

KHV 1. MELLÉKLET

A CSÓRI KARSZTAKNÁBÓL TÖRTÉNŐ TÖBBLETVÍZKIVÉTEL KÖRNYEZETI HATÁSVIZSGÁLATA

A KÖRNYEZETI HATÁSVIZSGÁLAT SORÁN ALKALMAZOTT HIDRODINAMIKAI MODELL LEÍRÁSA

Szakági tervező:

Smaragd GSH Környezetvédelmi és Szolgáltató Kft.

1119 Budapest, Bikszádi utca 18/a

Témavezető: Gondárné Sőregi Katalin

Mérnöki kamarai nyilvántartási szám: 13-8286

Hidrodinamikai modellezés: Molnár Mária és Modrovits Kamilla

1. A HATÁSOK VIZSGÁLATÁHOZ ALKALMAZOTT HIDRODINAMIKAI MODELL ISMERTETÉSE

A többlettermelés potenciális hatásának vizsgálata hidrodinamikai modellezéssel történik.

Az eredeti hidrodinamikai modell az OVF megbízásából 2020-ban készült el (*Smaragd GSH 2020b*) (Továbbiakban: Regionális DKHG modell 1.0). Ennek 2023-ban elkészült egy továbbfejlesztett változata (*Smaragd GSH 2023a*) (Továbbiakban DKHG regionális modell 2.0). A Regionális DKHG modell 2.0 verzió permanens és tranziens változatban is elkészült.

A DKHG regionális modell 2.0 verzió a DRV Zrt. balatoni felszíni vízkivételének kiváltására, a Rákhegy II. karsztaknából és a nyirádi vízbázisról történő többletvíz kivétel környezetvédelmi hatásvizsgálatához készült. A regionális modell használatát akkor az indokolta, hogy a tapasztalatok szerint a bányászati vízkivételek időszakában, amikor az összes nagy vízakna egyszerre nagy hozammal termelt, regionális hatást értek el.

Jelen esetben is ugyanaz az a helyzet: a Csóri karsztakna és a nyirádi vízbázis a jelenlegihez képest jelentős többlettermeléssel fog termelni.

A hatásvizsgálat módszerét és eredményeit az illetékes vízügyi és környezetvédelmi hatóságok elfogadták.

Az alkalmazott szoftver a WASY Ltd. által fejlesztett FEFLOW 7.2 (véges elemes módszert alkalmaz). A modellezés tranziens volt.

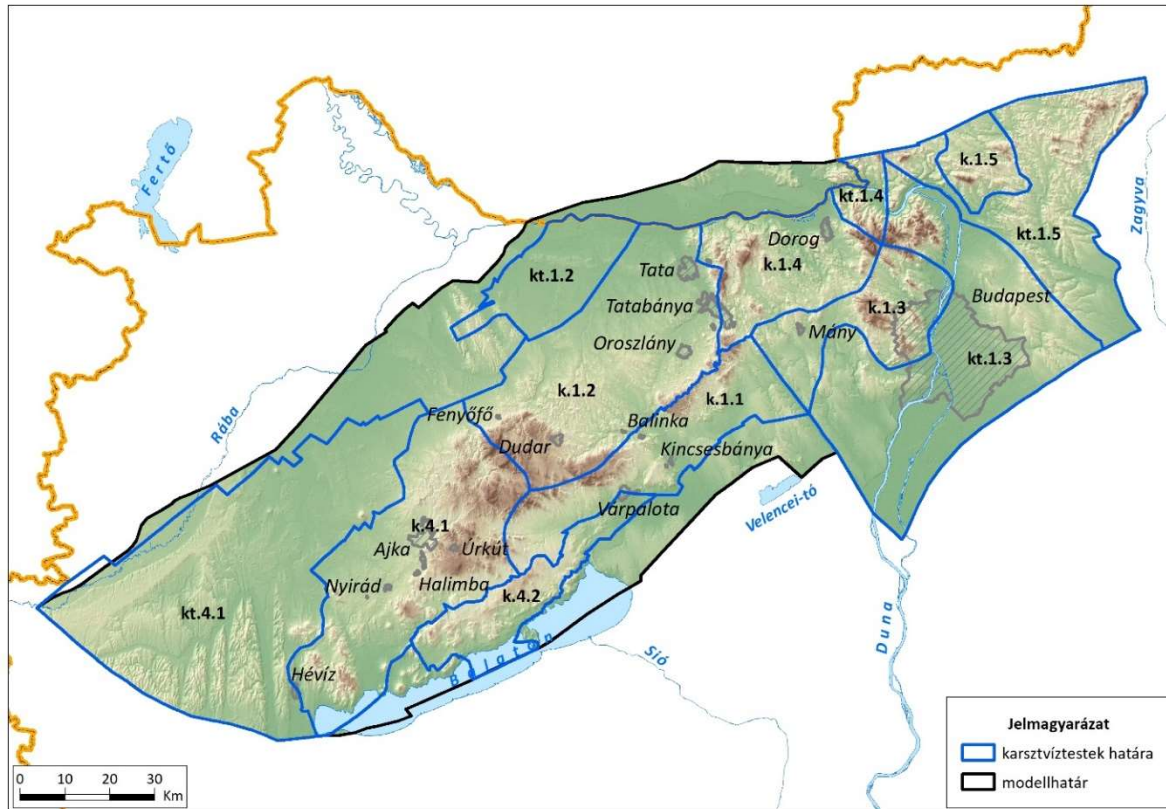
A tárgyi modellezést a DKHG regionális modell 2.0 kalibrált, elfogadott verziójának továbbfejlesztésével készítettük. A modellben alkalmazott változtatások (rácsáló sűrítés, szivárgási tényező pontosítás stb.) elsősorban lokálisak és a csóri karsztakna közvetlen térségére vonatkoznak. Az alkalmazott változtatásokat a következőkben, a vonatkozó fejezeteknél ismertetjük.

1.1. A modell felépítése

1.1.1. A numerikus modell területe

A numerikus modell területe a teljes Dunántúli-középhegységi karsztvíztároló, a hideg és termál karsztvíztestek egyaránt (**1. ábra**), ez megegyezik a KEHOP-1.1.0-15-2017-00010 számú projekthez (*Smaragd GSH 2020b*) készített regionális modell határával. A modell területe magába foglalja a főkarsztvíztároló nyílt karsztos, és harmadkori rétegekkel fedett alaphegységi területeit is a Zalai-medencétől a Zagyva-vonalig, valamint a Balaton-felvidék karsztos tárolóit is. A numerikus modell területe közel 17 000 km².

