

A rezervoár heterogenitás geotermikus visszasajtolásra gyakorolt hatásának kétdimenziós numerikus tanulmányozása

OTDK Dolgozat

Készítette: Nagy Bence

Földtudományi alapszak II. év

Geofizikus szakirány

Témavezetők:

Molnár Bence

Markó Ábel



ELTE

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

Budapest, 2025

Tartalomjegyzék

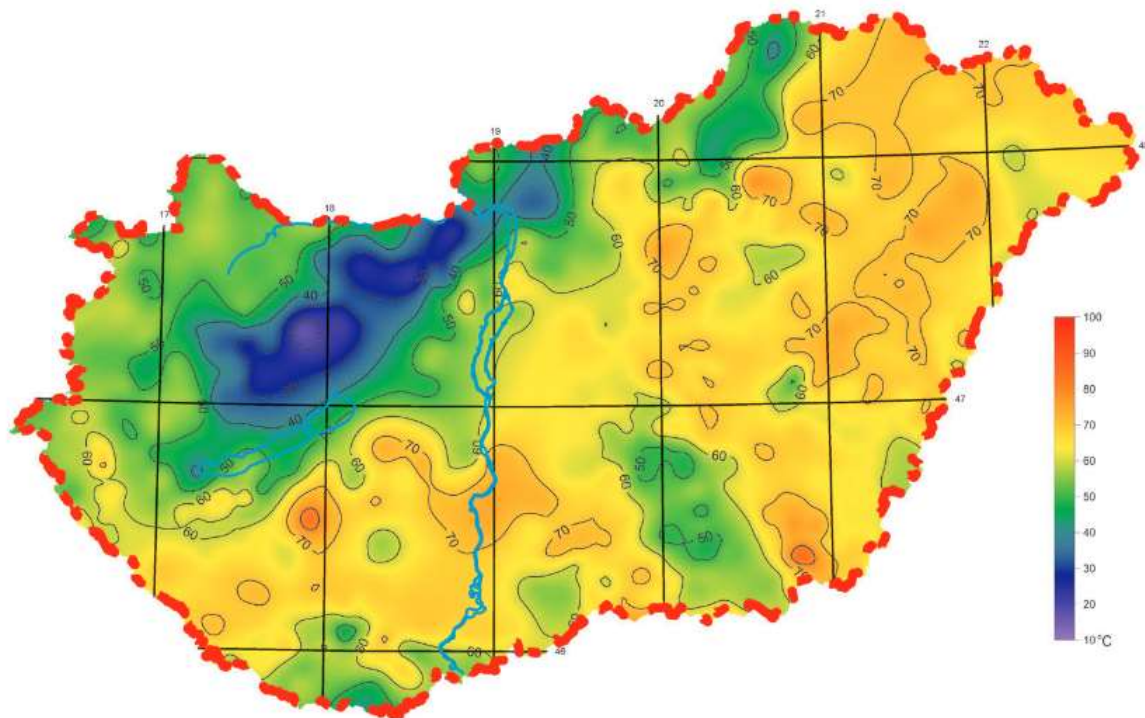
Absztrakt	3
1. Bevezetés és problémafelvetés	4
2. Geológiai háttér.....	7
3. Elméleti háttér.....	7
3.1. Végeselem módszer	9
4. Módszertan.....	11
4.1. Fizikai alapmodell.....	11
4.2. Modellparaméterek	13
4.3. Modell verifikáció.....	16
4.4 Heterogenitás generálása	18
4.5. Vizsgált kútpozíciók és paraméterek.....	19
5. Eredmények	22
5.1. A realizációk összesített eredményei	22
5.2. Két kút összehasonlítása	26
6. Limitáció és továbblépési lehetőségek.....	29
7. Konklúzió.....	30
8. Összefoglalás	31
Köszönetnyilvánítás.....	31
Irodalomjegyzék	32
Mellékletek	36

Absztrakt

Dolgozatom a termálvíz hasznosításának egyik fő problémájával, a visszasajtolás nehézségeivel foglalkozott. A visszasajtolás sikeressége számos kockázattal jár, viszont annak kivitelezése elengedhetetlen a fenntartható geotermia szempontjából, így fontos kutatási terület a kockázatok megismerése, felmérése. A sziliciklasztos rezervoárokból jelentős befolyással bír a víztartó heterogenitása a visszasajtolás lehetőségeire, hiszen míg a homokköveknek jó az áteresztőképessége, az agyagra nagyon alacsony permeabilitás értékek jellemzők. Dolgozatomban kétdimenziós numerikus modelleken vizsgáltam a heterogenitás hatását a kutakban mérhető paraméterekre. Egy valós geotermikus terület karakterisztikus értékeiből, léptékeiből kiindulva generáltam egy heterogén permeabilitáseloszlást, majd azon belül változtattam a kút pozícióját. Az eredmények alapján arra a következtetésre jutottam, hogy egy ideális visszasajtolási helyszín meghatározásánál nem csak a közeg átlagos permeabilitása, hanem annak térbeli eloszlása, konnektivitása is jelentős hatással bír. Hasonló átlagos permeabilitású, de eltérő kiterjedésű közegbe való visszasajtolás esetén egy hét időtartamú megfigyelés után akár 50% eltérés is megfigyelhető a kutakban mért hidraulikus emelkedési magasságok között. A dolgozatom emellett igazolja, hogy a rezervoár heterogenitások kutatása egy fontos irány, amely magas potenciállal rendelkezik a geotermikus kockázatelemzés jövőjének szempontjából.

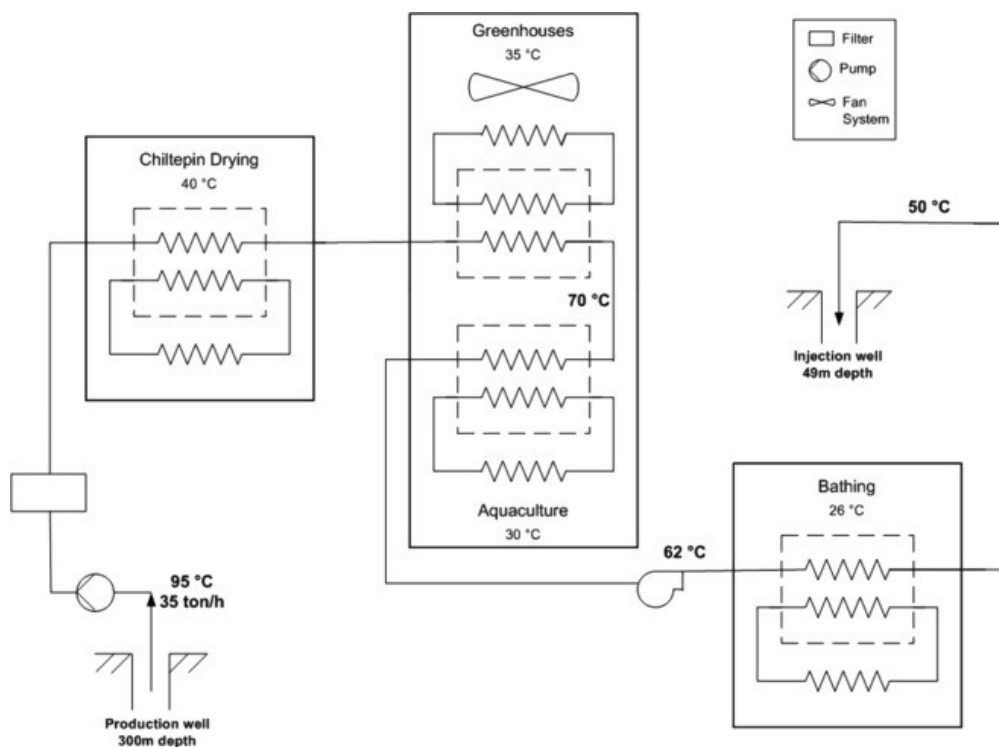
1. Bevezetés és problémafelvetés

Az elmúlt évtizedben egyre gyakrabban kerül az előtérbe a felszínalatti vizek kérdése, akár ivóvízként, akár a vizek hőenergiájának hasznosításával kapcsolatban. Magyarország fürdői sok évszázados múlttal rendelkeznek, az országnak európai szinten az egyik legjobbak az adottságai a geotermikus energia hasznosítására. A hőfluxus értéke akár a 120 mW/m^2 -t is elérheti, átlaga pedig 90 mW/m^2 körül alakul, amely jelentősen meghaladja a kontinentális átlagot (65 mW/m^2). Ennek következtében a hőmérséklet már 1 km mélységben az ország nagy területén eléri a 70°C -ot (1. ábra). A jó geotermikus adottságok oka a litoszféra középső-miocén kori extenziója és az ezzel járó elvékonyodása (Horváth et al., 2015; Lenkey et al., 2021). A geotermikus energia megoldást nyújthat több, különböző problémára is: segítheti az országot a zöld átállásban, hiszen körültekintően eljárva teljesen megújuló energia, károsanyag kibocsátása kevés; illetve egy közvetlenül az ország területén lévő energiaforrásról van szó, amely az energiapiac külső függésének enyhítéséhez is hozzájárul. Az elmúlt években a technológia fejlődésével és a területet érintő kutatások számának növekedésével egyre népszerűbbé és gazdaságosabbá váltak a geotermikus projektek, számuk hazánkban is jelentősen megnövekedett, és további növekedésre lehet számítani (Madarász, 2023). A kinyert melegvíz a hőmérsékletétől függően különböző célokra hasznosítható, például (hőmérséklet szerint csökkenő sorrendben): villamosenergia-termelésre, lakossági fűtésre, mezőgazdasági



1. ábra: Hőmérséklet a felszín alatt 1 km mélységben (Lenkey et al., 2021).

termékek szárítására, fürdők táplálására, üvegházak, halastavak fűtésére, illetve járdák jégmentesítésére. Mivel a legtöbb felhasználáshoz az ideális hőmérséklettartomány adott és szűk, leghatékonyabb az ún. kaszkádrendszerek alkalmazása, ahol a víz a kitermelő és a visszasajtoló kutak között számos fázison megy keresztül és energiatartalma több fogyasztó által hasznosul (2. ábra) (Rubio-Maya et al. 2015). Magyarországi példa ilyen rendszerekre pl. Miskolc, Szeged vagy Hódmezővásárhely, emellett az ország egy geotermikus áramtermelő erőművel is rendelkezik Turán (Szanyi et al., 2021). Kelet-Közép-Európában ismertebbek a lengyel podhalei (Kepinska, 2003), vagy az osztrák geinbergi (Goldbrunner et al., 1999) rendszerek.



2. ábra: Példa kaszkádrendszer működésére a mexikói Maguarichi városából (Rubio-Maya et al., 2015)

A geotermikus projektek által célzott területek nem mindig rendelkeznek részletes geológiai modellel, viszont sokszor annak ismeretében is magas földtani kockázattal terheltek, így fontos a részletes előzetes kockázatelemzés (BVEG, 2024; Witter et al., 2019). A projektek sikerességéhez és fenntarthatóságához egyre jobban elengedhetetlenné válik a visszasajtoló kutak létesítése is. A víztartók többségében a beszivárgás nem tudja pótolni azt a jelentős vízkivételt, amely egy projekttel jár, ez pedig hosszútávon számos problémához vezethet. A fellépő víz- illetve nyomáshiány vízszint- és felszínsüllyedéshez vezethet (Axelsson, 2012; Gringarten, 1978). A visszasajtolás elhanyagolása a víztartó idő előtti kimerülését, azaz a hozam csökkenését is eredményezheti, amely miatt a projekt gazdaságossága is veszélybe

kerülhet. Emellett a felszínen kiengedett eltérő kémia, biológiai összetétellel rendelkező víz pedig felboríthatja a tavak, folyók ökoszisztémáját (Axelsson, 2012; Markó et al., 2024).

Porózus víztartók esetén a visszasajtoló kút létesítésénél viszont számos kockázati tényező lép fel, amely akadályozhatja annak hatékonyságát. Ilyen tényezők a hidraulikai viszonyok, a rezervoár kiterjedése, permeabilitása vagy az eltömődések kockázata (Markó et al., 2021). A rezervoár heterogenitásának jelentős befolyása ezekre a problémákra ismert, és bár a problémafelvetés nem mondható újnak, a geotermikus projektek számos részproblémáját tekintve még relatív alulkutatott irányt jelent. A víztartók heterogenitása a termelő kúttal szükséges hidraulikai kapcsolat meglétét is akadályozza, valamint hatással lehet a visszasajtolás hatékonyságára (Budai et al., 2024; Markó et al., 2024; Willems et al., 2017).

