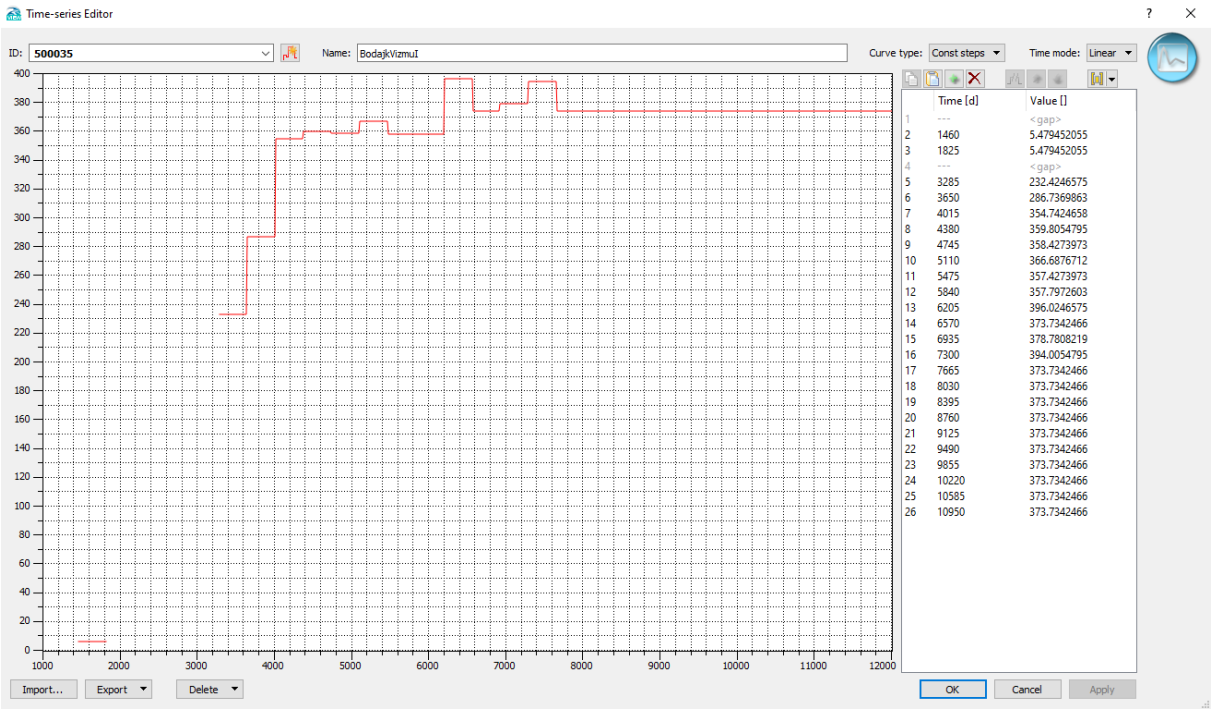
A tranziens modellben a vízkivételeket éves időlépcsővel, lépcsős függvénnyel definiáltuk (***47. ábra***). Ez azt jelenti, hogy az adott évre megadott termelést a rákövetkező évig tartja a modell. Azokat az időszakokat is figyelembe vettük, amikor a kutak nem termeltek. A regionális modellhez képest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



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



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



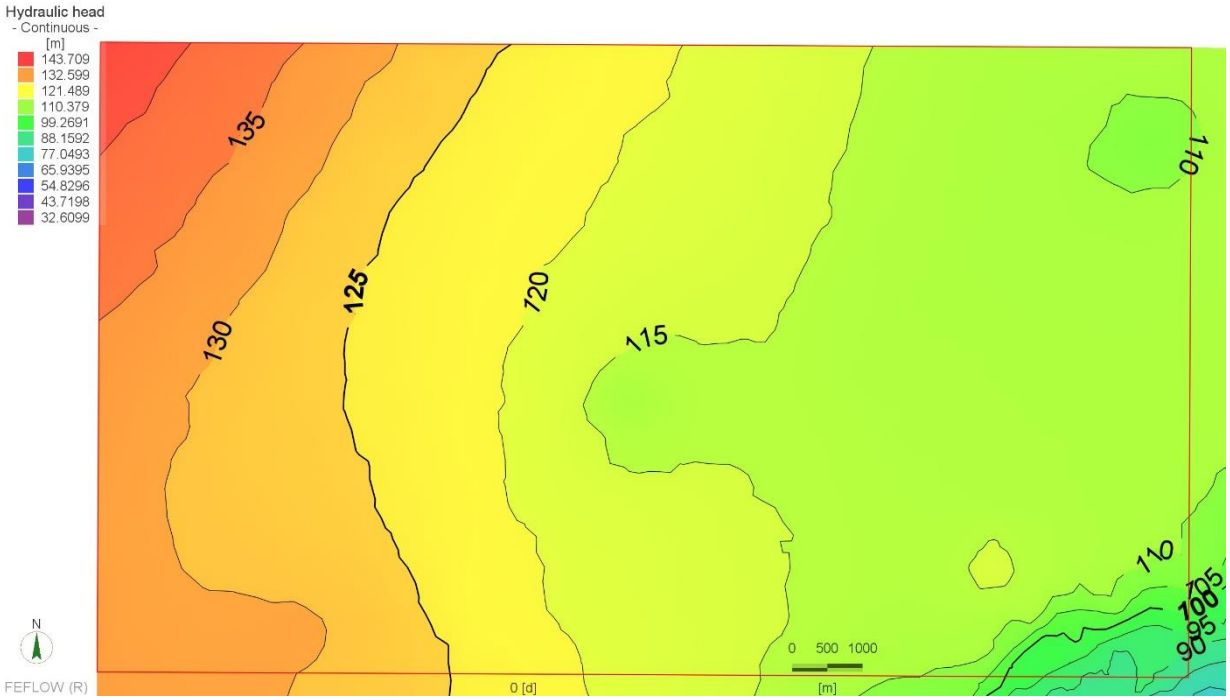
47. ábra: A vízkivételek modellbeli leképezése bodajki vízmű példáján

3.5 A tranziens modellezés

3.5.1 A tranziens modellezés kezdeti feltételei

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

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



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

3.5.2 A tranziens modell időléptéke

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

3.5.3 A numerikus modell kalibrálása

3.5.3.1 A karsztvízszint kalibrálása a 2019 állapotra

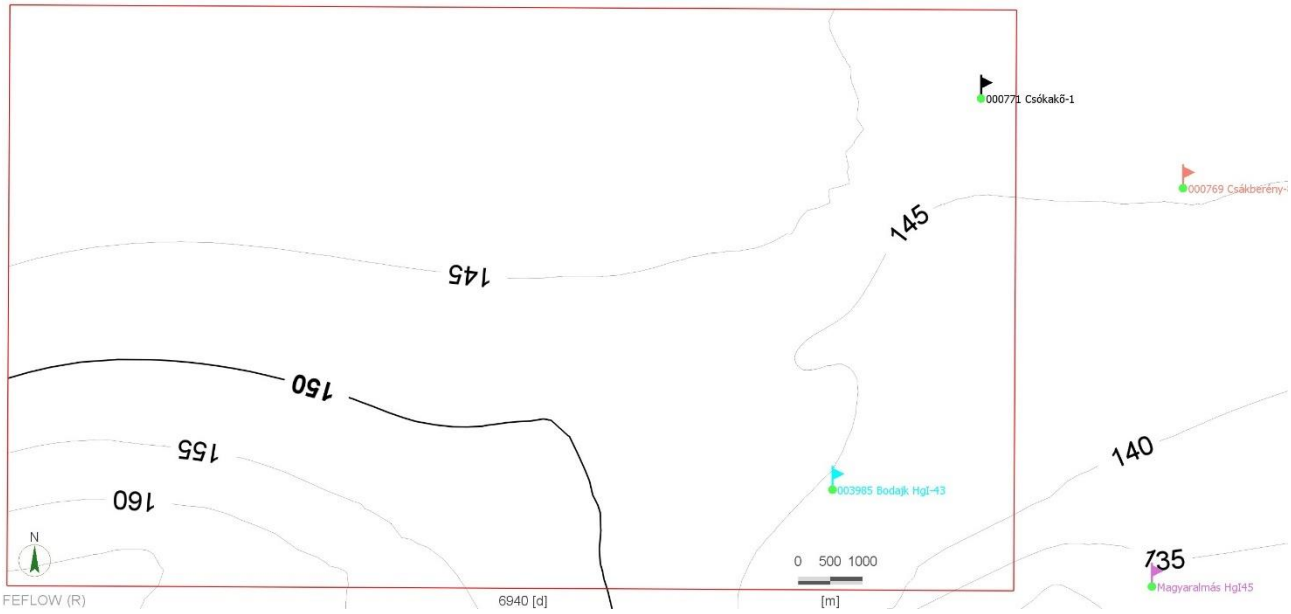
A Csór-Fehérvárcsurgó-Bodajk összevont modellterületen 11 db karsztvízszint megfigyelő kút található. Ebből mindösszesen 2 db esik Bodajk lokális modellterület határán belülre, valamint +2db kút (Csákberény-86/a és Magyaralmás HgI-45) található a modellterület határán kívül, de annak viszonylagos közelségében (***49. ábra***).