A karsztvíztárolót a Magyar Állami Földtani Intézet (továbbiakban MÁFI, jogutódja: Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága – továbbiakban SZTFH) által kiadott Magyarország pre-kainozoos M=1:500 000 méretarányú térképe alapján (*Haas és mts. 2010*) [16] határoltuk le a permi vagy annál idősebb képződmények határát követve. A karsztvíztároló északon – néhány km² erejéig – Szlovákia területére is átnyúlik, ahol a határokat Szlovákia földtani térképe alapján határoltuk meg. Ez a terület megegyezik a Dunántúli-középhegység hideg és termál karsztvíztestjeinek határával. Ugyanakkor a numerikus modell ennél egy kicsit nagyobb területet foglal magában. Ennek oka nyugaton a numerikus modell határvonalának egyszerűsítése, DK-i részen pedig az, hogy a fedő porózus kőzetekbe átadódó vizet is modellezni lehessen (*Smaragd GSH 2020a*) [5].



1. ábra: A Dunántúli-középhegységi karsztvíztároló és a numerikus modellezés területének perspektivikus domborzati térképe (Smaragd GSH 2020a) [5]

1.1.2. A numerikus modell geometriai felépítése, numerikus rétegek

A vízáadó rétegek geometriájának meghatározása, vagyis az egyes képződmények horizontális és vertikális elterjedésének minél pontosabb lehatárolása a numerikus modell elkészítésének fontos lépése. A numerikus modellezés során a különböző vízföldtani tulajdonságú képződmények leképezése/csoportosítása hidrosztratigráfiai egységeken keresztül történik.

A csóri karsztakna környezetének földtani felépítését a KHV **5.3.4.1 fejezete** foglalja össze.

A numerikus modell vezérszintjeit alkotó hidrosztratigráfiai egységek a következők:

- Főkarszt (pre-albai képződmények)
- Függőkarsztos rétegcsoporthatár – vízrekesztő képződmények
- Függőkarsztos rétegcsoporthatár – mészkő
- Alsó-pannon – miocén – oligocén képződmények
- Kvarter és felső-pannon képződmények

A triász és alsó-jura korú karbonátos kőzetek alkotják a főkarsztvíztároló összletet, amely regionális elterjedésű, nagy vastagságú, kiváló vízvezető képességű képződmény.

A fedő képződmények mind vertikálisan, mind horizontálisan változó kiterjedésűek, az egyes képződmények elterjedése néhol elszórt/foltszerű. A teljes Dunántúli-középhegységet megjelenítő modell felépítése során a fedőképződmények összevonására volt szükség.

Tehát 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.

A numerikus modellben rétegeket kiékelni nem lehet. Ezt figyelembe véve, ahol az adott hidrosztratigráfiai egység nem fordul elő, ott a rétegvastagságot 5 m-nek tekintettük. Ezeken a helyeken a modellezés során paraméterváltással lehet közelíteni a valós földtani felépítést.

A hidrosztratigráfiai rétegek felszínéből szerkesztett numerikus rétegeken kívül, a főkarsztot eredetileg még további három rétegre osztottuk, amelyet a főkarszt horizontálisan különböző, mélység felé csökkenő vízvezetőképessége, illetve a túl vastag modell elemek elkerülése indokolt. Jelen projekt során a főkarsztos hidrosztratigráfiai egységben további 1 db segédreteg felvételére volt szükség, amelyet a csóri karsztakna szintjéhez igazítottuk.

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 5-6. modellréteg szolgál.

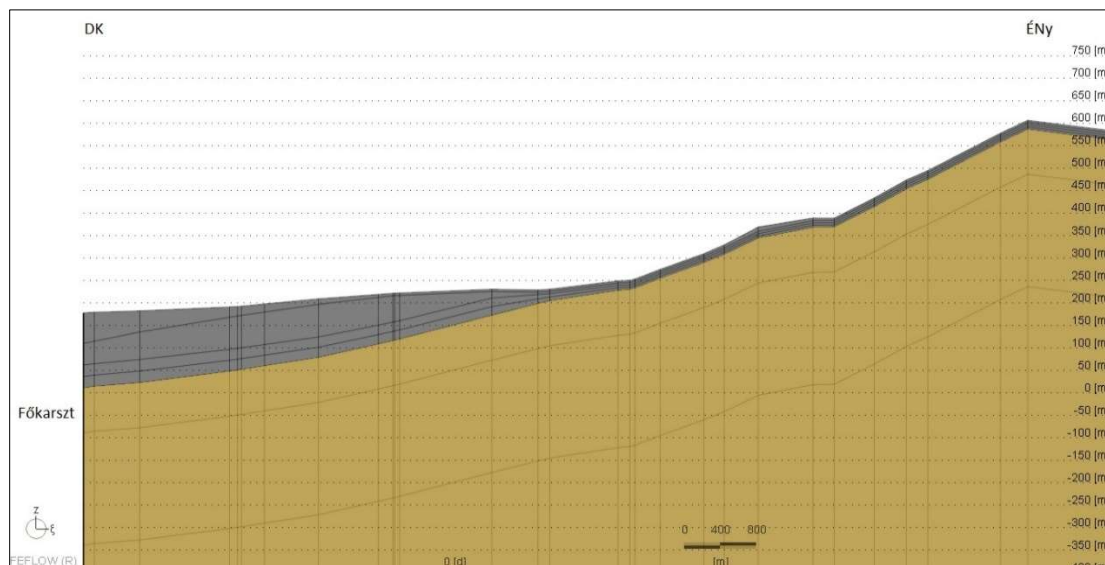
Az egyes rétegek felszínét az ArcGIS Desktop 10.5.1 térinformatikai szoftver családdal szerkesztettük.

A vízkivétel minél pontosabb elemzése érdekében, a korábban készített regionális modellekhez (*Smaragd GSH 2020b, 2023a*) [6][10] képest a csóri karsztakna 10 km-es körzetén belül a karsztvíztároló felszíne további pontosításra került. Ez a pontosítás részben a térségben található néhány fúrás rétegsora, valamint a karsztakna közvetlen közelében végzett geofizikai mérések alapján valósult meg.

A fentiek alapján jelenleg alkalmazott regionális modellben összesen 9 réteg és ebből következően 10 felszín különíthető el.

A numerikus modellben a terepszint képezi a felső felületet, míg a 9. réteg alsó felülete -4000 mBf szinten húzódik.

A **2. ábra** szemlélteti azt, hogy a modell geometriájának kialakítása során, miként vettük figyelembe azokat a területeket, ahol a valóságban a főkarszt a felszínen van. Ezeken a helyeken az adott rétegben a geometriai megoldáson túl, paraméterváltást alkalmazunk a főkarszt leképezésére.



2. ábra: A főkarszt kibúvás geometriai leképezése a numerikus modellben, egy DK-ÉNy-i irányú szelvényen kinagyítva (5x túlmagyasítás) (Smaragd GSH 2020b) [6]

1.1.3. A numerikus modell rácshálójának kialakítása

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

A numerikus modellezéshez használt FEFLOW program a vizsgált tér diszkrétizációjához a véges elem módszert alkalmazza.