A heterogén rezervoárok vizsgálatának egyik hatékony módszere azok numerikus modellezése. A földtudományokban végzett numerikus tanulmányok gyakran homogén közelítést alkalmaznak (Eaton, 2006; Molnár, 2022). Ez sok esetben indokolt és célravezető a kutatott probléma szempontjából, viszont a mai számítástechnikai kapacitás lehetőséget teremt bizonyos helyzetekben a heterogenitás figyelembevételére, amennyiben az indokolt. Hasonlóan gyakori közelítés a kétdimenziós modellek használata. A kétdimenziós modellek számítási kapacitása és futási időigénye jelentősen kisebb, mint háromdimenziós modelleké, így gyakran érdemes a problémák vizsgálatát kétdimenziós, egyszerűsített modellezéssel kezdeni.

Dolgozatom célja ezek alapján a porózus rezervoárokból fellépő heterogenitások visszasajtolásra gyakorolt hatásának vizsgálata volt. Kutatásom során a vizsgált víztartó réteget egy kétdimenziós modellel közelítettem, elhanyagolva a vertikális áramlást. A heterogén közegben egy visszasajtoló kút a potenciometrikus vízszintre és a folyadékáramlásra gyakorolt hatását vizsgáltam. Céloom ezzel segíteni a víztartó heterogenitások termálvízhasznosításra gyakorolt hatásának kutatását, annak mélyebb megértését. Dolgozatom elején részletesebben bemutatom a vizsgált problémát, annak geológiai és matematikai hátterét; ezután ismertetem a modellépítést, a tesztelés és a verifikáció folyamatát, értelmezem az eredményeimet ábrákkal, táblázatokkal kiegészítve, majd említést teszek a kutatás jövőbeli céljairól, lehetőségeiről.

2. Geológiai háttér

A modellem referenciaterülete Zala vármegye, főként a Zalaegerszeg és Keszthely között elhelyezkedő régiója volt. A térségben a XX. század elején az elsők között végeztek szénhidrogén-kutatást, így részletes adatokkal rendelkezünk egészen 3 km mélységig fúrások és felszíni geofizikai mérések révén. A területen 4–5 km mély paleozoós aljzaton kb. 3000 m triász mészkő, illetve dolomit ülepedett le, majd arra a Pannon-tó üledékei, mélyvízi majd később delta és folyóvízi hordalékok kerültek (Tóth, 2017). Tanulmányomban ezen neogén sekélyvízi pannóniai üledékekre fókuszálok. 1 kilométeres mélységben több helyen a pórusvíz hőmérséklete meghaladja a 60-70 °C értéket is (Nádor, 2019), a 90 °C-os izoterma pedig akár 1500 méter sekélyen is lehet (Tóth, 2017), így a terület geotermikus potenciája jelentős, amelyet a jelenleg működő, több mint 60 kút is igazol. A kutak viszont sok esetben egyedülálló termelőkutak, visszasajtolás nélkül, amely hozzájárulhat a hosszútávú vízszintcsökkenéshez nem csak a termelési területen, hanem akár a szomszédos országokban is (Nádor, 2019). Ezért a visszasajtolás mértékének növelése – az Alföldhöz hasonlóan – itt is lényeges. A hidrosztatikus nyomásviszonyok kedveznek a kisnyomású visszasajtolásnak (Markó et al., 2022). Azonban a pannóniai delta és folyóvízi képződmények jelentős heterogenitással bírnak (Ben Mahrez et al., 2023; Sztanó et al., 2024), ami földtani kockázatot jelent a visszasajtolás sikeressége szempontjából is (Markó et al., 2024).

3. Elméleti háttér

Szeretném röviden ismertetni a felszínalatti áramlás alapvető fogalmait és alapegyenleteit, amelyet dolgozatomban során használtam, illetve amelyek szükségesek a numerikus számítások elvégzéséhez.

Elsőként szeretnék bevezetni két fontos fogalmat, amely a felszínalatti vízáramlás leírásához elengedhetetlen. A hidrogeológiában a folyadék potenciáljának leírására gyakran h [m] hidraulikus emelkedési magasságot (HEM) használják. Komponensei

$$h = z + \Psi, \quad (1.)$$

ahol z [m] a kút szűrőközepének adott referenciaszinthez viszonyított magassága, ún. geodéziai magasság vagy *elevation head*, és Ψ [m] a kútban megjelenő vízoszlop magassága, a nyomás emelkedési magasság vagy *pressure head* (Mádlné et al., 2018).

Emellett fontos bevezetni a fedett víztározóban definiált fajlagos tározási tényezőt is, mely megadja, hogy 1 m hidraulikus emelkedési magasság csökkenés következtében hány m^3 víz szabadul fel 1 m^3 kőzetből. A fajlagos tározási tényező

$$S_s = \frac{1}{V_T} \frac{dV_w}{dh}, \quad (2.)$$

ahol $V_T [\text{m}^3]$ a teljes térfogat, $V_w [\text{m}^3]$ pedig a felszabadult víz térfogata, így a fajlagos tározási tényező mértékegysége $[1/\text{m}]$. Emellett definiáljuk a d vastagságú rétegre jellemző tározási tényezőt is,

$$S = dS_s, \quad (3.)$$

amely értéke fedett víztározókban jellemzően $5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3}$ között mozog (Galsa, 2018).

A felszínalatti folyadékáramlás alapvető összefüggéseit először Henry Darcy írta le empirikus kísérletével, mely azonban analitikusan is levezethető. Darcy szerint a vízhozam

$$Q = A \cdot q, \quad (4.)$$

ahol A az áramlás irányára merőleges keresztmetszet $[\text{m}^2]$, q pedig a róla elnevezett Darcy-fluxus, mely mértékegysége $[\text{m}^3/\text{sm}^2]$, egyszerűsítve $[\text{m/s}]$. Kísérleteiből emellett arra következtetett, hogy

$$q = K \frac{\Delta h}{\Delta l}, \quad (5.)$$

azaz a fluidumáramlás intenzitása a hidraulikus gradienssel arányos, amely gradienst az egységnyi távolság alatt bekövetkező hidraulikus emelkedési magasság változása határozza meg. Az arányossági tényező K a kőzetre és pórusfolyadékára vonatkozó állandó, a hidraulikus vezetőképesség $[\text{m/s}]$, vagy víz esetén vízvezető-képesség. Részletesebb vizsgálatok alapján

$$K = \frac{C d^2 \rho g}{\eta}, \quad (6.)$$

ahol C a szemcseelrendezésre vonatkozó texturális paraméter $[1]$, d a jellemző szemcseméret $[\text{m}]$, ρ a folyadék sűrűsége $[\text{kg}/\text{m}^3]$, g a gravitációs állandó, η pedig a folyadék dinamikus viszkozitása $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$. Külön szokás csoportosítani a mátrix jellemzőit,

$$k = C d^2, \quad (7.)$$

ahol k a kőzet permeabilitása $[\text{m}^2]$ (Galsa, 2018). Jelen tanulmányban a közeg heterogenitását ezzel a k értékkel jellemzem, az értékek térbeli eloszlása erre vonatkozik. SI-rendszerbeli

mértékegysége viszont sok nagyságrenddel nagyobb, mint amely a valós hidrogeológiai környezetben megjelenik, így a gyakorlatban a *darcy* mértékegységet használják,

$$1 D = 10^{-12} m^2, \quad (8.)$$

illetve ennek ezredrésze, a millidarcy [mD] (Galsa, 2018). Bár a numerikus modellező szoftverek is általában m^2 mértékegységgel számolnak, a tanulmányban az érthetőség kedvéért általánosságban mD-ban hivatkozok a permeabilitás értékeire.

Végül a modell verifikálása során alkalmazom a Jacob–Cooper-féle egyenes vonal módszert, amely egyedülálló kútban alkalmazható, nem permanens szakaszra vonatkozó kúteszt, amelyből ki lehet számolni a kútkörnyezet transzmisszivitását a hozam ismeretében. A módszer féllogaritmikus leszívás – idő görbére illeszt egyenest, amely meredeksége jelenik meg a számításban. A képlet levezethető a Theis-egyenletből, a legegyszerűbb formája

$$T = \frac{\ln(10) Q}{4\pi \Delta s}, \quad (9.)$$

ahol az egy logaritmikus időciklusra vett Δs [m] leszívásból és a hozamból számítható a transzmisszivitás [m^2/s]. A transzmisszivitásból továbbá meghatározható a réteg hidraulikus vezetőképessége a l [m] rétegvastagság ismeretében,

$$K = \frac{T}{l}, \quad (10.)$$

amelyből az (5.) és (6.) egyenletek alapján a vízáadó permeabilitása

$$k = \frac{T\eta}{l\rho g} \quad (11.)$$

összefüggéssel számítható (Cooper Jr & Jacob, 1946; Mádlné et al., 2018).

3.1. Végeselem módszer

A numerikus modellező szoftverek megoldásai nem analitikusak, azokat közelítik, numerikus hibával terheltek. Alkalmazásukkal viszont megoldhatóvá válnak olyan problémák, amelyek analitikusan nem. A numerikus megoldások során a vizsgált teret és időt darabonként kezelhető szakaszokra osztjuk, majd az azokból kapott, sokszor több millió egyenletből álló rendszert oldjuk meg. A felbontás finomságának maguk a szoftverek, a számítási idő, illetve a rendelkezésre álló memória szab határt, viszont problémától függően egy bizonyos szint után a pontosságbeli javulás minimális. Így a dolgozat céljának és a rendelkezésre álló

erőforrásoknak megfelelően a futási idő, a felhasznált memória és a megoldás pontossága közötti egyensúlyra törekszünk.

A végeselem módszer egy numerikus megoldási technika, amellyel parciális differenciálegyenlet-rendszereket tudunk megoldani. A problémát leíró folytonos egyenletet először ún. gyenge alakra hozzuk, majd véges számú elemre osztva diszkretizáljuk azt. Az ebből kapott egyenletrendszer ezek után megoldhatóvá válik (Galsa, 2020).

A tanulmányomban alkalmazott kétdimenziós modellek esetén a teret háromszögekre vagy négyszögekre bonthatjuk, melyek alakja és mérete térben változhat. Így ahol nagyobb precíziót igénylünk (jelen esetben a vizsgált kút körül), ott lehetőség nyílik sűríteni a felbontást, a rácsháló részletesen körül képes venni bármely alakzatot. (Galsa, 2020; Nikishkov, 2004).

4. Módszertan

4.1. Fizikai alapmodell

A modellezést a COMSOL Multiphysics numerikus modellező szoftver (Zimmerman, 2006) 5.3a verziójában végeztem, a Darcy-fluxus modul (Fluid Flow / Porous Media and Subsurface Flow) használatával két dimenzióban, időfüggő modelleken (COMSOL Multiphysics, 2020).

A numerikus modellezés során a Darcy-törvény és a kontinuitási egyenlet által alkotott parciális differenciálegyenlet-rendszert oldottam meg, ahol az egyenletek az alábbi alakban kerültek megoldásra. A Darcy-törvény vektoros alakban a permeabilitással kifejezve a következő alakban írható

$$\mathbf{q} = -\frac{k}{\eta} \nabla p. \quad (12.)$$

Emellett a kontinuitási egyenlet időfüggő esetben, forrás jelenlétében a következő alakban adható meg

$$\frac{\partial \Phi_e \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{q}) = Q_m, \quad (13.)$$

ahol Φ_e a közeg effektív porozitása [1], mely korrigált változata az általános kontinuitási egyenletnek, Q_m [kg / m³s] a visszasajtoló kút által a rendszerbe juttatott térfogati forrassűrűség, továbbá ahol igaz, hogy

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Phi_e \rho) = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t}. \quad (14.)$$

A heterogenitás visszasajtolásra okozott hatásainak vizsgálatánál első közelítésben kétdimenziós modellt építettem, a számítási kapacitás korlátozottsága és a jelenség részletesebb megértése végett. Ehhez éltem azon feltételezéssel, miszerint a horizontális irányú áramlás több nagyságrenddel meghaladja a vertikális, így a vertikális irányú áramlás első közelítésben elhanyagolható.