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

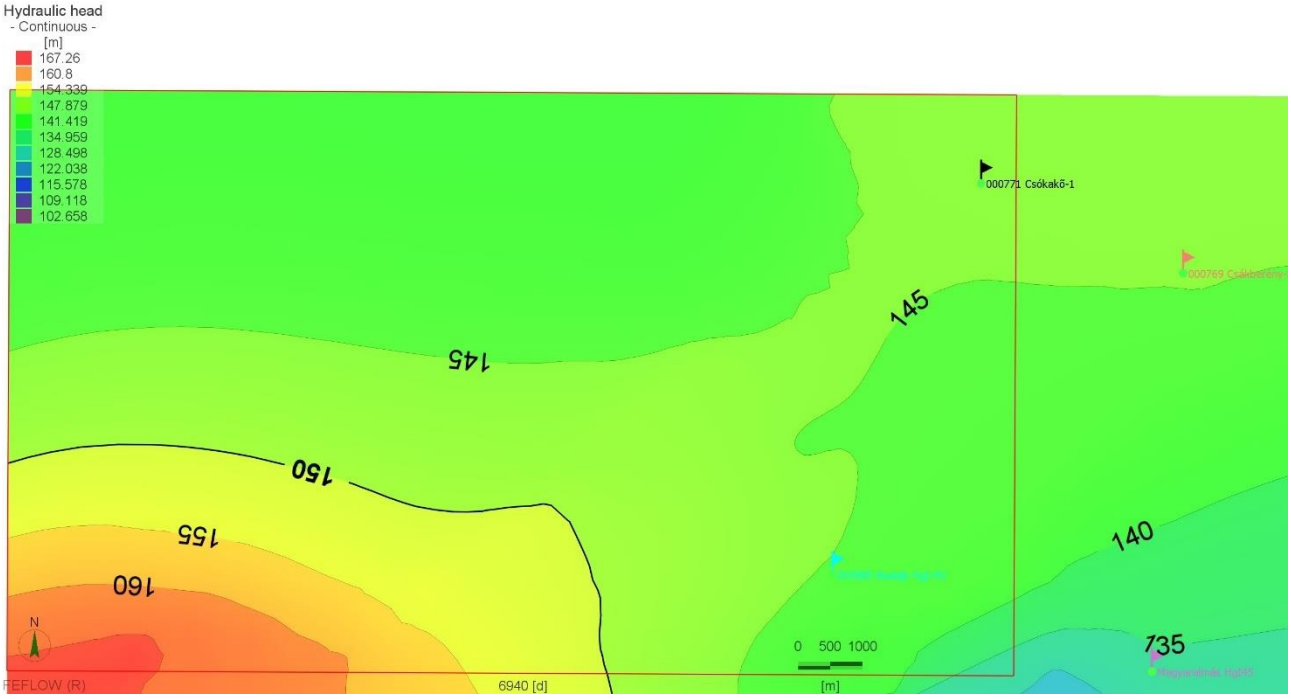
A mért vízszinteket havi időlépcsővel hívtuk be a modellbe, minden hónap első mért értéke került be. A tranziens modell kalibrálását a 2019-es januári állapotra végeztük el. A területen található 1 db kútból (Bodajk HgI-43) nem rendelkezünk 2019. januári eleji mért adattal, így annak kalibrációja 2018. novemberre történt meg.

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

Az egyes monitoring kutakban mért és számított vízszint összehasonlítását a 2019-es állapotra a ***7. táblázat*** mutatja be. Ezek alapján Bodajk lokális modellterületen és annak közvetlen környezetében a modellezett karsztvízszint a kutakban átlagosan 3,88 méterrel tér el a mért vízszintektől.



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



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

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

Kút	Mért vízszint (mBf)	Modellezett vízszint (mBf)	Különbség
771 Csókakő-1	137.55	145.24	+7.69
3985 Bodajk HgI-43	147.35	144.66	-2.69
769 Csákberény-86/a	145.00	145.08	+0.08
Magyaralmás HgI-45	138.58	133.53	-5.04

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

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

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

Összefoglalva az eltérés okai a következők lehetnek:

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

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

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

3.5.3.2 A forráshozamok kalibrálása a 2019 állapotra

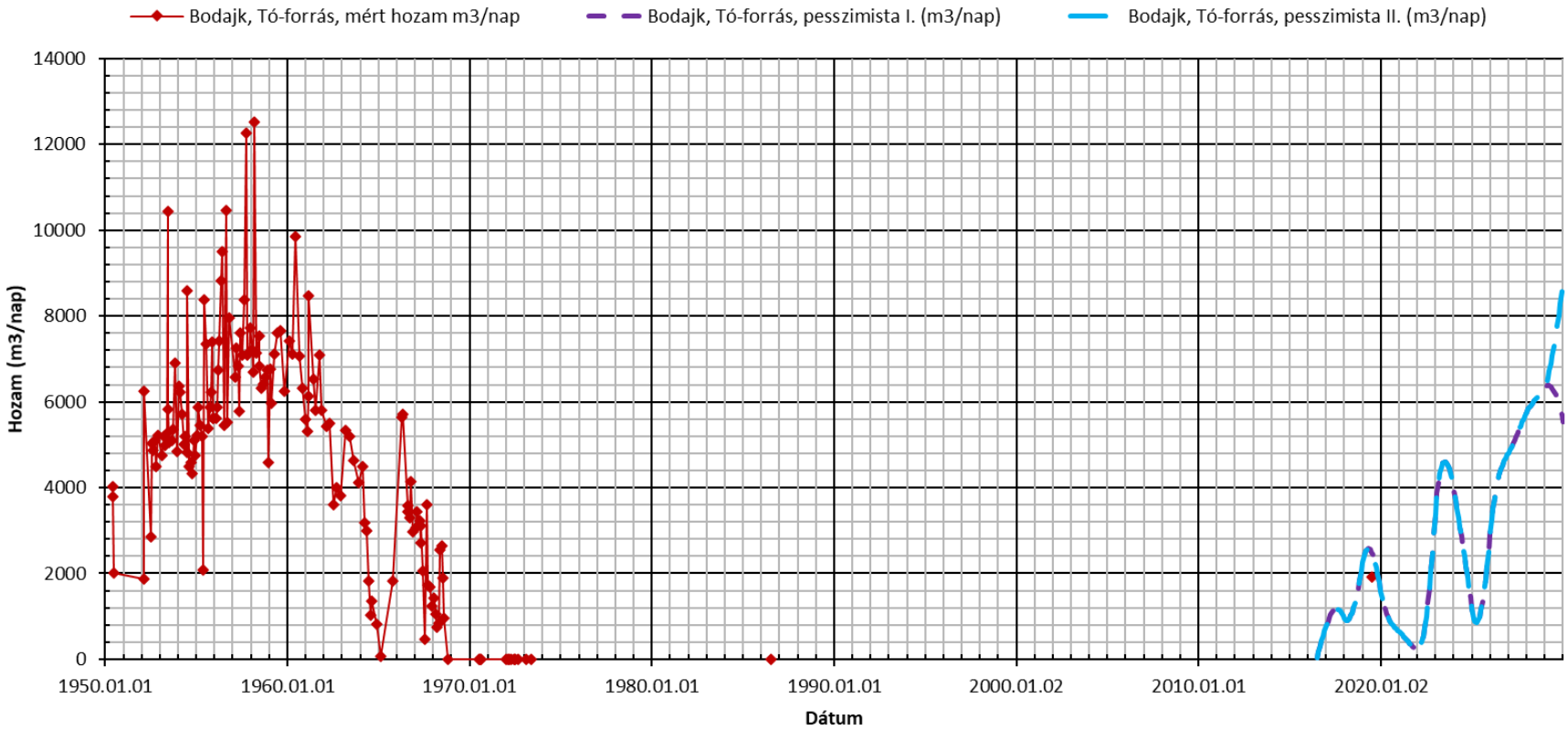
A terület két legjelentősebb forrása a bodajki Tó-forrás és a Nádastavi-forráscsoport, a kalibrációt erre a két forrásra végeztük el. A két forrás hozamára elsősorban Rákhegynél történt vízkivétel volt hatással. Ennek eredményeként következett be 1968-ban a Tó-forrás, míg 1975-ben a Nádastavi-forráscsoport elapadása.