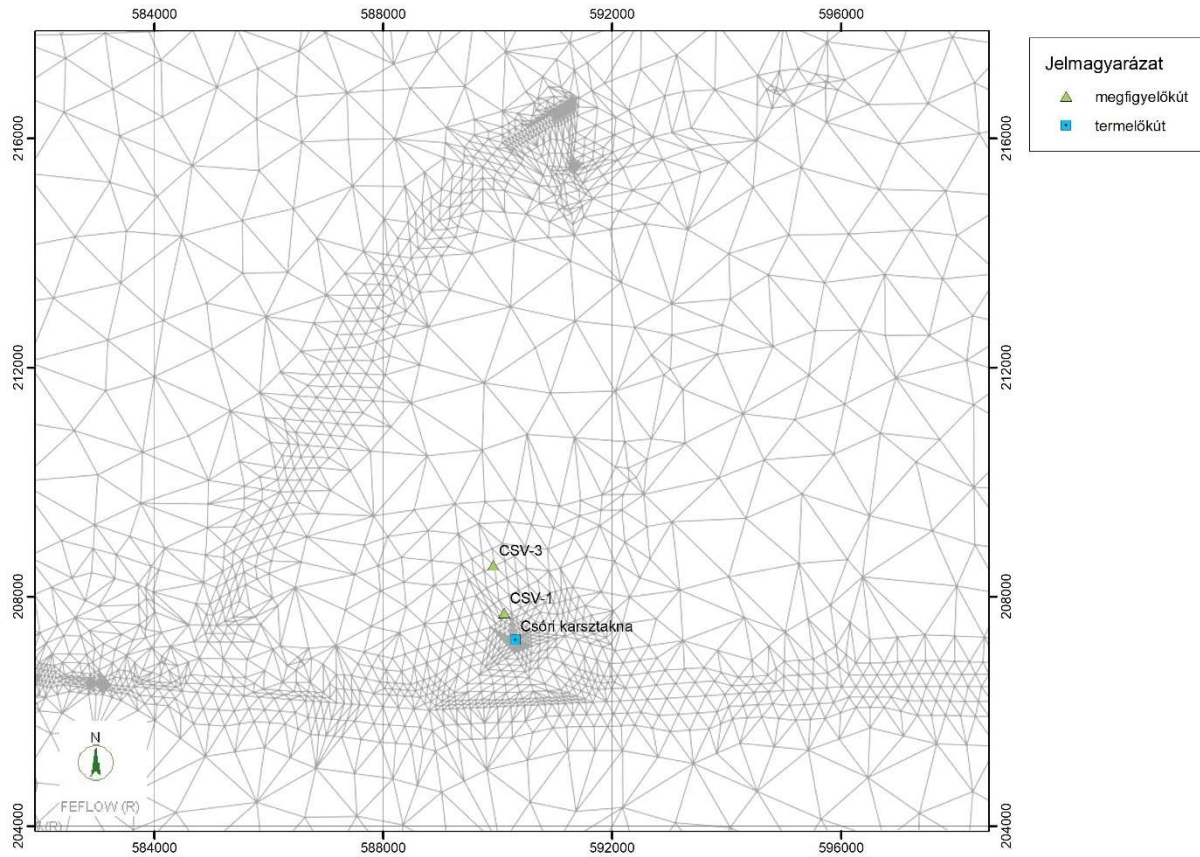
A véges elem módszer lényege, hogy a modellezni kívánt teret tetszőleges számú és alakú elemre bontjuk. Az elemek egymással csomópontjaikon keresztül kapcsolódnak, illetve a csomópontok koordinátái határozzák meg térbeli helyüket. Az elemek lehetnek egy-, két- és háromdimenziósak, ezáltal az elemháló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

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:
 - hideg karsztvíztest területén a karsztot, illetve a fedőt megcsapoló termelő objektumok, kivéve a partiszűrűsű vízkivételeket
 - a termál karsztvíztest területén a karsztot megcsapoló termelő objektumok
 - minden karsztforrás a Smaragd-GSH Kft. által a KEHOP-1.1.0-15-2017-00010 számú projekt keretében 2019-ben végzett forrásfelmérés alapján [4]
 - törzshálózati karsztvízszint észlelő monitoring kutak
- Vonal elemek:
 - egyszerűsített vetőhálózat
 - egyszerűsített folyó és kisvízfolyások hálózata

A modellterület nagyrésztét tekintve a korábbi regionális modellben alkalmazott rácsháló kiosztását megtartottuk. A csóri karsztakna környezetében a rácsháló sűrítésre került sor. Ezen felül rácsháló sűrítést alkalmaztunk a karsztakna térségét határoló jelentősebb vetők mentén.

A rácshálókiosztást a csóri karsztakna térségében az **3. ábra** mutatja be.



3. ábra: A numerikus modell rácshálóját a csóri karsztakna térségében

1.1.4. A numerikus modell hidraulikai paraméterezése

1.1.4.1. Szivárgási tényező értékek a numerikus modellben

A numerikus modellek a szivárgási alapegyenlet iterációs 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 hidraulikus emelkedési magasság értékeket a tér minden egyes pontjára.

A vízföldtani tulajdonságok közül a szivárgási tényező határozza meg a különböző kőzettestekben a vízáramlás sebességét, ezáltal a vízszint eloszlást is befolyásolja. A Dunántúli-középhegység területén alkalmazott szivárgási tényező értékek nagyrészt megegyeznek a KEHOP-1.1.0-15-2017-00010 számú projekt (*Smaragd GSH 2020b*) [6] során alkalmazott szivárgási tényező értékekkel, de a csóri karsztakna közvetlen térségében a szivárgási tényező értékek kismértékben változtatásra/pontosításra kerültek (**1. táblázat**).

A modellezés területén előforduló kb. több száz különböző kőzettest hidraulikai paraméterezésénél nagyfokú egyszerűsítést kell alkalmazni, így a bemutatott hidrosztratigráfiai csoportok adták az alapját a parametrizálásnak. Ezeket a hidrosztratigráfiai csoportokat különböző K-tényező értékkel jellemezhetjük.

A karsztos képződmények szivárgási paramétereinek meghatározásakor az alapkoncepció az volt, hogy a felszínen megtalálható, jobban karsztosodott, repedezett, mállott képződmények nagyobb értékkel rendelkeznek, mint ugyanezen képződmények fedett helyzetbe. A főkarszt felszíni kibúvásainál, a bányászati víztelenítés során számolt és mért transzmisszivitás értékekből becsültük a szivárgási tényező értékeket (*Schmieder és Szilágyi 1988*) [18]. Az egyéb kőzetekre jellemző K-tényező értékeket a T-JAM projekt (*Fodor és mts. 2011*) [19] eredményei szerint vettük figyelembe.