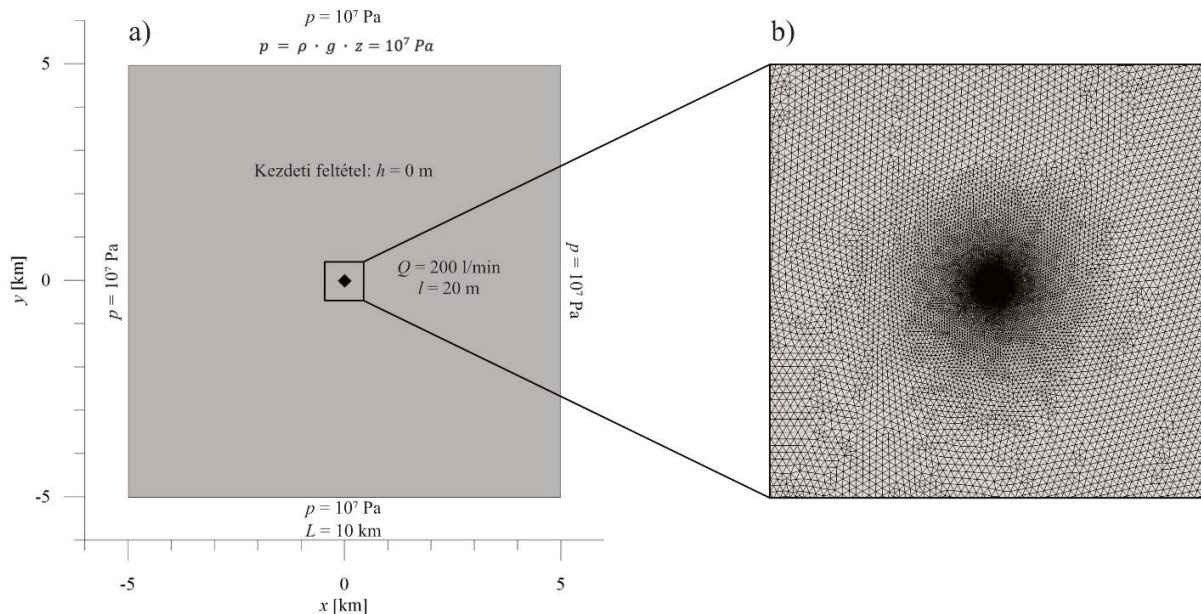
A kiindulási alapmodell kétdimenziós, horizontális elemeit tekintve egy négyzet alakú közegből és egy pontszerű kútból állt (mintha felülnézetből vizsgálnánk a problémát), amelyeknek a (0,0) koordináta volt a középpontja. A modellméret megválasztásánál igyekeztem a lehető legnagyobb modellméretet választani, ami még kezelhető fájlméretet, illetve számítási kapacitást jelent. A teszteléseim alapján a modell oldalhosszának $L=10$ km méretet választottam. A modell kiterjedése mellett a rácsháló sűrűsége is egy kulcsfontosságú

paraméter, hiszen szintén nagymértékben befolyásolja a megoldás pontossága mellett a modell fájlméretét és futás idejét. Az alkalmazott rácsháló trianguláris volt (háromszög elemekből állt). Figyelembe véve, hogy a heterogenitás modellezése a cél az egész modellterületen a kúttól távol is relatíve részletes rácshálót kell alkalmazni, ezért a maximális elemméret 10 m volt. A kút körül sűrítettem a rácshálót, hogy a kútkörül fellépő intenzív áramlást és nagymértékű változásokat jó felbontással tudjam leképezni. A kút körül az elemek maximális méretét 0,1 m-nek választottam, amelyek szomszédjai fokozatosan növekedtek, amíg a 10 métert elérték (3. ábra).

A határfeltételek tekintetében a modell szélein a legegyszerűbb ún. Dirichlet-típusú peremfeltételt alkalmaztam, amely konstans nyomást ír elő a modell határain, viszont nem korlátozza a határokon fellépő fluxus mértékét (tehát a modell határain keresztül felléphet vízmozgás). Emellett a modelleknek szükséges kezdeti feltétel, azaz a $t = 0$ s időpillanatban fennálló helyzet leírása. A modell számára ugyanazt a nyomást adtam meg a kezdeti feltételnek, amit a határon előírtam:

$$p = \rho \cdot g \cdot z = 10^7 \text{ Pa} \quad (15.)$$

mely jelen esetben 1000 m mélységnek felel meg. A modell területén a határfeltétellel azonos $p = 10^7 \text{ Pa}$ kezdeti feltételt írtam elő. A modellező program ezek alapján nyomás emelkedési magasság értéket számít egy adott pontra, az eredmények egyszerűbb értelmezésének érdekében, illetve a hidraulikus emelkedési magasság referenciaszintjeként z mélységet választottam, így a kezdetben $h = 0$ m érték volt érvényes a modell teljes területén.



3. ábra: a) A modell elhelyezkedése a koordinátarendszerben b) Az alkalmazott rácsháló a kút környezetében.

A kezdeti közegben a kút forrásként (a modellverifikáció során nyelőként) funkcionál, amely adott ideig táplált vizet a rétegbe. Kutak modellezése esetén gyakori a kút körül felvett hengerszimmetrikus közeg alkalmazása, jelen esetben a viszont a heterogenitás vizsgálatához a kút helyzetét variáltam, így mivel az nem volt centrális, ideális volt a négyzet alakú modelltartomány használata. Ennek a központi negyedében választottam kútpozíciókat, a modell határaitól távol, hogy a határfeltétel hatása minimális legyen a szimulációra.

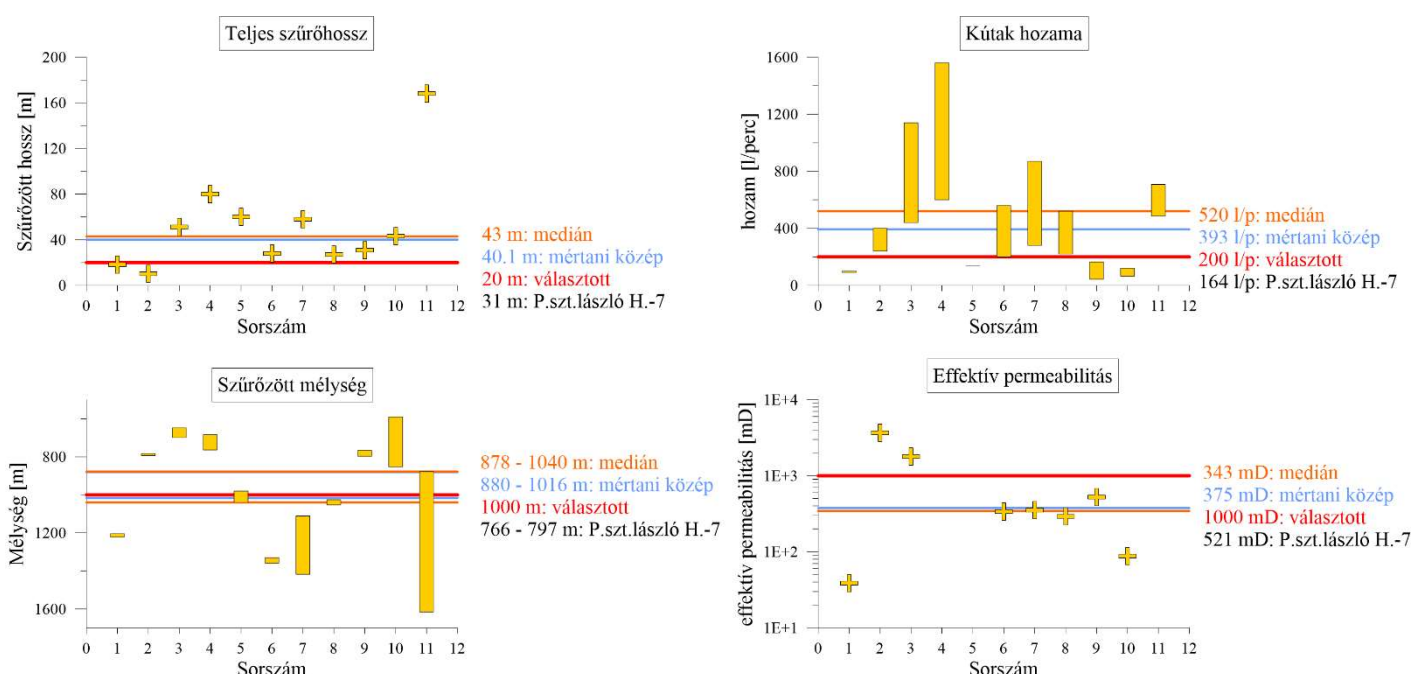
Hasonlóan a vizsgált időintervallum is lényeges választás a modell felépítése során. Fontosnak tartottam a kút korai fázisait részletesen vizsgálni, hiszen nagy mértékű változások jelennek meg közvetlenül a visszasajtolás megkezdése után, és durva felbontás esetén a korai szakasz pontatlanságai numerikus instabilitáshoz vezethetnek és terjedhetnek az idő előrehaladtával. Ennek elkerülése végett a percben leírt időskála mellett döntöttem, kezdeti időlépésem 10^{-3} perc (0,06 s) volt. A lépéstávolságok ezután exponenciálisan növekedtek úgy, hogy 1 nagyságrend különbség (pl. 1 és 10 perc között) 10 lépés történt. A szimuláció 10^4 percig (≈ 7 nap) tartott, amit a modell méretének függvényében választottam meg.

A modell futási ideje ezen paraméterekkel, a heterogén közeg figyelembevételével körülbelül 3 óra volt a Geofizikai tanszék számítógépén. A modell véges kiterjedése tekinthető – mind térben, mind időben – az alkalmazott modell legnagyobb korlátjának, viszont a limitált idő és erőforrások mellett ezt találtam legoptimálisabbnak.

4.2. Modellparaméterek

A modell valós hátterét elsősorban a területen vagy annak közelében végzett fúrások – számunkra rendelkezésre álló – vízföldtani naplói adták, összesen 11 db, melyekből ki tudtam nyerni a kutak hozzávetőleges mélységét, hozamát, teljes szűrőhosszát és a kúttesztek alapján becsült permeabilitásukat. Emellett a heterogenitás eloszlását egy, a területről származó szeizmikus amplitúdóanomália-térkép ihlette. A régióra jellemző geológiai körülmények között a visszavert hullámok amplitúdója a közeg homok/agyag arányára érzékeny, amely alapján elkülöníthetjük a homokosabb, magasabb permeabilitású zónákat a geotermia szempontjából előnytelen agyagos területektől. Emellett a térképen megfigyelhetők a közetarányok területi változásai is, amelyből következtetni lehet a heterogenitás léptékére is. Ezt a karakterisztikus léptéket később a modellben használt, geostatisztikus módszerekkel generált eloszláshoz használtam fel alapértékként. A heterogenitás generálásáról részletesebben a 4.4. fejezetben írok.

A modell által szimulált réteg mélységének, a permeabilitás középértékének, a kút hozamának és szűrőhosszának meghatározásához elvégeztem 11 vízföldtani napló adatainak összegyűjtését és kiértékelését, amelyet az 1. táblázaton és a 4. ábrán jelenítek meg. A kutak adataiból számtani és mértani közepet, illetve medián értéket számoltam. A számolt értékek mellett kiválasztottam egy „kontroll” kutat, amely paraméterei tekinthetők a legrelevánsabbnak a probléma szempontjából. Ez a *Pusztaszentlászló Hahót-7* jelzésű kút volt, mivel az esett abba a szűkebb régióba, amelyet a kutatásom során később valós adatok alapján szeretnék részletesebben kutatni. Az átlagok és a kontroll kút alapján a modell mélységének 1000 métert (2D horizontális modell lévén 1 db mélységérték a bemenete), a réteg átlagos permeabilitásának 500 mD-t választottam. A hozam és a szűrőhossznál megemlítendő, hogy a megjelenített értékek a teljes szűrőhosszra vonatkoznak, azonban a kétdimenziós modellt úgy építettem fel, hogy csak egy szűrőzött réteget szimulál, és nem a teljes effektív szűrőhosszt. Ebből a megfontolásból a rétegvastagságnak (ami egyben megegyezik szűrőhosszal, mivel a réteget teljes vastagságban szűrőzzük) 20 métert választottam. Ezzel együtt feltételezzük, hogy ez az egy szűrő szűrőintervallum a teljes hozamnak csak egy „részét” nyeli el, így az erre vonatkozó hozamnak 200 l/p választottam.