A forráshozamok mért idősorát, valamint a modell által számított hozamértékeket az ***51***. ábra-***52. ábra*** mutatja. A két nevezett forrásban az 1970-es években megszűnt a rendszeres hozammérés és a források újra fakadását követően sem indult újra. Ennek következtében 2019-ből csak 1 db, a forrásfelmérés során felvételezett mért értékkel rendelkezünk, mely erősen függ az aktuális időjárási viszonyoktól.

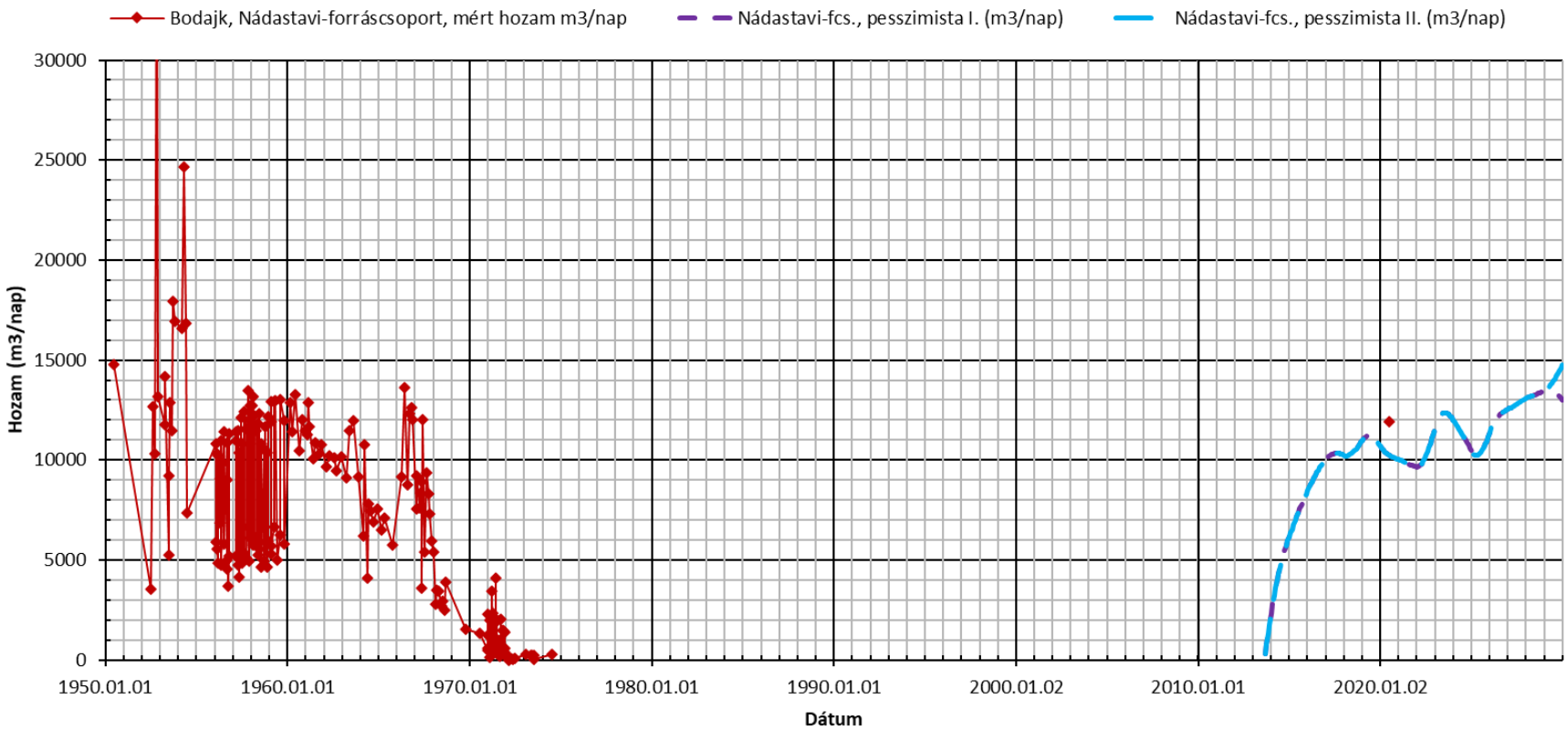
A számított vízhozam görbéjének lefutása a vízkivétel kezdeti szakaszában mért vízhozam idősorral összehasonlítható. A görbéken látszódik, hogy a Tó-forrás vízhozamát nagyobb ingadozás jellemzi, az a beszivárgás mennyiségétől erősen függő. A Nádastavi-forráscsoport egy nagyobb, és sokkal stabilabb alaphozammal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

3.5.3.3 Az üzemi vízszintek kalibrálása a 2019 állapotra

A Bodajk lokális modellterület központi részén található a bodajki vízmű. A bodajki vízmű üzemi vízszint adatait az OVF bocsátotta rendelkezésünkre 2005-2018 közötti időszakra az OSAP adatszolgáltatás alapján. Az utolsó mért üzemi vízszintadat 2018. decemberéből állt rendelkezésünkre, így a mért és számított adat összehasonlítása erre az időpontra történt meg. Az adatbázis alapján a mért üzemi vízszint 143,89 mBf volt, míg a modellel kalkulált érték 145,35 mBf. A mért és a számított érték közötti eltérés 1,46 méternek adódik.