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

A főkarsztvíztároló felszíni kibúvása az 1-4. numerikus rétegekben végig reprezentálva van szivárgás hidraulikai paraméterekkel, így küszöböltük ki, hogy a modellben rétegeket nem lehet kiékelni. A fedett karsztot az 5-9. rétegek szivárgási paraméterei képviselik, míg a porózus harmadidőszaki képződményeket az 1-4. numerikus rétegekbe építettük be.

A valóságban, az idősebb karbonátos kőzetek és a fiatalabb üledékes kőzetek egymás mellett fordulnak elő, ezt a modellben, a geometriai megoldáson túl paraméterváltással lehet leképezni. A különböző korú kőzettestek vertikális elterjedése sem azonos, ezt a modellezés során igyekeztünk figyelembe venni.

1.1.4.2. A csóri karsztakna tágabb környezetének paraméterezése

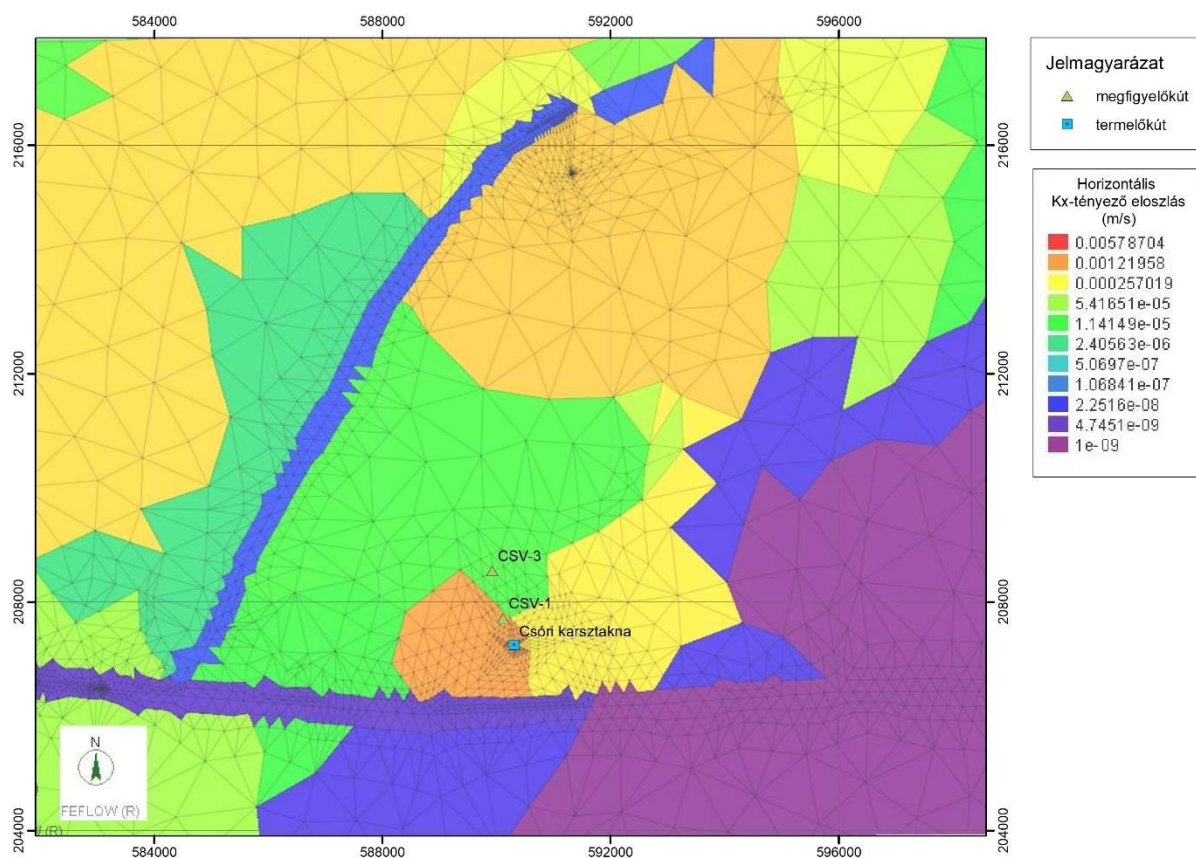
A csóri karsztakna térségében, Csór településétől északra viszonylag nagy kiterjedésben nyílt karsztos terület jelenik meg. A nyílt karsztos területek az 1-4. rétegekben alkalmazott jó szivárgási-tényező értékekkel lettek reprezentálva. Az 1-4. rétegekben a nyílt karsztos területet különböző vezetőképességű sziliciklasztos képződmények veszik közre.

Az 5-9. rétegben a szivárgási tényező értékeket elsősorban a tektonizáltság, illetve a karsztaknák térségében (Csór, Rákhegy) a vízkivételek kőzetre gyakorolt hatása határozta meg. Továbbá a mélység növekedésével a képződmények egyre kisebb szivárgási tényező értékekkel rendelkeznek.

A modellben alkalmazott vetőhálózatot úgynevezett 2D-s vertikális elemekkel (diszkrét elemek) adtuk meg a teljes Dunántúli-középhegység területén. Továbbá a csóri karsztakna térségét közrefogó jelentősebb vetők (feltolódás és eltolódás) szivárgási tényező értékkel is beépítésre kerültek a modellbe ($K_x=K_y=1 \times 10^{-9} - 5 \times 10^{-8}$ m/s; $K_z=K_x/10$).

A csóri karsztakna környezetében megjelenő szivárgási tényező értékeket rétegenként a **1. táblázat** foglalja össze. A táblázatban bemutatott szivárgási tényezők nem a teljes rétegre, csak az adott

formáció valós elterjedési területeire vonatkoznak. A karsztakna térségében a numerikus modellben használt K-tényező eloszlást a vízadó 6. numerikus rétegre a **4. ábra** mutatja be.