4. ábra: Zala-megyei kútönyvek kigyűjtött paramétereinek ábrázolása, a permeabilitás esetén logaritmikus skálán

Kútönyvek adatai						
Sorszám	Név	Mélység [m]		Teljes szűrőhossz [m]	hozam [l/perc] max	effektív permeabilitás [mD]
		felső határ	alsó határ			
1	Szécsisziget K-2	1204	1222	18	100	38.7
2	Zalaeg. B-308	783	793	10	400	3637
3	Zalakaros K-11	648	699	51	1140	1789
4	Zalakaros K-14	684	764	80	1560	
5	Lenti K-12	980	1040	60	136	
6	Lenti B-51	1331	1359	28	560	337
7	Lenti B-52	1111	1418	58	870	350
8	Letenye Le-4	1026	1053	27	520	292
9	Pusztaszentlászló Hahót-7	766	797	31	164	521
10	Bázakerettye K-1	590	853	43	120	88
11	Bajcsa B-62	878	1616	168	708	

Számtani közép	909.18	1055.82	52.18	570.73	881.59
Mértani közép	880.47	1016.70	40.11	392.60	375.78
Medián	878	1040	43	520	343.5

1. táblázat: A környékbeli kutak vízföldtani naplóiból kigyűjtött paraméterei

A modellépítésnél használt paramétereket a 2. táblázatban összegzem. Az eddig tárgyalt paraméterek mellett szükség volt általános, a folyadékáramlást leíró fizikai paraméterekre is. Mivel pontos értékük nem befolyásolja jelentősen az általam vizsgált problémát, így a legtöbb esetben igyekeztem a vízre és a homokkő rezervoárookra jellemző értékeket választani.

Megnevezés	Jelölés	Érték	Mértékegység
Modelltartomány oldalhossza	L	10000	m
A vizsgált réteg vastagsága	l	20	m
A vizsgált réteg mélysége	z	1000	mBf
Közeg porozitása	Φ	0,1	l
Víz sűrűsége	ρ	1000	kg/m ³
Víz viszkozitása	η	10 ⁻³	Pa · s
Visszasajtott vízmennyiség	Q	200	l/min
Fajlagos tározási tényező	S_s	10 ⁻⁴	l/m
Kút átmérője	d_w	0,0889	m
Nehézségi gyorsulás	g	9,8065	m/s ²
Permeabilitás középértéke	k	500	mD

2. táblázat: A numerikus modell paraméterei

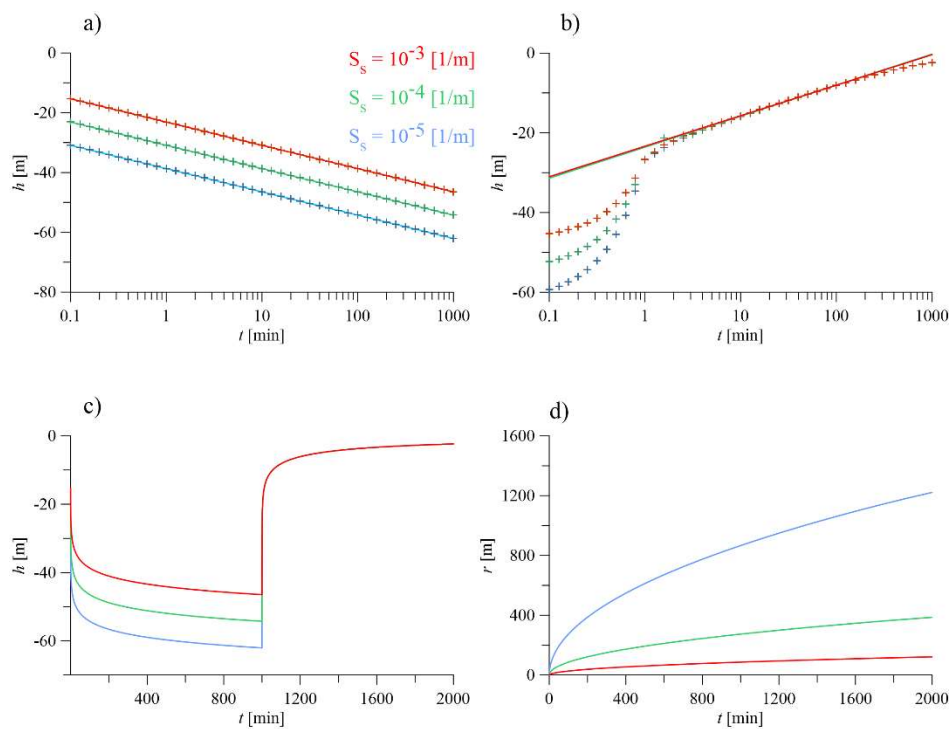
4.3. Modell verifikáció

Egy numerikus modell felállítását egyszerűvé teszik a modern modellező szoftverek, viszont a számítási eredmények helyességét nem feltételezhetjük annak ellenőrzése nélkül. A terepen alkalmazott tesztek többsége jó közelítéssel numerikus megoldásokra is alkalmazható. Jelen esetben a Jacob–Cooper-féle módszer ((9.) ill. (11.) egyenlet) használatával a leszívás és visszatöltődési görbék kiértékelése alapján verifikáltam a modellt. A verifikáció alapkérdése, hogy Jacob–Cooper módszer használatával a réteg számolt permeabilitása megegyezik-e a modellben beállított permeabilitással. A leszívás és visszatöltődési görbékre illesztettem egyenest féllogaritmikus skálán, egy logaritmus ciklusra. A kapott függvény $m \times \ln(t) + b$ alakú volt, és a $t=10-100$ min tartomány értékeire illeszkedett. Ennek m meredekségéből számítottam ki a réteg permeabilitását homogén közegben, és hasonlítottam össze a modellben megadott paraméterrel. Bár a rácsháló és a véges időlépések miatt pontatlanságok lépnek fel, a modellben a gyakorlati tesztek akadályozó tényezők egy része nincs jelen, mint például a kútban vagy közvetlen környezetében fellépő turbulencia. Emiatt a kúttesztek jól alkalmazhatók, kiemelten az első, leszívási szakaszban, ahol a numerikus számítások tapasztalataink szerint rendkívül nagy pontossággal adják vissza a várt értéket (a beállított permeabilitás értékét). A visszatöltődési szakasz is alkalmas a kútteszt végrehajtására, azonban fontos, hogy az elmélet szerint ehhez stacionárius állapot elérése szükséges. Miután a jelen modellbeli tesztek során a vizsgált időintervallumban még nem állt be tökéletesen a stacionárius állapot, ez pontatlanságot eredményezhet a kiértékelt permeabilitásban. Megemlítendő emellett, hogy a modell verifikálását és a kútteszteket a kutatás korai szakaszában végeztem el, így a bemeneti paraméterei közül a permeabilitás eltér a véglegesen választott értéktől, ez esetben 1000 mD.

Megnevezés	Jelölés	Érték	Mértékegység
Modelltartomány oldalhossza	L	10000	m
A vizsgált réteg vastagsága	l	20	m
A vizsgált réteg mélysége	z	1000	mBf
Közeg porozitása	Φ	0,1	l
Víz sűrűsége	ρ	1000	kg/m ³
Víz viszkozitása	η	10^{-3}	Pa · s
Visszasajtott vízmennyiség	Q	200	l/min
Fajlagos tározási tényező	S_s	$10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$	l/m
Kút átmérője	d_w	0,0889	m
Nehézségi gyorsulás	g	9,8065	m/s ²
Permeabilitás	k	1000	mD

3. táblázat: A modell verifikációja során alkalmazott paraméterek. A vastaggal jelölt tározási tényező a 3 különböző értékkel történő szimulációkat jelzi.

Megvizsgáltam a kiértékelt permeabilitást három különböző fajlagos tározási tényező ((3.) egyenlet) esetén is. Miután a Jacob-Cooper módszer független a fajlagos tározási tényezőtől, (ld. (9.) egyenlet) elvileg különböző értékek esetén is ugyanazt a permeabilitást kell eredményeznie a módszernek. A paraméterteszt ezt végül igazolta, a számított permeabilitások közel azonosak, de nem ugyanazok, hiszen bár a Jacob-Cooper módszer független a fajlagos tározási tényezőtől, a kút körüli áramlást lényegesen befolyásolja (ld. leszívás mértéke, távolhatás sugara). A szimulációk és a kúttesztek eredményei az 5. ábrán és a 4. táblázatban láthatók. A leszívás mértéke a várttal megegyezően a realizációkban eltér, a görbék alakja viszont minden esetben azonos. A Jacob–Cooper-teszt számított eredményei a leszívás esetén kevesebb, mint 0,1%-kal, a visszatöltődés esetén maximum 1,8%-kal térnek el a bemeneti 1000 mD permeabilitás értéktől. A Jacob–Cooper teszt számított eredményei így visszaadták a kezdeti értékeket, a felépített modell számszerűen helyesen működik.



5. ábra: A kúttesztek során tapasztalt hidraulikus emelkedési magasság értékek időbeli változása különböző tározási tényezők (S) esetén. a) h változása a termelési szakaszban, b) a visszatöltődési szakaszban, illesztett görbékkel, valamint c) a két szakasz együttesen. d) $dh = 0,05$ m küszöbértéket elérő területek maximális távolsága a kúttól.

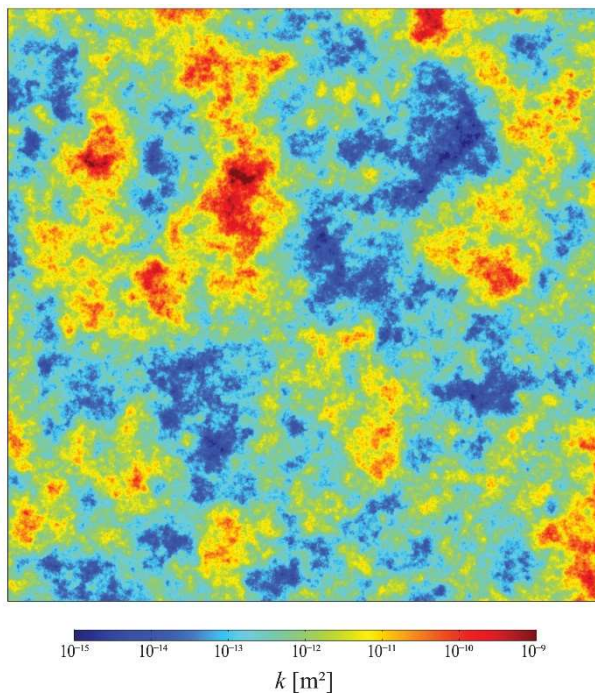
a)			
S_S [1/m]	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
m [m/ciklus]	3.3785	3.3791	3.3795
k [m ²]	$1.0008 \cdot 10^{-12}$	$1.0006 \cdot 10^{-12}$	$1.0005 \cdot 10^{-12}$
k [mD]	1000.7746	1000.5963	1000.4907
b)			
S_S [1/m]	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
m [m/ciklus]	3.3221	3.3753	3.3764
k [m ²]	$1,0177 \cdot 10^{-12}$	$1,0017 \cdot 10^{-12}$	$1.0014 \cdot 10^{-12}$
k [mD]	1017.7830	1001.7476	1001.4039

4. táblázat: A Jacob-Cooper teszt alapján használt és számított paraméterek. a) A leszívási szakaszból számított eredmények. b) A visszatöltődési szakaszból számított eredmények.