51. ábra: A bodajki Tó-forrás mért és számított vízhozam idősora



52. ábra: A Nádastavi-forráscsoport mért és számított vízhozam idősora

4. A LOKÁLIS MODELLEZÉS EREDMÉNYEI

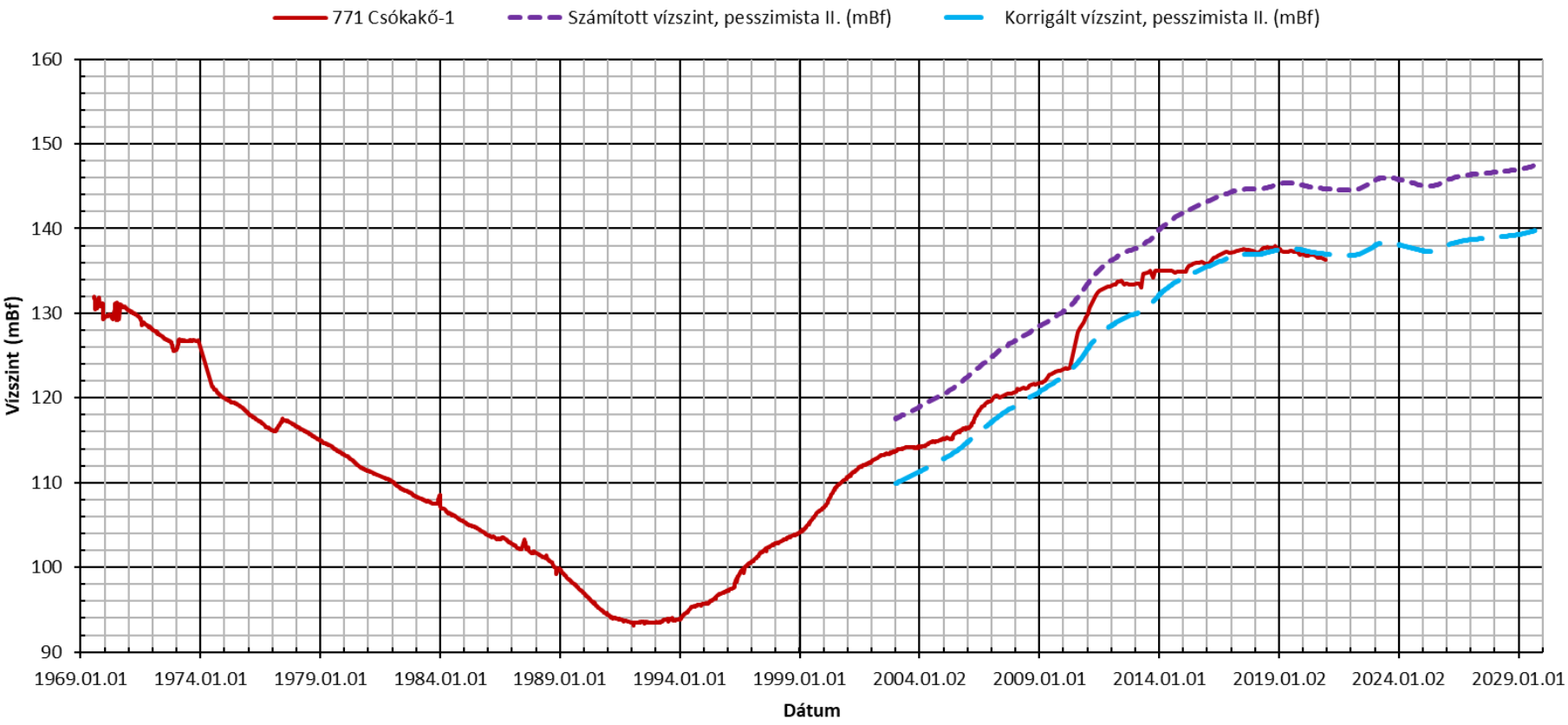
4.1 A 2019-es állapot

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

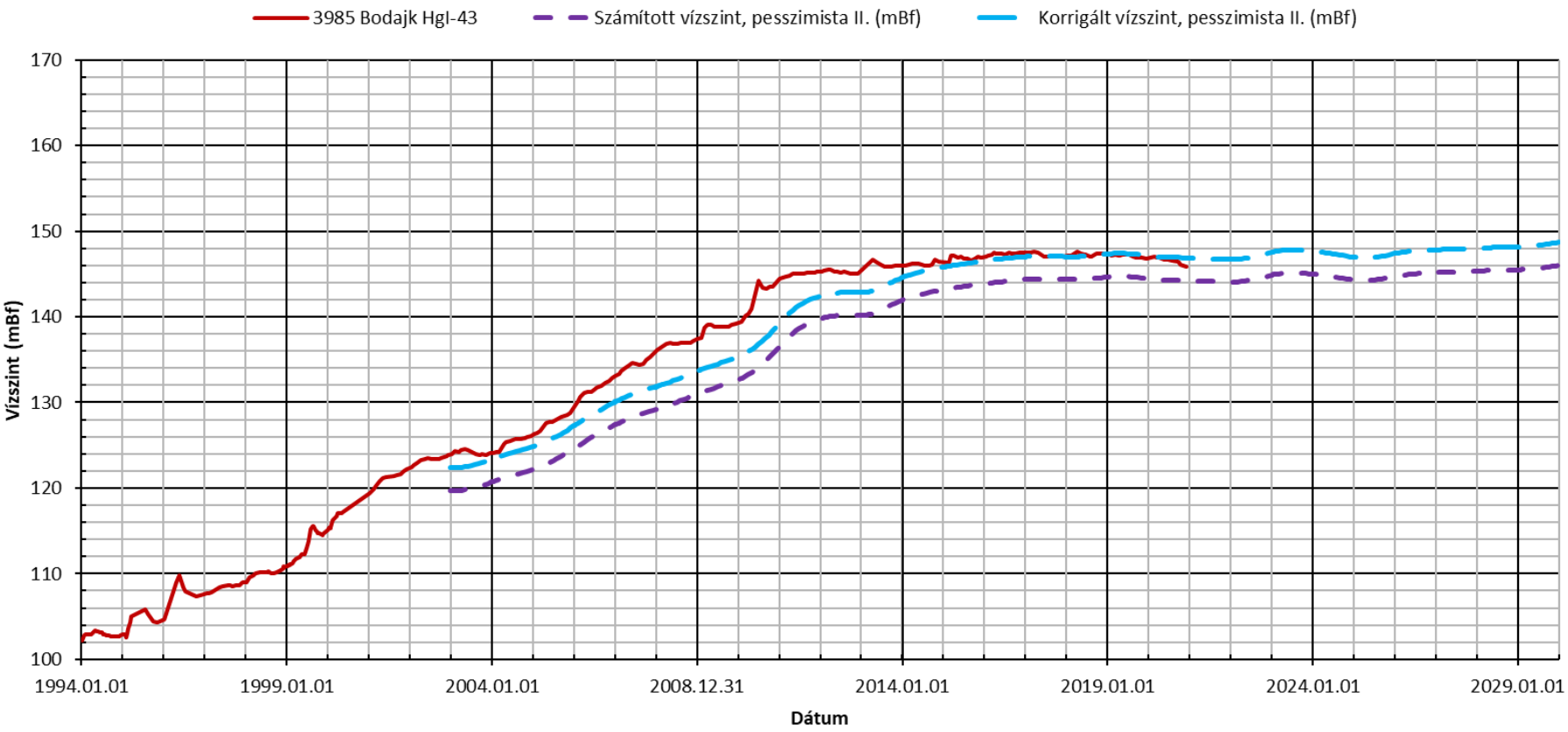
A Bodajk lokális modellterületen belül 2 db olyan megfigyelő kút található, melyből rendelkezünk mért vízszint adatokkal. Emellett a Csákberény-86/a és Magyaralmás HgI-45 kutak is a terület viszonylagos közelében helyezkednek el. A modell által leképezett karsztrendszer működését jól szemlélteti a modellezett és mért vízszint idősorok összevetése. A modellezett számított és a törzshálózati kutakban mért vízszint idősorokat mutatja be az ***53***. ábra-***56. ábra***. Az ábrákon piros vonal szemlélteti a mért vízszint adatokat, míg a számított vízszintek lila szaggatott vonallal vannak jelölve. A 2030-ra előrejelzett vízszintek (lásd ***4.2. fejezet***) minél pontosabb meghatározása érdekében a számított vízszintek korrigálásra kerültek a 2019. januárra mért és modellezett vízszintek különbségének értékével, melynek eredményét kék szaggatott vonal jelöli.