4. ábra: A 6. rétegben (vízadó szint) alkalmazott horizontális K-tényező eloszlás a csóri karsztakna térségében [m/s]

1. táblázat: Az egyes képződmények K-tényező értéke a numerikus modellben a csóri karsztakna térségében

Réteg	Litológia		Szivárgási tényező [m/s]						Vastagság [m]
			Kx		Ky		Kz		
1.	karsztosodott mészkő, dolomit (triász)	sziliciklasztos fedőképződmények (kvarter/pannon/miocén/oligocén)	1,00E-03 - 1,00E-04	7,00E-08 - 5,00E-05	3,00E-04 - 5,00E-05	Kx	2,25E-04 - 3,00E-05	Kx/5 vagy Kx/10	5-200
2.									5-300
3.									5-70
4.									5-80
5.	változó mértékben karsztosodott mészkő, dolomit (triász)/ <i>vetőzónák a karsztban</i>		9,00E-04 - 2,5E-06/5,00E-09 - 5,00E-08		Kx/2		2,25E-04 - 2,5E-07/5,00E-10 - 5,00E-09		50
6.									50
7.			4,00E-04 - 5E-07/3,00E-08 - 3,00E-09	1,00E-04 - 5E-08/3,00E-10 - 3,00E-09			250		
8.			5,00E-09 - 5,00E-08/1,00E-09 - 1,00E-08		2,50E-09 -2,50E-08/1,00E-09 - 1,00E-08		Kx/10		1700-2000
9.									1700-2000

1.1.4.3. 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 numerikus modellezéshez számolt fajlagos tározás értékeit a **2. táblázat** mutatja be. A fajlagos tározás számításához szükséges, köztetre jellemző teljes porozitást a T-JAM (Fodor és mts. 2011) alapján, míg a közeg kompresszibilitását az Domenico és Schwartz, 1990-es munkája szerint határoztuk meg.

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 $\rho g\alpha$ a kompakció útján, míg $\rho g n\beta$ a víz tágulása révén felszabaduló vízmennyiséget képviseli, az n a közet teljes porozitása.

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

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

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

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

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]

A DKHG regionális modell 2.0-ben (Smaragd GSH 2023a) alkalmazott fajlagos tározás értékeken nem változtattunk a jelen projekt elkészítéséhez használt numerikus modellezés során.

2. táblázat: Az egyes hidrosztratigráfiai egységhez tartozó fajlagos tározás

Numerikus réteg	n (-)	α (1/Pa)	β (1/Pa)	g (m/sec ²)	ρ (kg/m ³)	S_0 (1/m)
1 Q-Pa2	0.35	3E-07	4.40E-10	9,81	1000	3E-03
2 Pa1-M-OI	0.4	1E-08				1E-04
3 Függőkarsztos rétegcsoport - mészkő	0.03	1E-09				1E-05
4 Függőkarszt rétegcsoport - vízrekesztő	0.02	1E-08				1E-04
5 Pre-albai	0.02	5E-09				5E-05
6 Pre-albai segédréteg	0.02	3E-09				3E-05
7 Pre-albai segédréteg	0.02	1E-09				1E-05
8 Pre-albai segédréteg	0.015	5E-10				5E-06

1.1.4.4. Effektív porozitás a numerikus modellben

Az effektív porozitás érték a permanens hidrodinamikai modellben a teljes területre átlagos porozitás értékkel került megadásra, 0,02 (átlagos) értékkel.

1.1.5. Peremfeltételek a numerikus modellben

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

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

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

A KEHOP-1.1.0-15-2017-00010 számú projekthez készített regionális modellben alkalmazott (*Smaragd GSH 2020b*) [6] peremfeltételeken nem változtattunk a jelen projekt elkészítéséhez használt numerikus modellezés során.

1.1.5.1. 1. típusú (Head)-Dirichlet peremfeltétel

A teljes modellterületre vonatkozóan a felmért forrásokat fakadási szintjeikkel határoztuk meg az 1. numerikus felszínen, azzal a kitételrel, hogy mindenképp kifolyóként kell viselkedniük.

A pre-albai felületek mentén a modell oldalsó peremeihez (5-10. felületek), adott nyomású, hidraulikus emelkedési magasságot rendeltünk, mint 1. Dirichlet típusú peremfeltétel. Ezek értékeit Lorberer 1951-es karsztvízszint térképe alapján határoztuk meg. A modell oldalain, ahol az idősebb ordovicium-devon képződmények találhatóak, feltételezhetően nincs be- és kiáramlás, így azok zárt

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

1.1.5.2. 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.

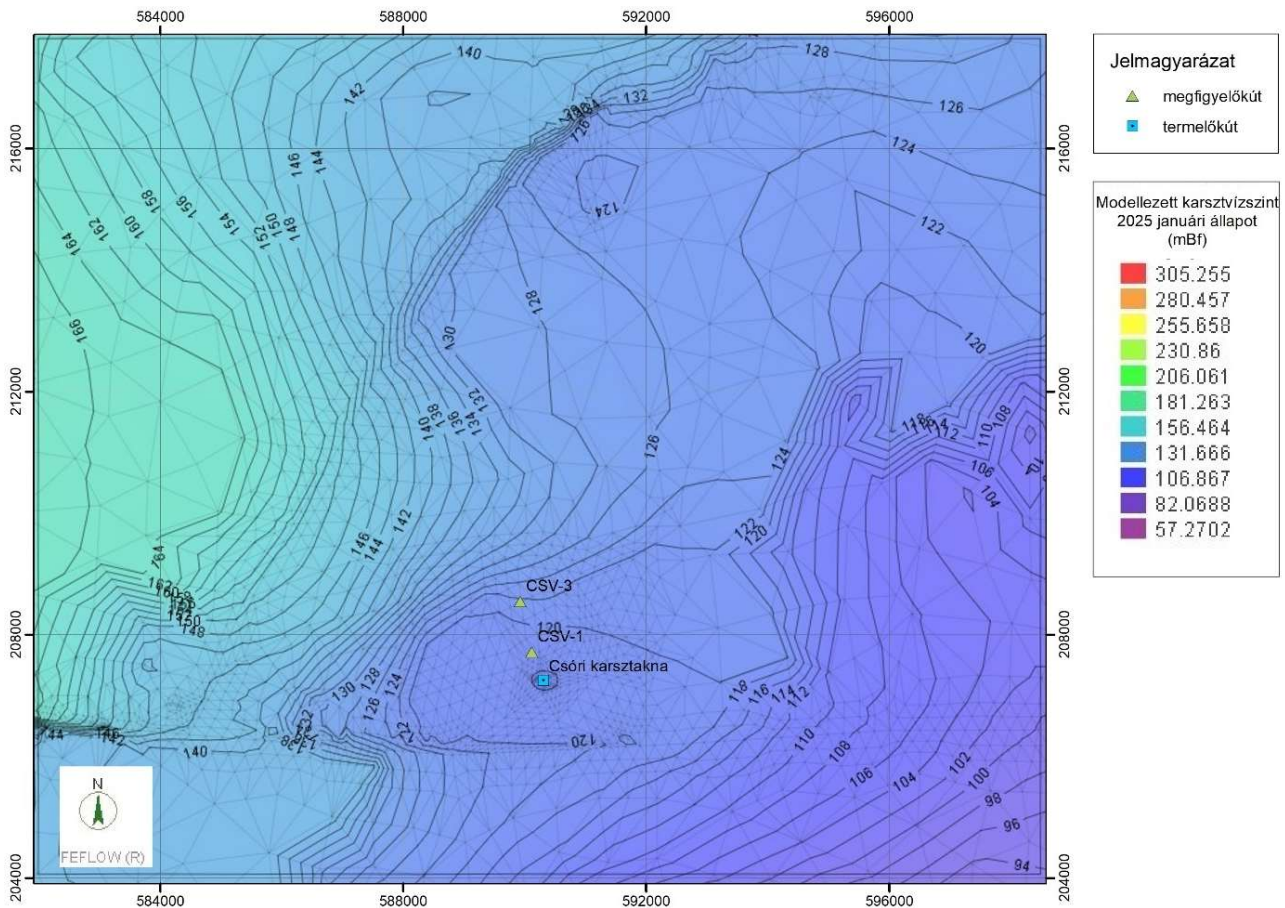
A kontrollálatlan hozambeáramlás miatt a peremfeltételt korlátoztuk, csak fakadást engedélyeztünk. Az átszivárgási együttható egységesen 0,04 1/nap.