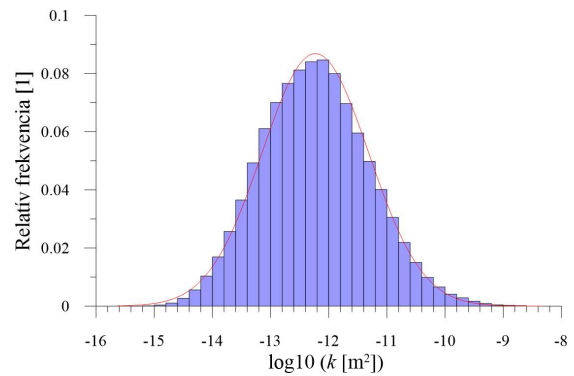
4.4 Heterogenitás generálása

A heterogén permeabilitás eloszlás generálásához a SGeMS, a Stanfordi Egyetem geostatistikai modellező szoftverét alkalmaztam (Bianchi & Zheng, 2009; Remy et al., 2009). A program sztochasztikus közegmodelleket képes előállítani bemeneti, általában valós mérési adatok között interpolálva. A kutatás során a szekvenciális gaussi szimuláció (Sequential Gauss Simulation, SGS) eljárást használtam. A SGeMS programban a permeabilitás 10-es alapú logaritmusával dolgoztam, mivel a permeabilitás logaritmusa jó közelítéssel normáloszlást követ. Bemeneti adatként összesen a permeabilitás középértékének ($500 \text{ mD} = 5 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$) 10-es alapú logaritmusát és a heterogenitás léptékét ($R=2000 \text{ [m]}$) adtam meg, melyből a program generált egy normáloszlású adatsort, úgy, hogy annak variogramja visszaadja a megadott R értéket. Az alkalmazott négyzetes rácsháló 2001×2001 rácspontot tartalmazott, a rácspontok között 5 m távolsággal. Az 5 méteres felbontást megfelelően sűrűnek gondolom, mivel az itt alkalmazott $5 \times 5 \text{ méteres}$ négyzet területe kisebb, de összevethető a COMSOL-ban alkalmazott 10 méter oldalhosszúságú, háromszög alakú rácselemek méretével. A generált eloszlás koordinátahelyes megjelenítése a 6. ábrán, a permeabilitás logaritmusának hisztogramja pedig a 7. ábrán látható.

A SGeMS-ből az adatok exportálása csak szöveges fájlként, egydimenziós adatként lehetséges, így szükség volt az adatok elé koordinátákat illeszteni, amelyet egy egyszerű Python kód segítségével oldottam meg. Ezek után a fájl importálható volt a COMSOL programba egy kétdimenziós lineáris interpolációs függvény segítségével, így a modellező program sikeresen diszkretizálta a sztochasztikus permeabilitáseloszlást mind a rácspontokon, mind a véges elemeken belül.



6. ábra: Az SGeMS szoftverben generált heterogén permeabilitáseloszlás



Hisztogram adatai:
 Átlag: -12,2303
 Variancia: 0,843503
 Maximum: -8,3331
 Felső negyed: -11,6186
 Medián: -12,251
 Alsó negyed: -12,8823
 Minimum: -15,6324
 Illesztés:
 $m = -12,2303$ és $\sigma = 0,8435$
 paraméterű normáloszlás

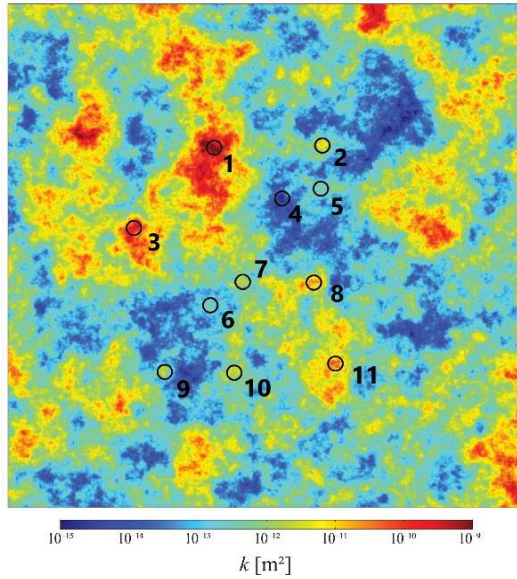
7. ábra: A generált heterogén permeabilitáseloszlás logaritmusának hisztogramja, illetve annak adatai. A hisztogramon pirossal annak elméleti eloszlása, egy folytonos normáloszlás is illeszkedik.

4.5. Vizsgált kútpozíciók és paraméterek

A permeabilitás heterogén eloszlásának viaszasajtólásra gyakorolt hatását úgy tanulmányoztam, hogy a viaszasajtoló kutakat különböző pozícióba helyeztem, és vizsgáltam a vízádóban bekövetkezett változásokat. 11 kút pozíciót vizsgáltam, ezek a 8. ábrán vannak feltüntetve, a kutak koordinátái és permeabilitás értékei pedig az 5. táblázatban. A kúthelyek választásánál célom volt egyrészt a kiugró értékek vizsgálata (pl. 1, 3, 4, 11-es kutak), másrészt pedig olyan pontpárok összevetése, ahol az adott pontok konkrét permeabilitása hasonló, de a jó permeabilitású közeg kiterjedése eltérő. Ilyenek például az 5 – 6 vagy a 9 – 10-es kutak, ahol az 5 és 9-es kutak esetén 3 oldalról sokkal rosszabb permeabilitású zónák határolják, a 6 és 10-es kutak esetén viszont minden oldalukon hasonló, vagy nem sokkal rosszabb permeabilitású közeggel vannak körülvéve. A 9-10-es kútpár esetén később részletesen bemutatom, ezek a körülmények hogyan jelennek meg a számszerű paraméterekben.

Az egyes szimulációk során számos paramétert monitoroztam a modellben az idő függvényében:

1. Hidraulikus emelkedési magasság növekedése a kútban: értéke jól reprezentálja a jobb permeabilitású zónák közötti kommunikációt

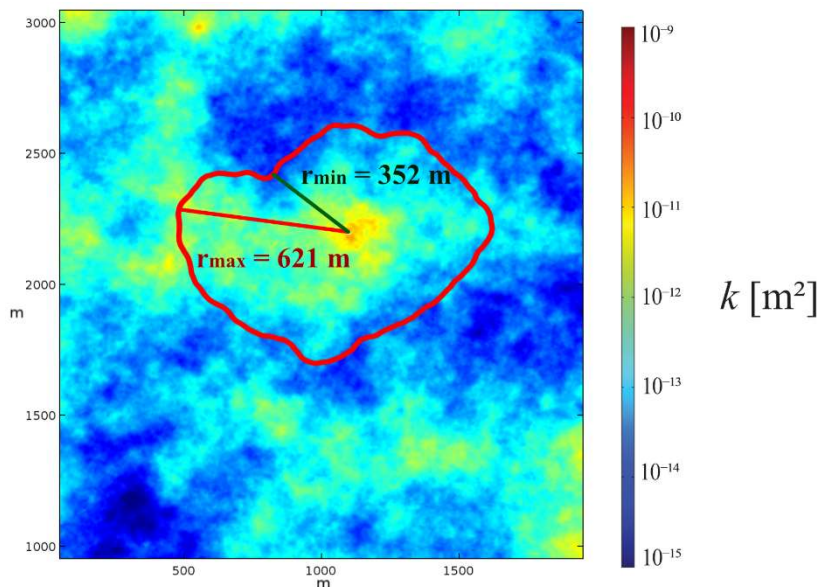


Kút sorszám	x [m]	y [m]	log10(k)	k [m²]
1	-950	2100	-8,500	$3,16 \cdot 10^{-9}$
2	1100	2200	-10,653	$2,22 \cdot 10^{-11}$
3	-2500	600	-9,556	$2,78 \cdot 10^{-10}$
4	300	1200	-14,975	$1,1 \cdot 10^{-15}$
5	1100	1300	-12,204	$6,25 \cdot 10^{-13}$
6	-1150	-1000	-12,205	$6,24 \cdot 10^{-13}$
7	-350	-550	-11,540	$2,88 \cdot 10^{-12}$
8	700	-600	-10,685	$2,07 \cdot 10^{-11}$
9	-1950	-2350	-11,289	$5,14 \cdot 10^{-12}$
10	-750	-2350	-11,237	$5,8 \cdot 10^{-12}$
11	1350	-2100	-10,253	$5,59 \cdot 10^{-11}$
homogén	0	0	-12,301	$5 \cdot 10^{-13}$

5. táblázat: A kúthelyek koordinátái és a kutak permeabilitás értékei

8. ábra: A heterogén permeabilitáseloszláson ábrázolt kúthelyek

- Maximális és átlagos Darcy-fluxus nagysága a teljes rétegben, melyek közül a maximális Darcy fluxus jellemzi az egyes kútpozíciókban a kút körül fellépő áramlás intenzitását.
- A hidraulikus emelkedési magasságban bekövetkező 5 cm növekedést elért területek kiterjedésének (azaz, ahol $dh = 0,05$ m) monitorozása, mellyel lényegében a hatástávolságot vizsgáljuk. Az r_{min} a kúthoz legközelebb eső, még $dh = 5$ cm el nem érő pont, r_{max} , pedig a legtávolabb eső, $dh = 5$ cm értéket már elérő pontok voltak. A 9. ábrán szemléletesen ez a $dh = 0,05$ m értékű kontúrvonal kúttól való minimális és maximális távolságát jelenti.



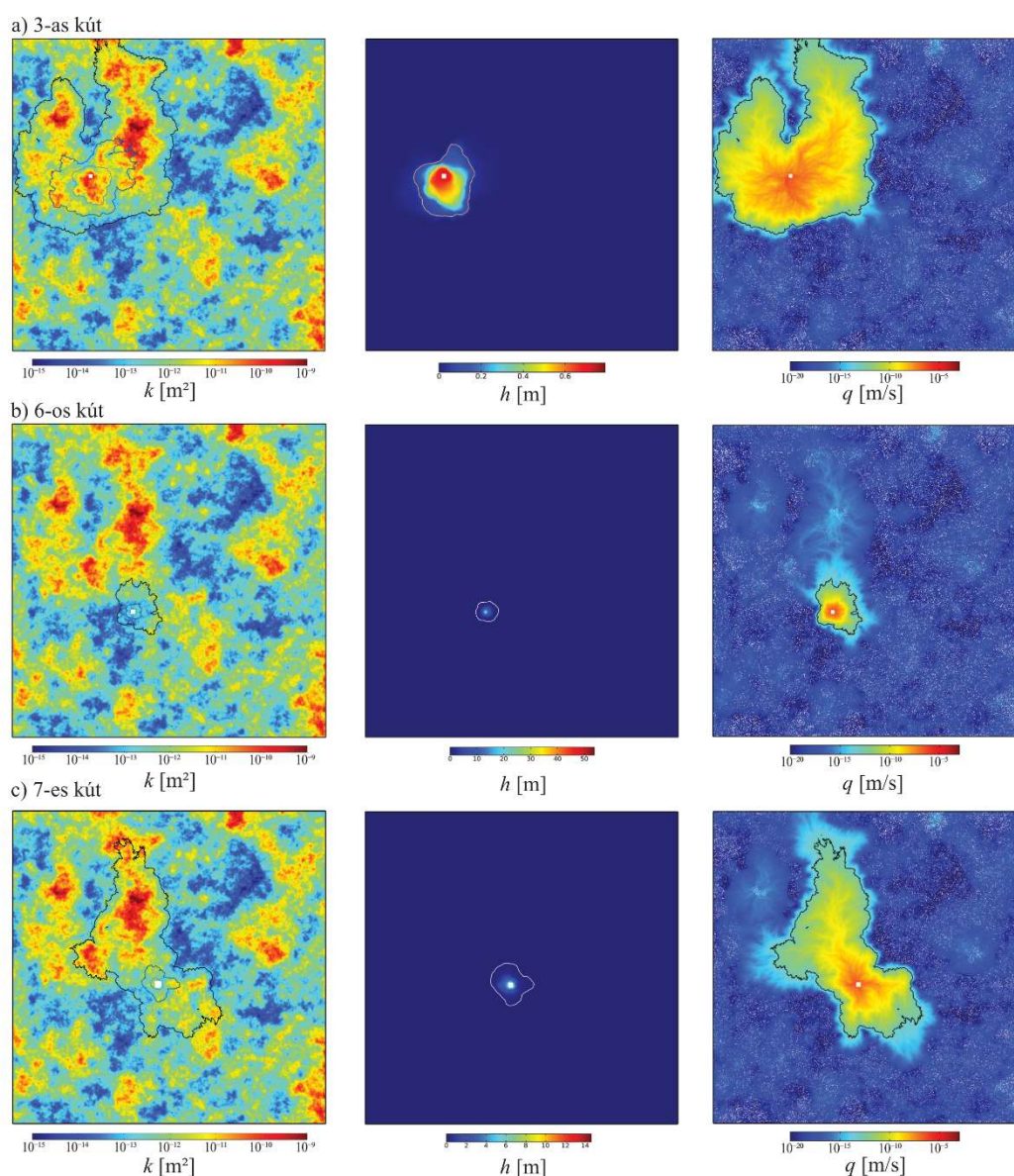
9. ábra: A r_{min} és a r_{max} szemléletes bemutatása a 10. kút példáján a permeabilitás-eloszlás térképen. r_{min} a kúthoz legközelebb lévő, a $dh = 0,05$ m értéket még nem elérő pont távolságát, r_{max} a kúttól legtávolabb lévő, $dh = 0,05$ m értéket már elérő pont távolságát jelöli. Hasonló módon lettek kigyűjtve $q_{r(min)}$ és $q_{r(max)}$ adatsorok.