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

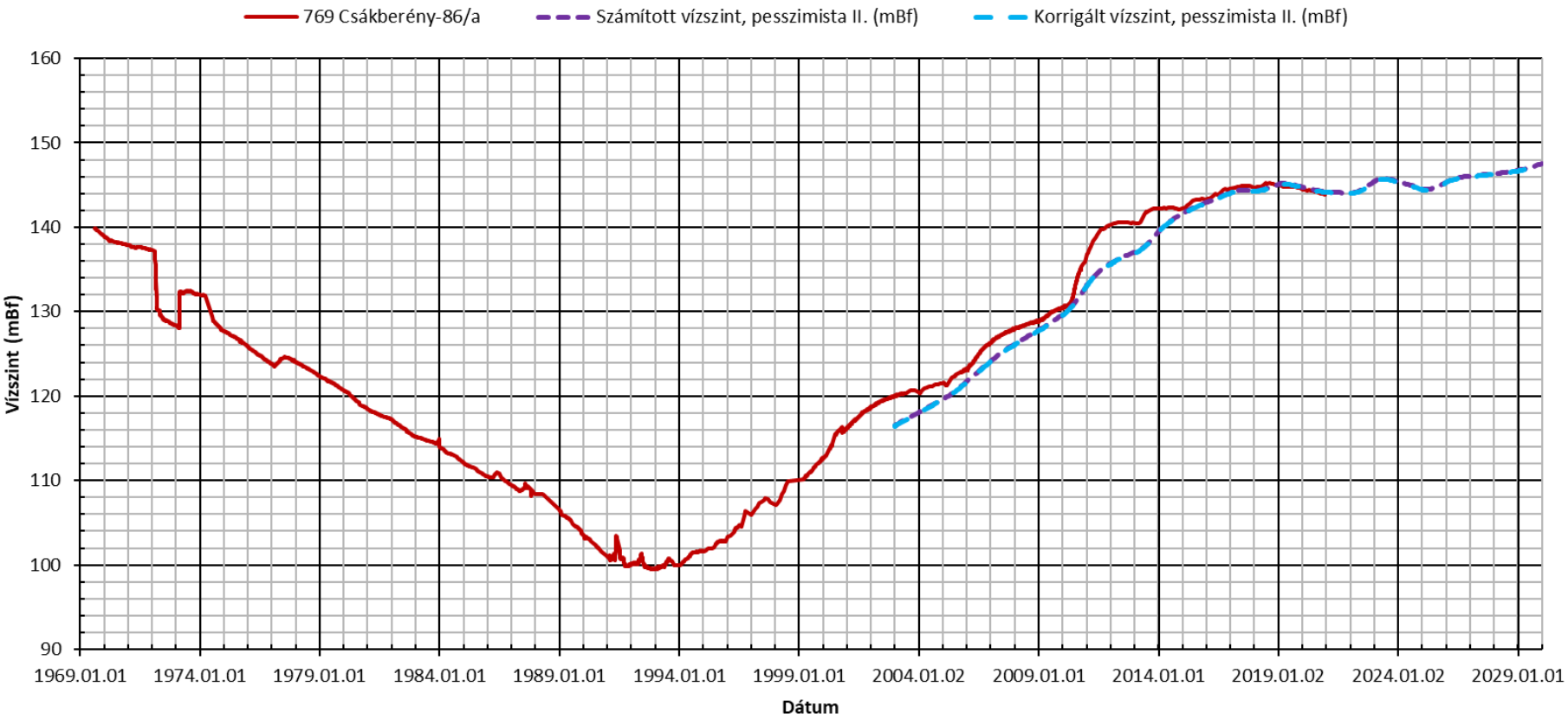
A vízszintek alakulását ezt követően várhatóan már nem a karsztvíz visszatöltődés jelensége, hanem a klimatikus viszonyoknak megfelelő csapadékesemények fogják befolyásolni, melynek hatása a fedetlen területeken várhatóan markánsabb lesz. Napjainkra új egyensúly alakult ki, ahol a feltöltődés folyamatát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



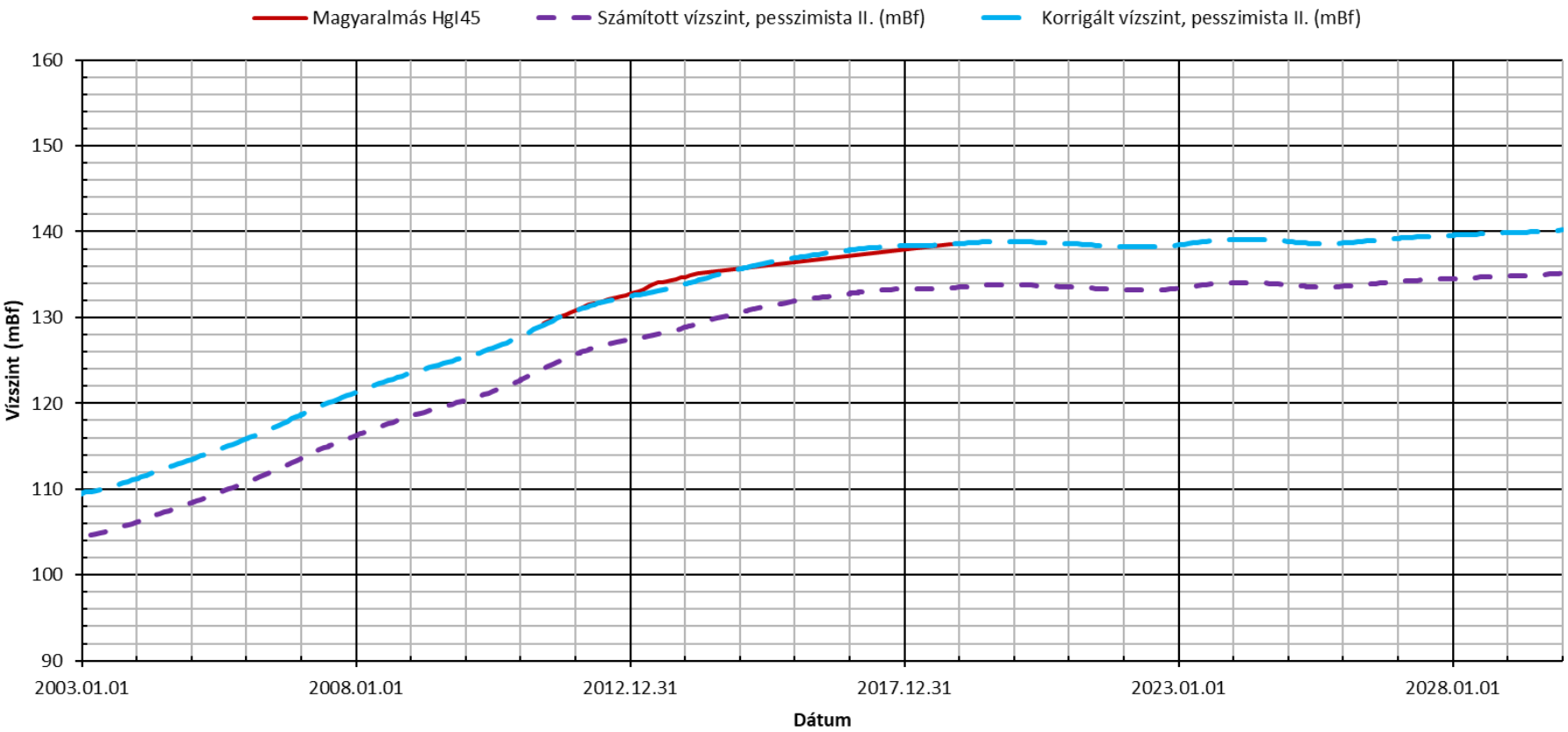
53. ábra: A Csókakő-1 monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett vízszint idősora (pesszimista 2. verzió)



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



55. ábra: A Csákberény-86/a monitoring kút mért, modellezett és korrigált modellezett vízszint idősora (pesszimista 2. verzió)



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

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

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

A területen a vízáramlás elsősorban DNy-i irányból történik, a Tési-fennsík utánpótlódási területe felől. E mellett – kisebb mennyiségben – az ÉK-i nyílt karsztos területek felől is kap vízutánpótlást a karsztrendszer. A legalacsonyabb vízszintek a rákhegyi akna közelében, a modellterület DK-i peremén 140 mBf-nél alacsonyabb értékeket vesznek fel. A lokális modellterület központi részén, Bodajk térségében több forrás is található. A visszatöltődés eredményeképpen ezek a források az 1960-as évek végi, illetve 1970-es évek eleji elapadásukat követően néhány éve ismét működni kezdtek.