1.1.6. A numerikus modell kalibrálása

A 2023-as projekt (*Smaragd GSH 2023a*) [9] során a tranziens modell kalibrációjához összesen 224 monitoring kút nyugalmi vízszint adatát használtuk fel. Ezen felül kiegészítettük 68 db DRV üzemeltetésében lévő monitoringkút adatával. A 2023-as projekt során tranziens modellt a 2022 január 1. állapothoz is kalibráltuk.

Jelen vizsgálat során a csóri karsztakna térségében található megfigyelőkutak mért vízszintadatait 2025 elejéig frissítettük. Továbbá a modellbe építettük a vízbázis CSV-1 és CS-3 megfigyelőkútjainak vízszintadatait. A kalibrációt (a szivárgási tényezők finomhangolását) a 2025. január 1.-i (vagy a januári mért) adathoz igazítottuk.

A vízádóra (6. réteg) modellezett karsztvízszint eloszlást a 2025-ös állapotra Csór térségében az **5. ábra** mutatja.



5. ábra: A modellezett karsztvízszint a csóri karsztakna térségében, a vízadó 6. numerikus rétegben, a csóri karsztakna engedélyezett (13 150 m³/nap) termelése mellett, 2025. január 1. (mBf)

1.2. A tranziens modell tervezett időintervalluma

A DKHG regionális modell 2.0 verzióban az időintervallumot az indokolta, hogy figyelembe lehessen venni a karsztvíztároló feltöltődésének folyamatát, valamint legalább két éghajlati ciklust (egy éghajlati ciklus kb. 30 éves periódus) lehessen vizsgálni. A második ciklus (2022-2050) a hatások vizsgálatának időszak volt.

A DKH projekt eredményei azt mutatják, hogy az éghajlati hatás most már felülírja a feltöltődés folyamatát, tehát a feltöltődés folyamatával már nem kell számolni. A modell méretének csökkentése és a futtatási idő optimalizálása céljából célszerűnek láttuk a modellezési időt lecsökkenteni. Jelen projekt során a futtatás – egy kis ráhagyással – 2005. január 1-től 2050. január 1-ig tartott, míg a modellezési eredmények 2010. január 1-től kerülnek bemutatásra.

A hatások vizsgálatának kezdeti vízszintje a 2025 január 1-i állapot, a változásokat 2050-ig vizsgáljuk, távolabbi időpont vizsgálatának a bizonytalanság miatt nincs értelme.

1.3. A termelések mennyiségének figyelembevétele, a modellezés időlépcsője

A környezeti hatásvizsgálat alapját a tranziens numerikus hidrodinamikai modellezés képezi. A termelések hatását 2050-ig modellezzük. A tranziens modellezés lényege, hogy a termelést 2024-ig éves, majd 2025-től havi időlépcsőben modellezi, így a modellezés során a prognosztizált vízkivételt m³/nap mennyiségben adjuk meg havi átlagos vízkivételként. A modell a csúcsidőben jelentkező egy-egy napos maximális vízigényt nem veszi figyelembe. Minden egyes üzemelő kúthoz

hozzárendelésre kerül egy termelési érték. Ez azt jelenti, hogy a numerikus modellben minden évben a táblázatokban feltüntetett havi termelés megoszlás ismétlődik 2025 és 2050 között.

Két modellverzió készül.

- 1. scenárió: A termelés a jövőben nem változik. Eredmény: referencia karsztvízszint
- 2. scenárió: A többletvíz kivétel megvalósul a csóri karsztaknából. Eredmény: a karsztvízszint alakulása 2025-2050 közötti időszakban

A modellezés 2024-ig éves, majd 2025. januártól havi időlépcsővel (havi átlagos vízkivétel m^3/nap) történik. A havi időlépcső alkalmazásának oka, hogy várhatóan nagy a különbség a nyári és a téli vízigény között. A nyári magas vízigény csak rövid ideig áll fenn, rövid ideig fennálló, nagy hatással lehet számolni. A kialakult depressziós tér azonban az év többi részében az adott csapadék mennyiségétől függően regenerálódhat.

Az egyéb termelések a 2022-ig a tényleges, míg 2023-tól az aktuális engedélyezett termelésekkel lettek a modellbe építve. A Rákhegy II. vízakna prognosztizált termelése nem haladja meg az engedélyezett mennyiséget, így a modellben szintén az engedélyezett ($19\,178\text{ m}^3/\text{nap}$) értékkel szerepel.

A tranziens modell két verzióban készült el. Az egyik verzióban (1. scenárió) a csóri karsztakna az engedélyezett termeléssel üzemel, míg a másik verzióban (2. scenárió) a termelés a távlati vízigény szerinti. A két modellverzió különbsége adja a többlettermelés miatti várható hatást. A modellverziókban alkalmazott termeléseket a **3. táblázat** foglalja össze.

A modellezett termelések csak a Csóri karsztakna esetében változnának a DKHG regionális modell 2.0 verzióhoz képest. A nyirádi vízbázis termelése a 2023-ban meghatározott és a modellbe már beépített prognosztizált vízigény szerint történt.

3. táblázat: A termelések figyelembevétele a tranziens modellezés során

		Csór karsztakna		Nyirád vízbázis		Egyéb víztermelő kutak	
		2010-2024	2025-2050	2010-2022	2023-2050	2010-2022	2023-2050
		éves átlagos termelés	havi termelés	éves átlagos termelés	havi termelés	éves átlagos termelés	havi termelés
1.	1. scenárió	tényleges	engedélyezett	tényleges	2022 évi engedélyezett	tényleges	2022 évi engedélyezett
2.	2. scenárió	tényleges	távlati vízigény	tényleges	távlati vízigény	tényleges	2022 évi engedélyezett

1.4. Az éghajlat változás figyelembevétele

A modellezés során az éghajlatváltozást a beszivárgás mennyiségének változásán keresztül lehet figyelembe venni.