4. A $q = 10^{-13}$ m/s erősségű fluxus határa, mely esetén a 3. ponthoz hasonlóan az ezen pontok kúttól való minimális ($q_{r(min)}$) és maximális ($q_{r(max)}$) távolságát tanulmányoztam. Ezzel lényegében szintén a hatásterületet vizsgáltam egy másik aspektusból, hiszen ez azt fejezi ki, hogy a besajtolásból meginduló áramlás hogyan terjed tova a közegben a vizsgált időskálán, és milyen „távolságban hozza mozgásba a pórusvizet”.

5. Eredmények

5.1. A realizációk összesített eredményei

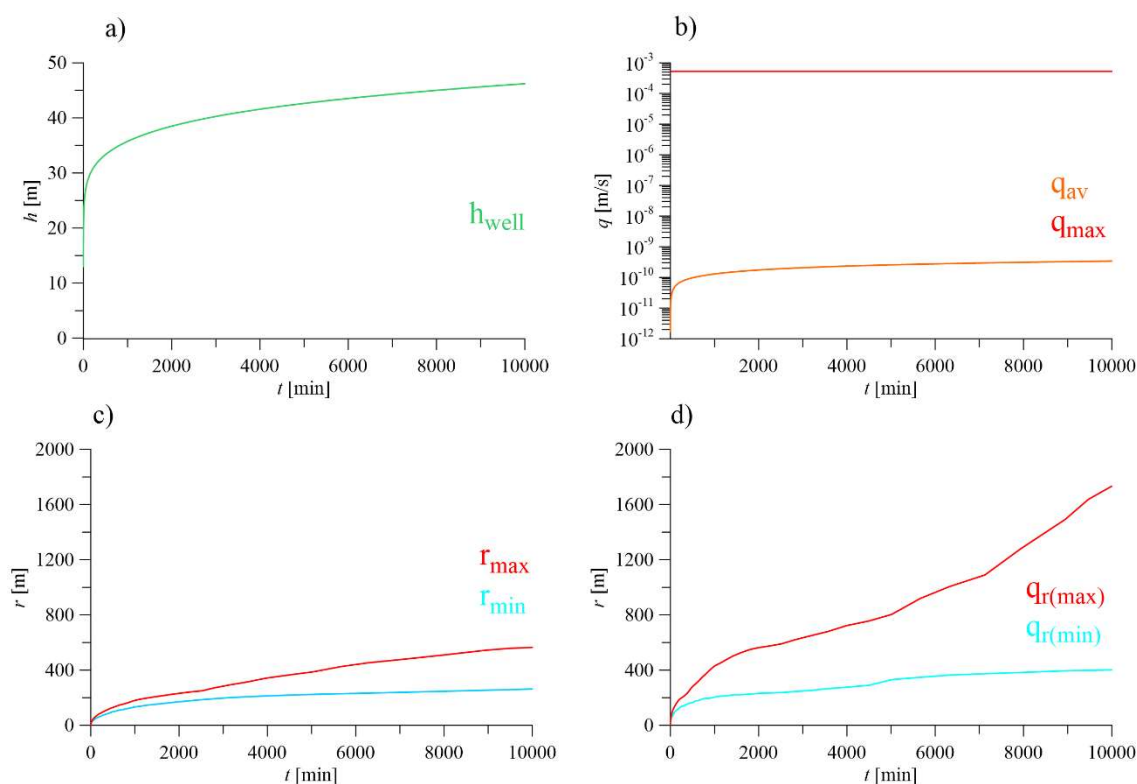
A realizációkhoz egyenként elkészítettem 3 ábrát, amelyekből válogatott példákat mutatok be a 10. ábrán, a 11 szimuláció összesített ábrái pedig az *I. mellékletben* található. A 3 ábra balról jobbra haladva: A $t = 100, 1000, 10000$ min időpillanatokban $q = 10^{-13}$ m/s kontúrvonalak a permeabilitáseloszláson; a h hidraulikus emelkedési magasság térbeli eloszlása 10000 perc után, $dh = 0,05$ m kontúrvonallal; illetve a Darcy-fluxus térbeli eloszlása 10000 perc után a $q = 10^{-13}$ m/s kontúrvonallal.



10. ábra: A a) 3-as, b) 6-os és c) 7-es kutakhoz tartozó ábrák. 1. oszlop: A $t = 100, 1000, 10000$ min időpillanatokban fennálló $q = 10^{-13}$ m/s kontúrvonalak a permeabilitáseloszláson. 2. oszlop: h hidraulikus emelkedési magasság térbeli eloszlása, $dh = 0,05$ m kontúrvonallal. 3. oszlop: a Darcy-fluxus térbeli eloszlása a $q = 10^{-13}$ m/s kontúrvonallal.

A 10.a ábrán a 3. kút környezetében kialakuló hidraulikus emelkedési magasság és Darcy-fluxus eloszlását jelenítem meg. Ez a kút rendkívül jó permeabilitású közegbe lett elhelyezve, így a vártaknak megfelelően h emelkedése nagyon alacsony, a víz gyorsan elfolyik a környező területekre, a visszasajtolás így kevés energiabefektetés igényel. A kút hatása nagyon hamar elérte a környező jó permeabilitású közeg egészét, a Darcy-fluxus értéke már 1000 min után a kúttól több, mint egy kilométer távolságban elérte a 10^{-13} m/s értéket, amelyet a kontúr jelöl. A 10.c ábrán látható 7-es kút hatása ezzel szemben eleinte átlagos permeabilitású közegben lassan terjeszkedett, a $dh = 0,05$ m kontúrvonalat tekintve kihatása relatív kicsi. Viszont a $t = 1000$ min és $t = 10000$ min, $q = 10^{-13}$ m/s kontúrvonalak között jelentős ugrás figyelhető meg, amely tőle északnyugatra található, jó permeabilitású zónának az elérését jelzi, amelyet a 3-as kút is vizsgált. Bár a 10.b ábrán megjelenített 6-os számú kút a 7-es kút közelében helyezkedett el, a jó permeabilitású és összeköttetésű közegetől el volt választva rosszabb áteresztőképességű területekkel, így hatása a vizsgált időintervallumban nem érte el ezeket a régiókat.

Az eredmények kvantitatív vizsgálatához először a monitorozott paramétereket mutatom be az 5-ös kút példáján, a 11. ábrán és az 6. táblázatban.



11. ábra: Az 5-ös kút monitorozott paraméterei. a) h_{well} b) q_{av} és q_{max} . c) r_{max} és r_{min} . d) $q_{r(max)}$ és $q_{r(min)}$.

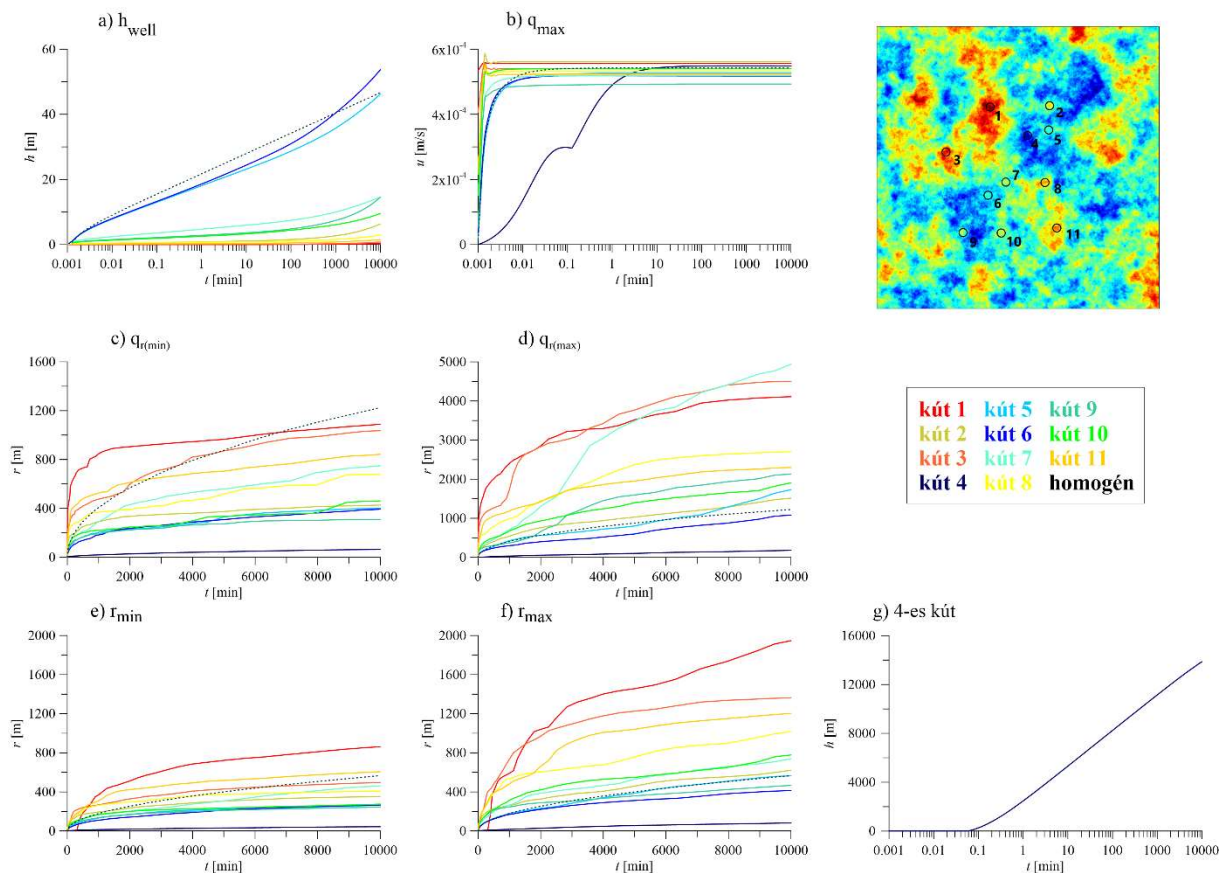
t	h_{well}	q_{av}	q_{max}	r_{min}	r_{max}	$q_{r(min)}$	$q_{r(max)}$
min	m	m/s	m/s	m	m	m	m
0.001	-0.01814	1.68E-15	2.15E-05	0	0	0.657542	1.054494
0.001259	0.940041	4.42E-14	2.41E-04	0.112649	0.137712	0.693763	0.832354
0.001585	2.157281	8.07E-14	3.55E-04	0.157253	0.182307	0.779421	0.872341
0.001995	3.233167	1.19E-13	4.11E-04	0.205227	0.213694	0.816152	0.936116
0.002512	4.072494	1.58E-13	4.44E-04	0.247772	0.253644	0.874394	1.009795
0.003162	4.814534	2.00E-13	4.66E-04	0.294527	0.29687	0.888829	1.134826
0.003981	5.481489	2.44E-13	4.81E-04	0.342409	0.345571	1.07824	1.195591
0.005012	6.098614	2.92E-13	4.91E-04	0.39572	0.394992	1.128934	1.329708
0.00631	6.693305	3.46E-13	4.99E-04	0.448427	0.454733	1.334612	1.458031
0.007943	7.263762	4.04E-13	5.05E-04	0.512995	0.517965	1.387473	1.607419
0.01	7.814406	4.68E-13	5.09E-04	0.581219	0.588565	1.580061	1.751644

6. táblázat: Az 5-ös kút monitorozott paramétereinek számszerűen $t = 0.001 - 0.01$ min között.