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

4.2 Prognózis 2030-ra

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

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

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

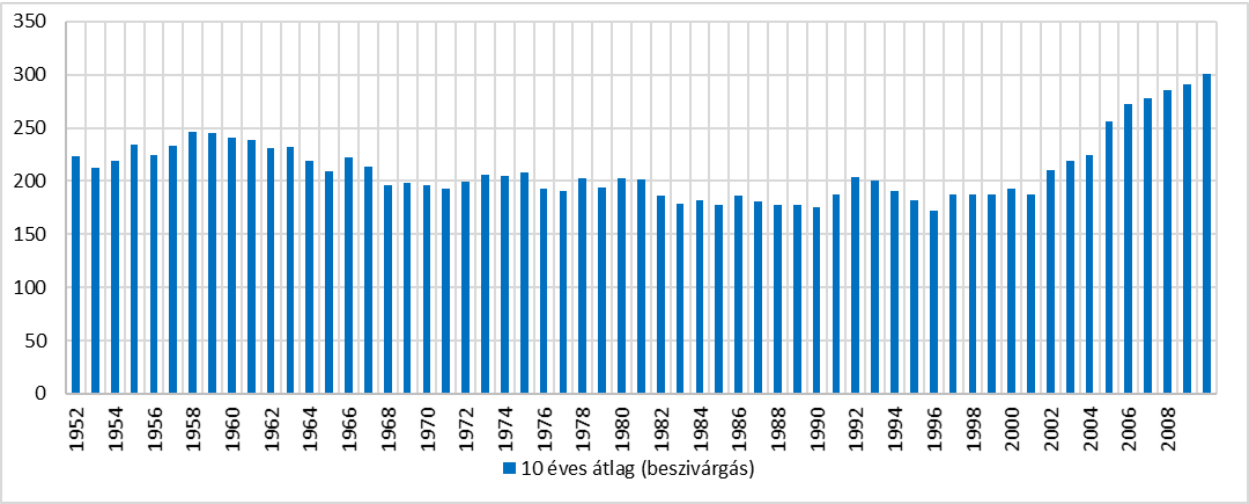
Az éghajlat változásának hosszútávú részletes elemzését, valamint a beszivárgás meghatározásának módszerét „A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése. KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Vízháztartási modellezés és állapotértékelés –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

A regionális modellezés három szcenáriót vizsgált (***8. táblázat***). A „pesszimista", „optimista" megfogalmazás a potenciális vízkárok szempontjából vizsgálja a karsztvízszint változását. A legmagasabb karsztvízszint a pesszimista változat esetén várható.

8. táblázat: A regionális modellezés során használt szcenáriók

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

A Bodajk lokális modellterület beszivárgás szempontjából a Bakonynána csapadékállomás körüli zónában helyezkedik el. A hosszútávon jellemző tízéves átlag beszivárgás értékeket az ***57. ábra*** mutatja.



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

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

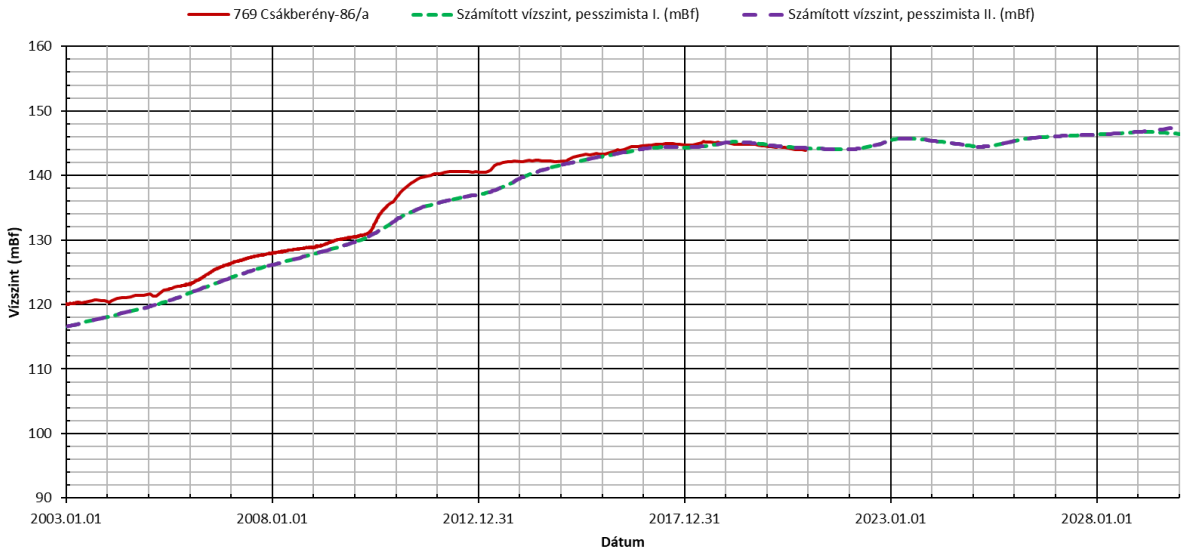
Ez alapján a tranziens lokális modell előrejelzési időszakára (2019-2030) az alábbi két modellszcenárió készült el:

- *Pesszimista 1.*: Ebben a verzióban a regionális modellből már ismert beszivárgásadatokkal dolgoztunk, azaz az előrejelzési időszakban a legnagyobb beszivárgásmennyiséggel

jellemzett 10 év (2009-2018) adatait használtuk fel. Továbbá a teljes időszakra 2018. év tény vízkivételei lettek megadva.

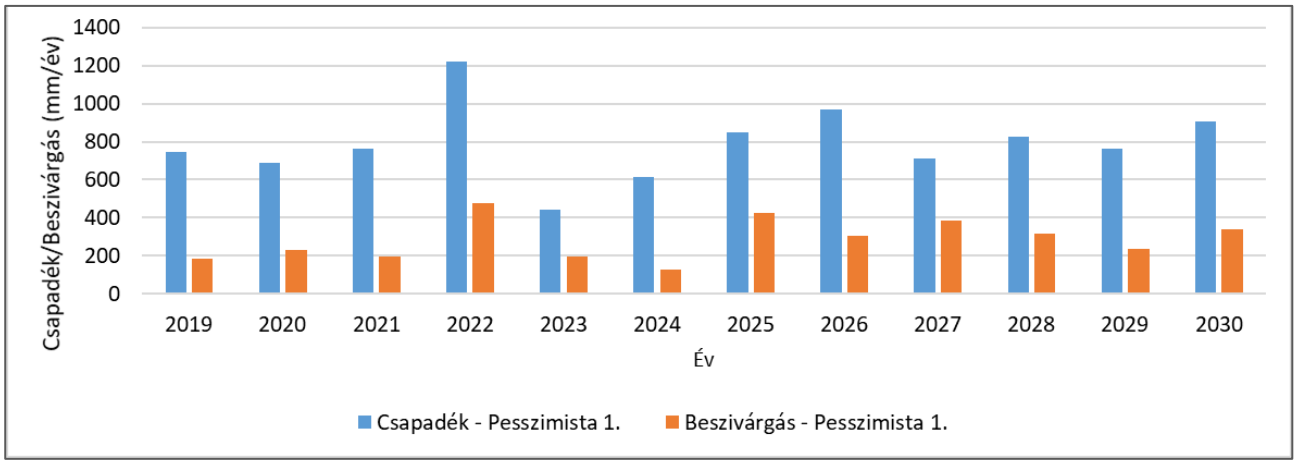
- *Pesszimista 2.*: Ez a verzió egy veszélyeztetettségi (lásd ***5. fejezet***) szempontból még pesszimistább csapadékkal számol a 2030-as évre. Ez azt jelenti, hogy a 2020-2029 közötti időszakra a pesszimista 1. verziónak megfelelő beszivárgásértékekkel kalkulál (2009-2017 beszivárgásadatai) a modell, míg a 2030-as évre egy „extrém csapadékos" év, a 2010-es év beszivárgásmennyiségeivel számol. E verzió esetén is a teljes időszakra 2018. év tény vízkivételeivel számoltunk.