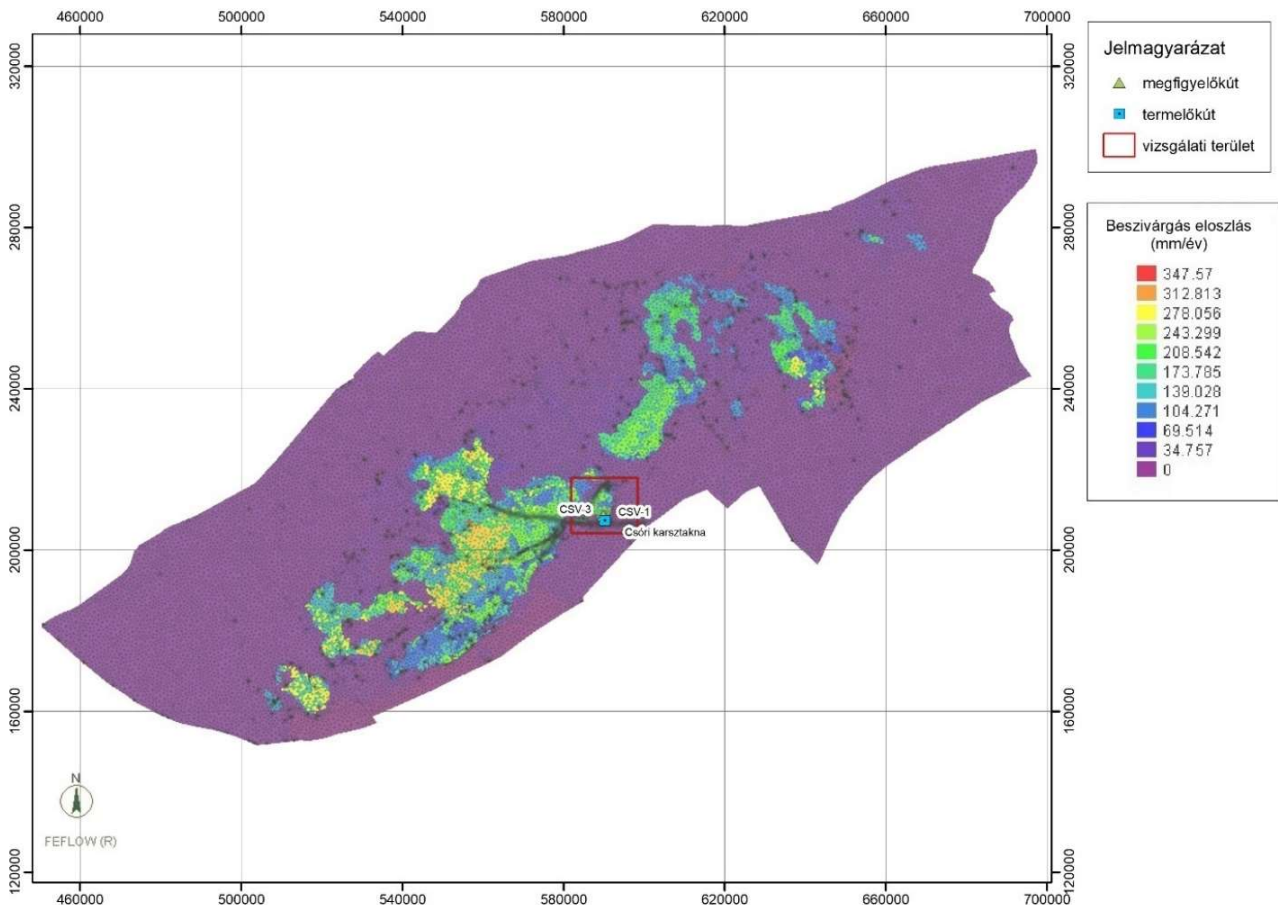
A KHV 5.9.1. *fejezetben* bemutattuk, hogy a globális éghajlati modellek alapján prognosztizált csapadéértékek nagyon bizonytalanok, ráadásul 30 éves átlagot adnak meg, idősorokkal nem rendelkezünk. A beszivárgás számításához viszont legalább napi hőmérséklet és csapadékadatra van szükség. A meteorológia évre számolt adatok ráadásul nem adják vissza a hidrológiai számításokhoz szükséges tendenciákat (nyári és téli hidrológiai félév közötti különbség).

A DKHG regionális modell 1.0 verzióhoz (*Smaragd GSH 2020b*) [6] részletes beszivárgás térképeket készítettünk az WHI UnSat Suite szoftvercsomag HELP moduljával és az ArcGIS térinformatikai rendszerrel. Ez egy önálló, időigényes kutatási téma volt a hidrodinamikai modell fejlesztéséhez kapcsolódva. A területi beszivárgási adatokat a területre jellemző talaj, földtani felépítés, területhasználat, domborzat és az OMSZ állomások 1952-2019 között mért és homogenizált, rácspontra interpolált napi csapadék és hőmérséklet adatsorai alapján készítettük el.

A DKHG regionális modell 2.0 verzióhoz (*Smaragd GSH 2023a*) [9] ezt kiegészítettük 2022-ig. A prognosztizált időszakhoz azonban nem álltak rendelkezésre prognosztizált csapadék és hőmérséklet idősorok, ezért azt a megoldást választottuk, hogy a prognosztizált időszakban (2023-2050) egy már megelőző, megtörtént időszakot (1995-2022) vettünk figyelembe, és az ezen időszakra számított beszivárgás értékekkel számoltunk. Tekintve, hogy a különböző éghajlati modellezések pont a csapadék mennyiségének meghatározásában nagyon bizonytalanok, ezt az eljárást megfelelőnek tartjuk. Természetesen az éghajlati események nem úgy fognak bekövetkezni, mint ahogy az egyszer már megtörtént, de a kb. 30 éves éghajlati ciklusok hasonló jellegzetességekkel bírnak, egy cikluson belül változékonyak, száraz és kevésbé száraz periódusok váltakoznak egymással, sőt a 2010-es évhez hasonló szélsőségesen csapadékos évek is megjelenhetnek.

A tranziens modell mellett elkészült egy permanens modellváltozat, amelyben időben állandó beszivárgást tudunk alkalmazni. A permanens modell alapvetően egy hosszabb időszakra (1980-2010) számított átlagos beszivárgásértékekkel (**6. ábra**) készült el.