A 11. a ábrán a kútban mért hidraulikus emelkedési magasság (h_{well}), a Darcy-fluxus átlaga (q_{av}), a Darcy-fluxus maximuma (q_{max}), illetve a fentebb leírt r_{max} , r_{min} , $q_{r(min)}$, és $q_{r(max)}$ hatástávolságot vizsgáló paraméterek voltak. Jól megfigyelhető az utóbbi paraméterpárok időbeli elválása, például míg a $q_{r(min)}$ az időintervallum végére csak 400 m, $q_{r(max)}$ közelítőleg 1800 m távolságot is elért, amely megerősíti a jelenlévő heterogenitás erőteljes hatását.

A 12. ábrán a numerikus számítások együttes eredményei láthatók a 11 kútpozíció esetében¹. Az ábrákon az összehasonlítás érdekében egy homogén közegben, a permeabilitás középértékével ($k = 5 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$) történt szimuláció eredményei is szerepelnek (szaggatott vonal). A 12. a ábrán a kútban mért vízszint növekedése látható az idő függvényében (10000 min, azaz ~7 nap időtartományig) féllogaritmikus skálán. Az emelkedés mértéke a vártaknak megfelelően jelentős eltérést mutat a kutakat körülvevő eltérő permeabilitású környezet miatt. A homogén modellen megfigyelhető, hogy kb. 0,1 perc után lineárisra változik a féllogaritmikus skálán, míg a többi modell esetén általánosságban kisebb meredekséggel indulnak, majd 100–1000 min között meredekségük nő, a görbék felfelé hajlanak. Ennek oka, hogy a kút hatásának kiterjedésével a visszasajtolt víz elért egy rosszabb permeabilitású közeget, amely következtében gyorsul h emelkedése, vagyis nehezebben folyt el a kútba visszasajtolt vízmennyiség. Nagyobb meredekség esetén az elért zóna sokkal alacsonyabb permeabilitású volt, vagy több oldalról is körülvette a vizsgált kutat.

¹ Megemlítem, hogy a 12. a ábrától külön ábrázoltam a 4-es kutat a 12. g) ábrán. A 4-es kút az alacsony permeabilitása miatt nagyon jelentős nyomás növekedés következett be, 15000 méteres vízszintemelkedés volt tapasztalható így nem ábrázolható ugyan azon a skálán.



12. ábra: A modell 11 eltérő kútpozícióval való futtásai eredményeinek összegzése, kiegészítve a homogén realizációval (szaggatott vonal). Az a) ábra idő skálája féllogaritmikus, a többi esetben lineáris. a) A kutakban mért h értékek. b) A kutakban megfigyelt maximális Darcy-fluxus értéke. c) A közegre vonatkozó átlagos Darcy-fluxus. d-e) A $q = 10^{-13}$ m/s értéket elérő pontok minimális és maximális távolsága az adott kúttól. f-g) A $h = 0.05$ m értéket elérő pontok minimális és maximális távolsága az adott kúttól. h) A 4-es kútban mért h értékek.

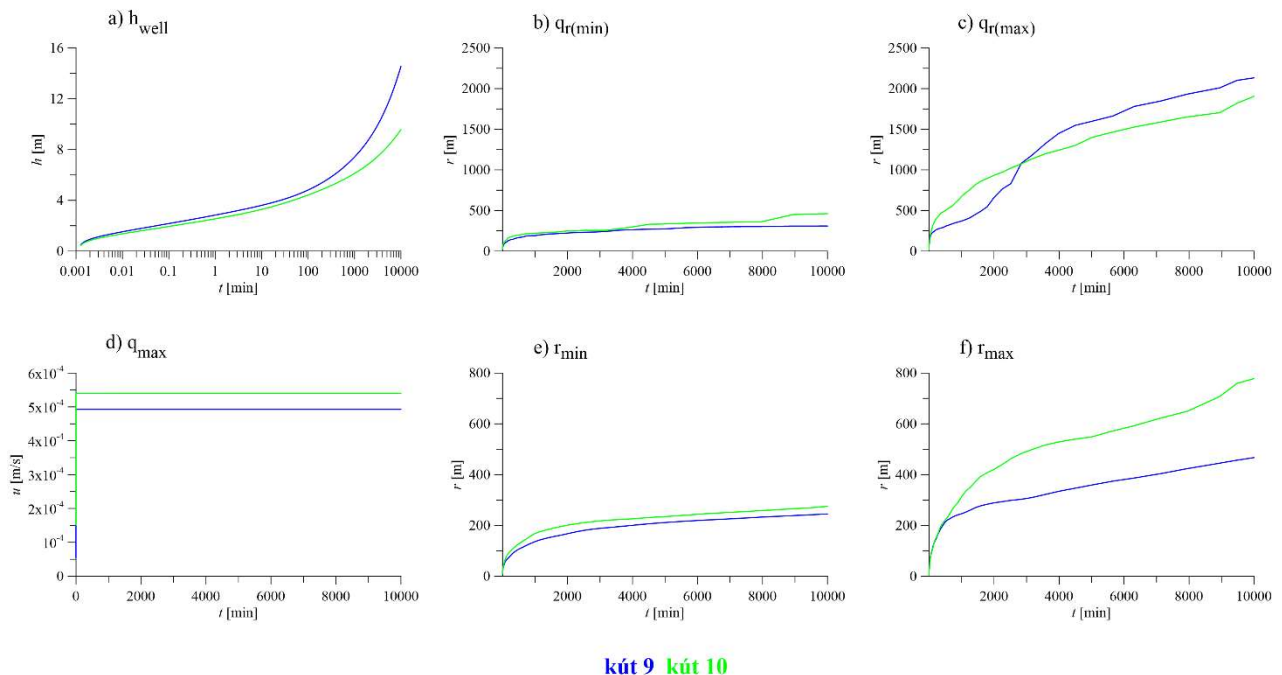
A 12.b ábrán a q_{max} , a kút határán fellépő maximális Darcy-fluxus idősorai láthatók. A 12.c ábra a $q = 10^{-13}$ m/s értéket még nem elért pontok közül a legközelebbi távolságát, a 12.d ábra pedig a $q = 10^{-13}$ m/s értéket már elért pontok közül a legnagyobb távolságot ábrázolja az idő függvényében. Ez a Darcy-fluxus egy meglehetősen alacsony érték, így olyan területeken is megjelenik, ahol h változása még nem érte el a cm-es nagyságrendet. Az 12.d ábra hirtelen növekedéseiből leolvasható, mikor lépnek összeköttetésbe egyes kutak a magas permeabilitású zónákkal. Ezek teljes terjedelmén gyorsan megindul az áramlás, ezáltal a kutak szemszögéből kis idő alatt megugrik a maximális távolság. Hasonló jelenség jelenik meg a 12.c ábrán is: rossz permeabilitású „lencsékhez” érve az áramlás gyakran kikerüli azokat, így amikor az itt fellépő áramlás is eléri a $q = 10^{-13}$ m/s küszöbértéket, az ábrán tapasztalható egy hirtelen emelkedés.

A 12.c-d ábrák „párjai” a 12.e-f ábrák, ahol a $dh = 0,05$ m küszöbérték volt definiálva. Elmondható, hogy a 12.c-d és 12.e-f ábrák közel azonos tényezőktől függenek, a fő különbség, hogy a Darcy-fluxus küszöbértéke jóval „gyengébb” feltételnek tekinthető, mint a dh küszöbérték, így adott pont gyorsabban érte el az előbbi. 12. f ábra alapján megállapítható,

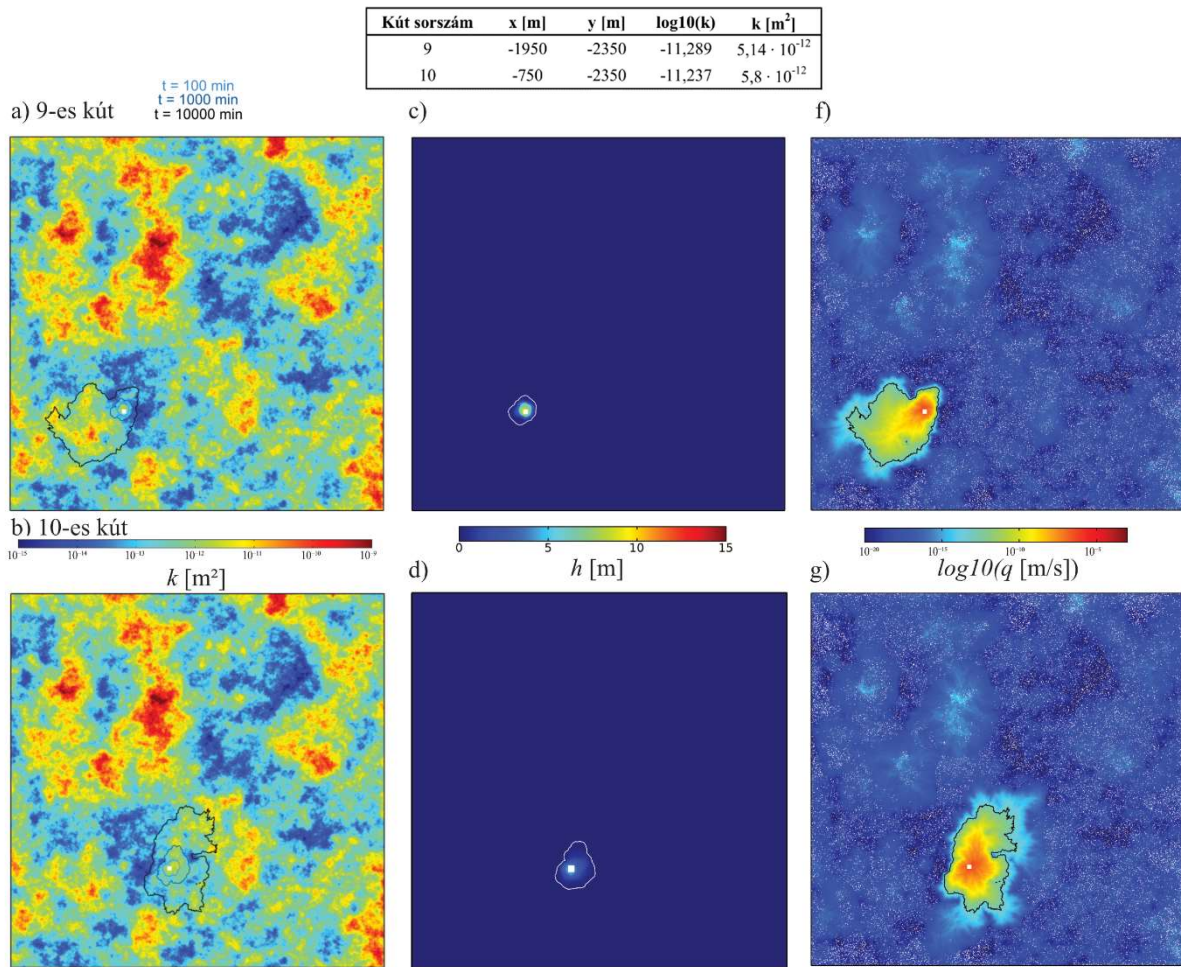
hogy a heterogenitás függvényében egyes kutak esetén az 5 cm-es hidraulikus emelkedési magasság növekedés több kilométeres távolságban is észlelhető, míg más esetekben az 500 m-t is alig éri el, intenzíven jelezvén a heterogenitás befolyását. Továbbá az utóbbi négy ábráról elmondható, hogy monitorozásuk fontos, mivel hasznos paramétereket jelentenek egyes kutak időbeli vizsgálatánál. Várhatóan a legnagyobb hatástávolságot a jó kiterjedésű, jó permeabilitású közegben elhelyezett 1-es, 3-as és 11-es kutak érték el, viszont kiemelkedően magas $q_{r(max)}$ értéke a 7-es kútnak, amely hatása két jobb vízáteresztőképességű zónát is elért. Ezzel egyidőben a 7-es kút h_{well} görbéje lassabban emelkedik, mint a többi kúté. Ez ahhoz vezet, hogy bár a 9-es kút esetében a lokális permeabilitás 78%-al nagyobb volt a 7-es kúthoz képest, a környező heterogenitás miatt a vizsgált idő végén a két kútban megfigyelhető hidraulikus emelkedési magasság csupán 1%-al tért el.