A két szcenárió között a különbség gyakorlatilag az utolsó, 2030-as év csapadékadatiban mutatkozik meg, amely a vízszintekben úgy jelentkezik, hogy pesszimista 1. verzió esetén az utolsó modellezett évben a vízszintek csökkennek, míg pesszimista 2. verzió esetén 2030-ban emelkedő vízszinteket láthatunk (***58. ábra***). Ez alapján azt láttuk célszerűnek, ha a pesszimista 2. verzió modellezett vízszintek értékeit tüntetjük fel az ***53-56 ábrasorozatban***.

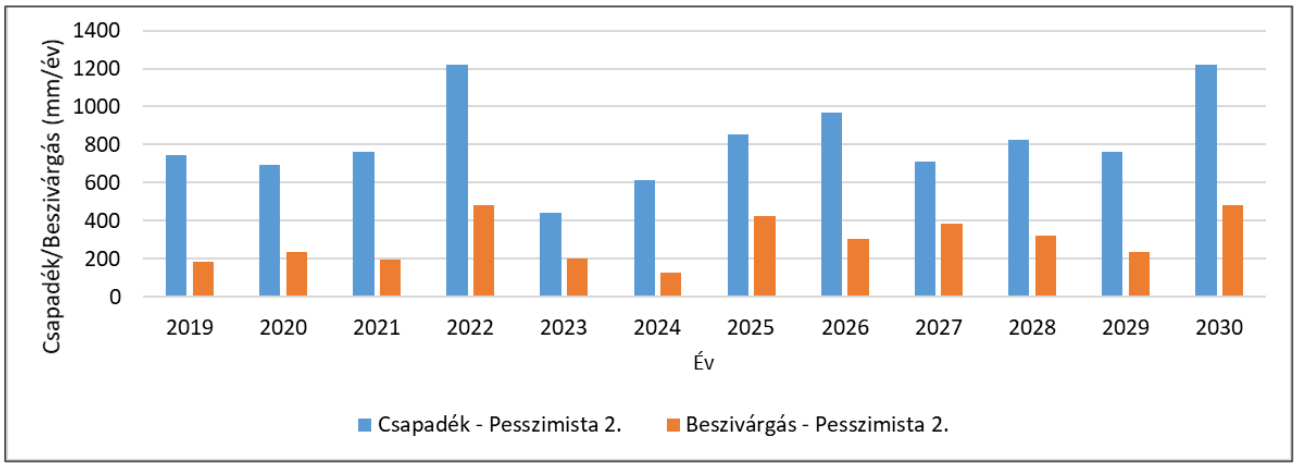


58. ábra: Mért és kétféle modellszcenárióval (pesszimista 1/2.) modellezett karsztvízszintek Csákberény-86/a kút példáján

A Bodajk lokális modellterület beszivárgás szempontjából a Bakonynána csapadékállomás körüli zónában helyezkedik el. A két modellszcenárióra, a bakonynánai meteorológiai állomás adatai alapján számolt beszivárgás- és csapadékmennyiség az ***59-60 ábrán*** látható.



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

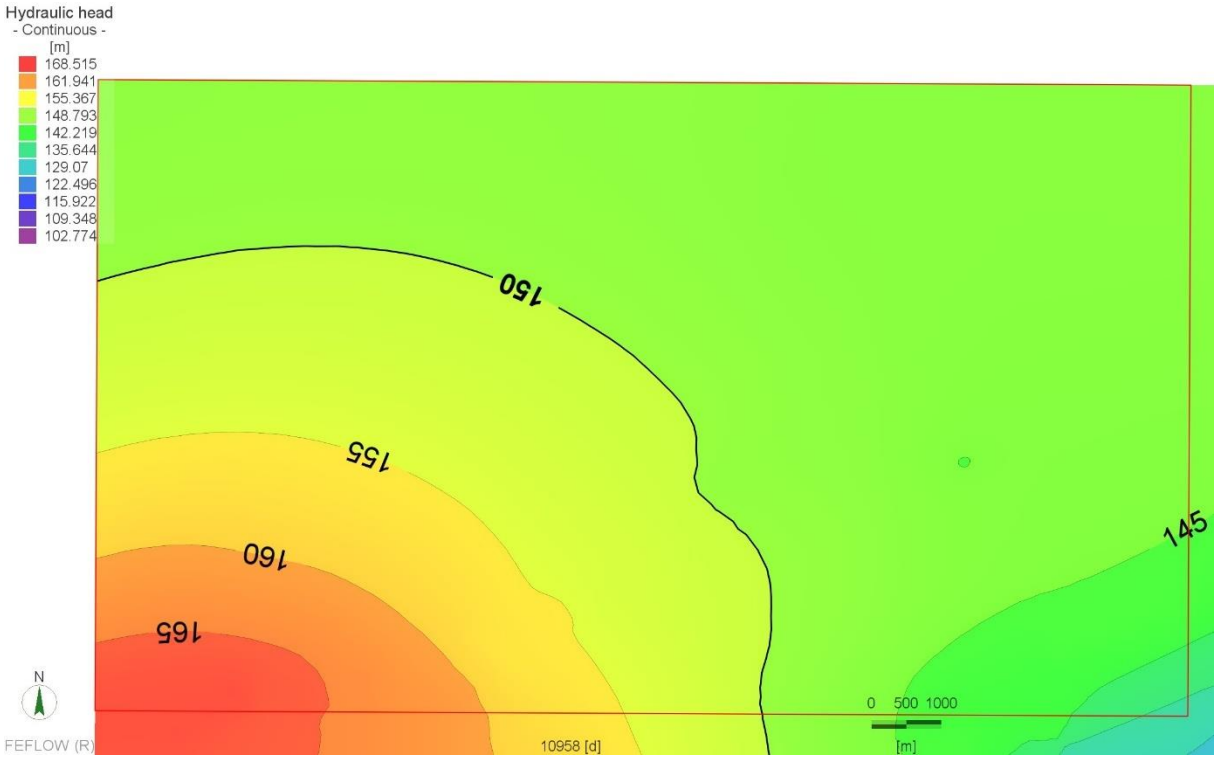


60. ábra: A pesszimista 2. szcenárió esetén figyelembe vett éves csapadék mennyiség és a beszivárgás mennyisége a bakonynánai meteorológiai állomáson mért adatok alapján