Egy-egy szélsőséges meteorológiai helyzet ábrázolására a permanens modell elkészült a 2010-es év (tartósan nagyon sok csapadék) és a 2011-es év (tartósan nagyon kevés csapadék) beszivárgási értékeivel is. Mivel azonban ezeknek a szélsőséges helyzeteknek a valóságban igen kis esélyük van, a permanens modellvizsgálat, azaz a védőövezetek lehatárolása (**KHV 6.4.2 fejezet**) az átlagos beszivárgási szcenárió mellett történt meg.



6. ábra: A numerikus modellben alkalmazott átlagos beszívargás területi eloszlása [mm/év]

1.5. A modellezéssel kapott eredmények megbízhatósága

A kapott eredmények értelmezéséhez figyelembe kell venni a beépített adatok megbízhatóságát, a matematikai szimuláció algoritmusait és a modellezés korlátait.

A numerikus szimuláció eredményei a modellezett terület földtani, vízföldtani ismereteinek jelen állapotát tükrözik, azokra épülnek. Bármely új adat, ami a modellbe beépített feltételezéseknek ellentmond, a bemenő paraméterek megváltoztatását és a szimuláció újratekintését igényelheti. Elfogadható eredményeket csak akkor várhatunk, ha a rendelkezésre álló bemeneti adatok ellentmondásmentesek és ismereteink mai szintjén megfelelnek a valóságnak.

A szórványos vagy hiányos adatok regionalizálása miatt a lokális eredmények hibákkal terheltek lehetnek. Ezen "hibák" az adatok helyi változékonyságából is származhatnak, melyeket az ismerethiány miatt modellezni nem lehet. További hibák forrása lehet a mintavételezés időbeli eltérése, amelyet még a tranziens esetben sem lehet mindig figyelembe venni.

Az eredmények pontossága csak az aktuális ismereteink szerint elfogadott és használt geológiai, hidrogeológiai és numerikus módszerekhez tartozó egyszerűsítésekből és megközelítésekből származó hibák határain belül biztosított. Az eredmények felbontása nem haladhatja meg a bemeneti adatok felbontását.

A regionális modellben a földtani felépítés a rendszer méretéhez igazodva egyszerűsítésekkel került beépítésre. Ez a lokális földtani jelenségek (pl.: kisebb vetők, képződményen belüli eltérő litológiák)

leképezésére nem alkalmas, amely pl. a kisebb, lokális földtani jelenségektől függő források hozamának becslését bizonytalanná teheti.

A beszivárgás a modellbe a rendelkezésre álló csapadékadatok alapján, éves felbontásban került beépítésre. Ugyanakkor például a hirtelen csapadékesemények következtében a beszivárgást rövid idő alatt jelentősen befolyásolhatják. Ez a források hozamát, illetve a vízszinteket – különösen karsztos rendszerek esetén - rendkívül ingadozóvá teszi, akár néhány órán belüli hirtelen változásokat eredményezve. Egy adott mérés a gyakran széles skálán változó vízszint adatoknak csak az aktuális, pillanatszerű állapotát tükrözi.

2. IRODALOM

- [1] Envicon Mérnöki Iroda (1998): A Csóri vízmű hidrogeológiai védőidomának meghatározása
- [2] Envicom 2000 Mérnöki, Földtani és Környezetvédelmi Szolgáltató Kft. (2010): A Csóri vízbázis biztonságba helyezési tervének felülvizsgálata
- [3] Kvíz-2000 Bt. (2023): A Csóri vízbázis biztonságba helyezési tervének II. felülvizsgálata
- [4] Smaragd GSH Kft. 2019: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapot rögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Források felmérése, forráskataszter készítése záródokumentáció. Jelentés.
- [5] Smaragd GSH Kft. 2020a: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapot rögzítése, 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.
- [6] Smaragd GSH Kft. 2020b: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapot rögzítése, 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.
- [7] Smaragd GSH Kft. 2020c: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapot rögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Vízháztartási modellezés és állapotértékelés – III. kötet. A karsztvíztároló állapotának összefoglaló értékelése. Jelentés.
- [8] Smaragd GSH Kft. 2021: A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés okozta jelenségek állapot rögzítése, a várható emelkedés modellezése KEHOP-1.1.0-15-2017-00010. Többlet lokális modellek– Kincsesbánya (Rákhegy) lokális modell DRV fejlesztési változattal. Jelentés
- [9] Smaragd GSH Kft. 2023a: A Balaton térsége ivóvízellátásának modernizációjához kapcsolódó műszaki előkészítés és tervezés. A Kincsesbánya – Rákhegy II. vízbázison tervezett többlet vízkivétel környezeti hatásvizsgálata: Felszín alatti víz védelme.
- [10] Smaragd GSH Kft. 2023b: A Balaton térsége ivóvízellátásának modernizációjához kapcsolódó műszaki előkészítés és tervezés – Források és kisvízfolyások állapotfelmérése a k.1.1. karsztvíztest területén, a Kincsesbánya, Rákhegy II. karsztvízakna vízbázisán. Jelentés
- [11] HYDROSYS Kft. 2017: A Rákhegy II. Vízbázis vízkivétel növelésének hatása a külső és hidrogeológiai „A” védőövezetekre. Jelentés
- [12] Smaragd GSH Kft.-MFGI- BME VKKT-OVF (2015): A felszín alatti vizek mennyiségi állapotának meghatározása. A felszín alatti víztől függő ökoszisztémák ökológiai vízigényének meghatározása. A Vízgyűjtő-gazdálkodási Terv 6-4-4 háttéranyaga.
- [13] Kocsis Á. (2009): A Tési-fennsík a Dunántúli-középhegység egyik fő víznyelős területe Forrás: http://www.karszt.hu/keleti_bakony.htm. Letöltés:2014.08.022
- [14] Nád B. (2012): A Dunántúli-középhegységi karsztvízszint emelkedés hatásai. MTA VEAB Vízgazdálkodási Munkabizottság ülése.
- [15] Budai T., Csillag G., Gyalog L., Jocháné Edlénny E., Müller P., Nádor A., Tóthné Makk Á. 2001: Dunántúli-középhegység pretercier térképe. <https://map.hugeo.hu/mol100/>
- [16] Haas J., Budai T., Csontos L., Fodor L., Konrád Gy. (2010): Magyarország pre-kainozoos 1:500 000 méretarányú földtani térképe. Magyar Állami Földtani Intézet 2010.
- [17] Szlovák Geológiai Szolgálat: Szlovákia M=1:50 000 méretarányú földtani térképe <https://www.geology.sk/maps-and-data/mapovy-portal/geological-maps/?lang=en>

- [18] Schmieder A., Szilágyi G.: 1988: Dunántúli-középhegység főkarsztrendszerének terhelése és terhelhetősége. Bányászati és Kohászati Lapok 121. évf. 2. különszám. pp. 72-89
- [19] 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/>
- [20] Domenico, P.A. and F.W. Schwartz, 1990. Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley & Sons, New York, 824 p.