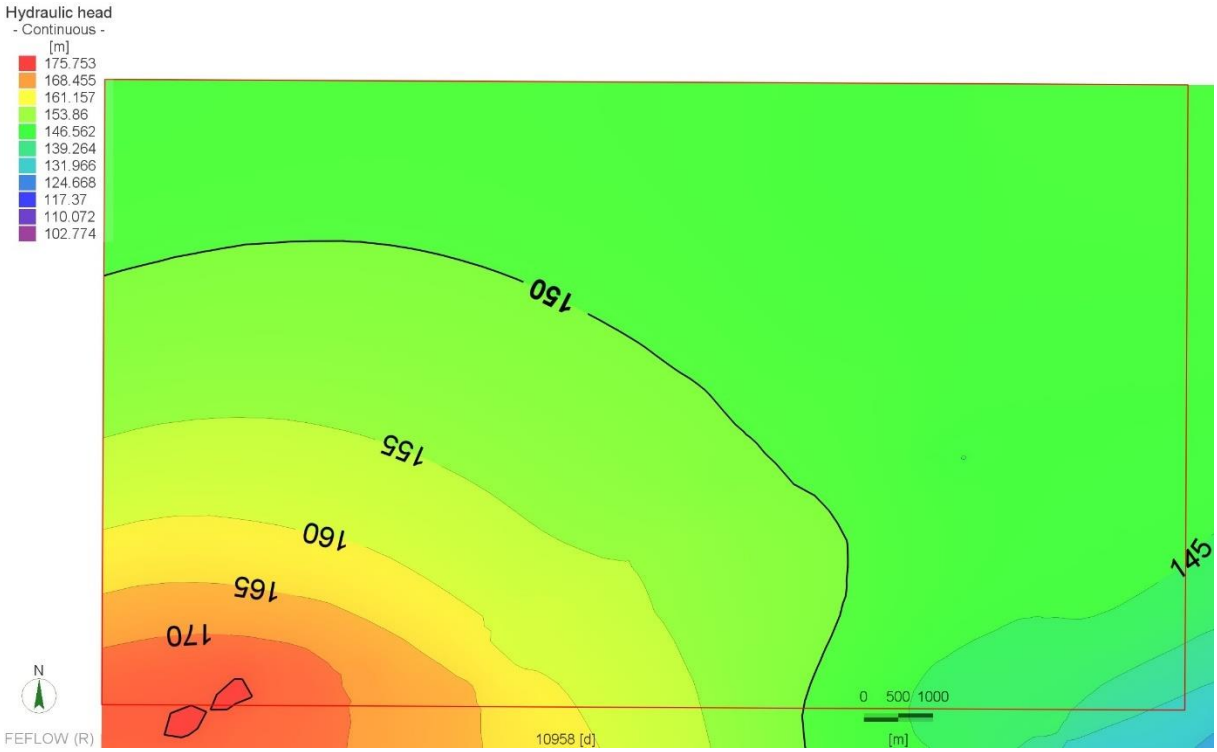
A numerikus modellben 2030-ra kétféle szcenárióval prognosztizált vízszinteket az ***61-62. ábra*** mutatja.

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

A vízszintek eloszlása várhatóan nem változik számottevően 2030-ra, egy extrém csapadékesemény hatására azonban a vízszintek várhatóan tovább nőnek. Ez elsősorban a beszivárgási területen és a Tési-fennsíkhoz közeli területeken lesz a legszámottevőbb, ahol a vízszint akár 7-8 méterrel is emelkedhet a 2019-es évhez képest. Azokon az alacsonyabban fekvő területeken is, mint Bodajk környéke a vízszintemelkedés egy extrém csapadékos esemény hatására is csak 1-2 méter körül várható. Fontos azonban figyelembe vennünk, hogy a területen található források hozamában már 1-2 méteres vízszintemelkedés is jelentős növekedést eredményezhet.



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



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

A Bodajk lokális modell elkészítése során vizsgáltuk a területen található két legjelentősebb forrás (Tó-forrás és Nádastavi-forráscsoport) hozamának alakulását 2030-ig. A két modellszcenárió alapján előrevetíthető a várható hozamnövekmény egy csapadékos időszak (pesszimista 1. szcenárió) és egy azt követő extrém csapadékos év (pesszimista 2. szcenárió) bekövetkezése esetén. A két forrás hozamának várható alakulását az ***51-52. ábrán*** mutatjuk be.

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

A Nádastavi-forráscsoport hozama egy ennél stabilabb vízutánpótlódást mutat. A csapadékviszonyok alakulása kisebb mértékben befolyásolja a forrás hozamát. A 2020-ban mért adathoz (11 894 m^3/nap) képest a pesszimista 1. szcenárió által prognosztizált 2030-as vízhozam (13 017 m^3/nap) a 2019-es érték kb. 109%-a, míg a pesszimista 2. szcenárió esetén a forrás hozama (14 761 m^3/nap) várhatóan a mért érték kb. 124%-a lesz.

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

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

5. VESZÉLYEZTETETTSÉG

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5.1. A karsztvíztároló fedőjének földtani értékelése a veszélyeztetett területeken

A bodajki lokális modellezés alapján két egymástól É-D-i irányban 1200 m-re levő nagyobb és egy az É-i területtől DK-re (a Ba-142 fúrás környéke) lévő kisebb veszélyezetetett területet tudtunk elkülöníteni. A legnagyobb veszélyeztetett terület a bodajki Tó-forrástól a Nádastavi-forrásokig tartó terület. A Bodajk és Fehérvárcsurgó közötti terület jóval kisebb, keskeny sáv a Bodajk-Fehérvárcsurgói vízfolyástól Ny-ra.

A veszélyeztetett terület térségében a felszínen az uralkodó kvarter üledékek a holocén folyóvízi homok, kavics. Ezek mellett nagyobb területekre jellemzőek a deluviális homokos, kavicsos képződmények. Fehérvárcsurgó irányában megjelenik a pleisztocén lösz is. Mivel a térségben jelentős bányászati tevékenység zajlott, nagy területen találunk feltöltést. Ezek mellett a kvartert kisebb foltokban tavi-mocsári üledékek alkotják. A kvarter üledékek alól kisebb foltokban a Kállai Kavics és a Tihanyi Tagozat képződményei is előbukkannak. Ezek mellett Fehérvárcsurgó irányában, kisebb foltban a miocén Gyulafirátóti Formáció és a Szőci Mészkő is a felszínre bukkan. Bodajk környékén több kisebb foltban is megjelenik a felszínen az É felé vastagodó kifejlődésű Csatkai Formáció. Bodajktól Ny-ra a triász Fődolomit közé ékelődve az Óbaroki Bauxit Formáció is felszínre bukkan. A triász alaphegység képződményei közül a késő-triász Fődolomit jelenik meg a felszínen, de nagyobb egybefüggő felszíni kiterjedésben csak Bodajktól Ny-ra.

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

A Nádas-tavi forrásoktól DK-re a vízfolyások völgyében a vasútállomás közelében mélyült a Ba-142 fúrás, amely környékét szintén veszélyeztetettnek mutatta a modellezés. Itt a Fődolomit felszíne

mindössze 28,5 m mélységben van a felszín alatt, felette azonban a vízrekesztőnek tekinthető Gyulafirátóti Formáció települt.

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

5.2 A modellezett veszélyeztetett területek összevetése az állapotértékelés során tapasztaltakkal

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

Bodajk környékén a lokális modellezés eredménye és a tényleges állapot jól egyezik. A lokális modellezés alapján veszélyeztetett a település egy része. Ezen a területen található a Tó-forrás és a Nádastavi-forráscsoport. Erre a területre esik a vízmű jelenleg nem használt, nem megfelelően lezárt pozitív nyomásszintű kútja is.

Ugyan az állandóan vizet adó vízműkút, illetve a Tó-forrás felől a vízelvezetést igyekeztek megoldani, mégis a település Tópart utcai házait (és magát az aszfaltozott utat is) folyamatosan fenyegeti a vizesedés. Itt a vízelvezető árkok megfelelő karbantartása mellett mindenképpen fontos lenne a kút állapotának felmérése, javítása, megfelelő lezárása, esetleges elcementezése, hiszen folyamatos problémát okoz. Mivel az egész terület egybefüggő, a vizek csak a Nádastavi-forrásokon keresztül vezetődhetnek el, ezért fontos a kivezető vízfolyás és a Nádastavi-források melletti Móri-víz jó állapotának fenntartása, a vízfolyásban a vízinövényzet gyérítése a megfelelő elvezetési vízhozam fenntartása érdekében.

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

5.3 Javaslatok

A tényleges intézkedések kidolgozásánál elsősorban az állapotfelmérés eredményeit kell figyelembe venni. Ezeket tételesen megadtuk a „*Smaragd-GSH Kft. 2021: A Dunántúli-középhegységi*

karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Veszélyeztetett területek lehatárolása." című jelentésben.

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

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

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

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

A projekt előző jelentései

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

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

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

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

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

Felhasznált irodalom

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

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

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

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

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

Felhasznált térképek

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

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

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