5.2. Két kút összehasonlítása

A heterogenitás hatásai legszembetűnőbbek, ha a kutak együttes vizsgálata helyett két olyan kutat vetünk össze, amelyek közvetlen környezete nagyon hasonló, tágabb környezete viszont eltérő. Itt a szimuláció során eleinte hasonló értékek figyelhetők meg, majd bizonyos idő múlva a környezetnek megfelelően a görbék haladása eltér egymástól. Ehhez a 9 és 10-es kutakat szeretném részletesebben bemutatni, összehasonlításuk a 13. és 14. ábrákon található.



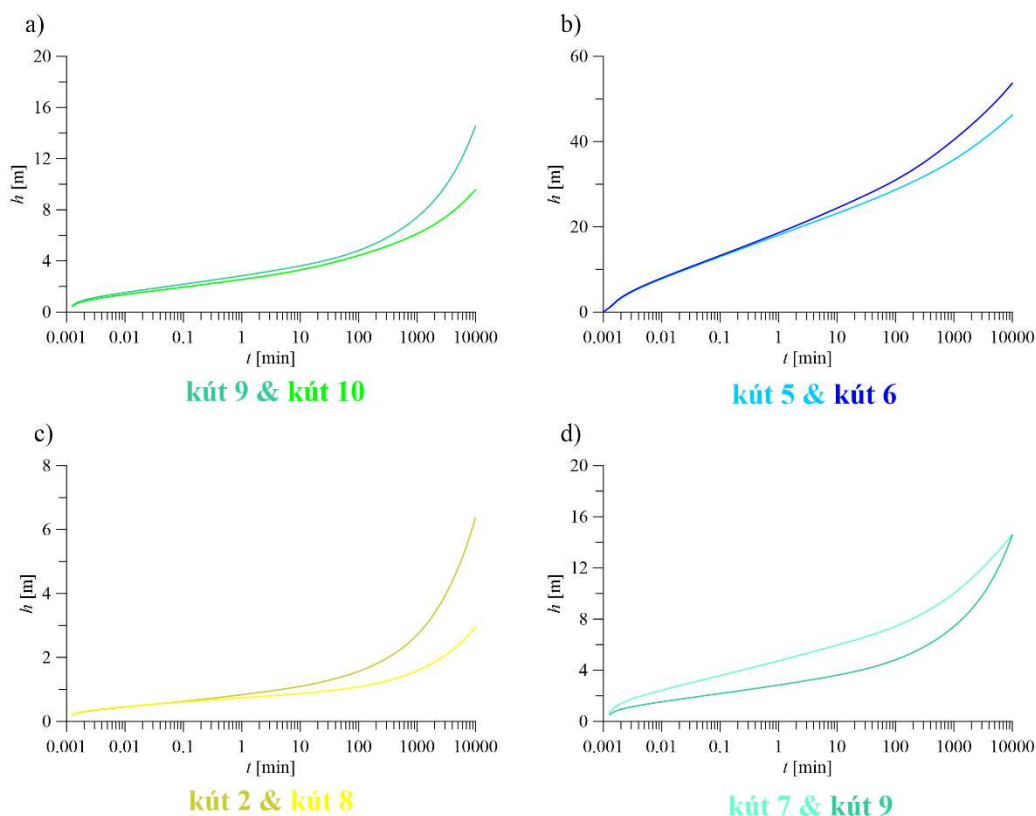
13. ábra: A 9 és 10-es kutak idősorai féllogaritmikus skálákon. a) A kutakban megfigyelt vízszlopemelkedés. b-c) A $q = 10^{-13}$ m/s értéket elérő pontok minimális és maximális távolsága a kúttól. d) A teljes közegre vonatkozó maximális Darcy-fluxus érték. e-f) A $dh = 0.05$ m értéket elérő pontok minimális és maximális távolsága a kúttól.



14. ábra: A 9 (felső sor) és 10-es kutak (alsó sor) q és h értékeit megjelenítő ábrák. a-b) A $q = 10^{-13} \text{ m/s}$ kontúrvonalak a $t = 100, 1000$, és 10000 min időpontokban, a permeabilitáseloszláson ábrázolva. c-d) A hidraulikus emelkedési magasság a két kút esetén. A kontúrvonal a $dh = 0,05 \text{ m}$ értéket jelöli 10000 min után. f-g) A Darcy-fluxus mértéke a két kút esetén. A kontúrvonal a $q = 10^{-13} \text{ m/s}$ értéket jelöli 10000 min után.

A 14. a-b ábra bal oszlopát tekintve megfigyelhető, hogy míg $t=100 \text{ min}$ kontúr hasonló, $t=1000 \text{ min}$ -nél a 9-es kút Darcy-fluxus kontúrja már elérte az azt 3 oldalról körülvevő, rossz permeabilitású zónát. Megfigyelhető, hogy a kontúr által körülvett terület kisebb, mint a 10-es kút esetén, mivel a 10-es kút környezetének áteresztőképessége jobb. Ez a hatás $t=10000 \text{ min}$ esetén is folytatódik, bár a különbség nem annyira markáns, mivel a 9-es kút hatása elérte a tőle balra található, rendkívül jó permeabilitású zónát is. Ezzel megegyezően, a 13.a ábrán 100 percig közel megegyezik a két kút h_{well} görbéje, majd ezután a 9-es kút görbéje egyértelműen elkezd meredekebbé válni, jelezve a körülötte fellépő rosszabb permeabilitást. Míg 100 percnél a h_{well} eltérése csupán (a 10-es kúthoz viszonyítva) 9%, 10000 perc után már 52%.

A 13.b és 13.e ábrákon található görbék, amelyek a hatás minimum távolságát mérik, szinte együtt haladnak a teljes időtartományban, mivel mindkét kút közelében található rossz permeabilitású zóna. A 13.f ábrán emellett látható, hogy a 9-es kút maximális kiterjedése kb. 700 perc után jelentősen elmarad a 10-es kúttól, míg addig együtt tartottak. A 13.c ábrán a kb.



15. ábra: 4 vizsgált kútkettősből megfigyelt h_{well} értékek.

3000 perc után a 9-es kút maximális kiterjedése a nagyobb, mivel hatása elért egy jó permeabilitású régiót, viszont a vizsgált időtartam nem volt elég hosszú, hogy ennek a h -ra való hatása is egyértelműen megjelenjen a görbéken.

Hasonló számításokat elvégeztem 3 másik „kútkettős” esetén is, amelyek görbéi a 15. ábrán találhatók. A 15.b-c ábrákon, az 5-6, illetve 2-8-as kutak esetén a fentebb tárgyalt, 15.a ábrán található 9-10-es kútkettőshöz hasonló jelenség figyelhető meg. Az 6-5-ös kutak esetén (az elsőként említett kúthoz viszonyítva) 1 percnél 3%, 100 percnél 8%, majd 10000 percnél 16%-os eltérés volt tapasztalható. A 2-8-as kútkettős esetén 1 percnél 13%, 100 percnél már 45%, 10000 perc után pedig 115%-kal magasabb a 2-es kútban mért hidraulikus emelkedési magasság, pedig a két kút közel azonos permeabilitású közegbe lett elhelyezve. A 15.d ábra 9-7-es kútjai esetén az előzőktől eltérően a kutak permeabilitása jelentősen különbözött, 1 perc

Kútkettős	t [min]		
	1	100	10000
10–9	11%	9%	45%
5–6	3%	8%	16%
8–2	13%	45%	115%
9–7	66%	54%	0.3%

7. táblázat: 4 vizsgált kútkettős a kútban mért h értékbeli eltérése különböző eltelt idő után, az elsőként említett kúthoz viszonyítva

után 66%, 100 perc után 54%-os volt a kútban megfigyelt h érték eltérése, viszont a 9-es kút körül található rosszabb permeabilitású zóna miatt 10000 perc után az értékek szinte egyeztek, 0,3% eltérést mutattak. Ezeket az értékeket a 7. táblázatban foglalom össze.

6. Limitáció és továbblépési lehetőségek

A szintetikus modellek használatánál számos közelítést alkalmaznak a probléma leegyszerűsítése érdekében. Az általam alkalmazott egyik legfontosabb közelítés a kétdimenziós modell választása volt, mely elterjedt közelítése a hidrológiai valóságnak, mégis hasznos információkkal szolgálhat, ha ismerjük a pontos különbségeit a háromdimenziós közeghez képest. Ez alapján a jövőben célom háromdimenzióban is felépíteni ezt a modellt, hogy igazolni lehessen a kétdimenziós közelítés érvényességét.

Az alkalmazott modellem emellett – mint minden numerikus modell – limitálva volt a választott méret, az időskála, valamint a térbeli és az időbeli felbontás által. Egyes modellek, pl. az 1-es és 3-as kutak hatása elérte a modell széleit, a rossz permeabilitású zónába helyezett 4-es kút kezdeti szakasza pedig jelentős hibával volt terhelt, amelyet a sokkal részletesebb időbeli részletességgel lehetne kiküszöbölni. Emellett pl. a 7-es kút esetén érdemes 10000 percnél tovább is elvégezni a modellezést, hiszen hatása a szimuláció végére éppen elérte a környező jó áteresztőképességű közegeket, viszont azok h -ra való hatása már nem jelent meg az adatokban. Összességében elmondható, hogy minden limitáció feloldásának van előnye, a részletesebb, nagyobb léptékű számítások javítanak a modellem eredményeinek pontosságán. Célom a probléma igénye szerint sűríteni a felbontást, bár a véges számítási kapacitás továbbra is komoly korlátot jelent ehhez.

A véges felbontás mellett korlátozást jelent továbbá, hogy a sztochasztikus probléma kezelésére egyelőre kevés mennyiségű adatot, realizációt tudtam elkészíteni, amelyekből nem lehet robusztus következtetéseket levonni, csupán megfigyeléseket, sejtéseket lehet tenni. Így fontosnak tartom a további kutatásom során a kúthelyzetek számának növelését, illetve természetesen több heterogenitáseloszláson is elvégezni a számításokat. A generált szintetikus heterogenitások mellett a jövőben a valós amplitúdótérkép alapján készített heterogenitáseloszlásra is szeretnék felépíteni egy hasonló modellt, ahol a numerikus modell eredményei összevethetők valós kutak értékeivel, ezentúl a jövőben akár az ideális kúthelyzetek kereséséhez is hasznos lehet a kifejlesztett módszer.

Hasonló megfontolásból a kutatásom következő lépésének azt tartom, hogy az egy kutas vizsgálat mellett kútpárokon, illetve teljes kútmezőkön is elvégezzek hasonló vizsgálatokat. Természetesen a valóságban egyik terület sem érintetlen, így az új kutak létesítésénél elengedhetetlen a meglévő kutak figyelembevétele. Ennek vizsgálata szükséges, hiszen jelentős problémákat okozhat a már meglévő kutak szempontjából egy rosszul elhelyezett új kút létesítése.

7. Konklúzió

A dolgozatomban megállapítottam, hogy a rezervoár heterogenitása jelentősen képes befolyásolni a visszasajtolás lehetőségeit, annak hatékonyságát. Összesen 11 szimulációt végeztem el szintetikus heterogén permeabilitáseloszlású kétdimenziós modelleken, amelyek részletes elemzéséből azon következtéseket tudtam levonni, hogy heterogén közegben a hidraulikus emelkedési magasság (h), illetve annak trendjei jelentősen változik az idő előrehaladtával, ha a visszasajtoló víz eltérő permeabilitású közeget ér el. Ennek következménye, hogy a kisebb permeabilitás hatására h értéke növekedni kezd, amely megnöveli a visszasajtoláshoz szükséges befektetett energiát. Hasonló permeabilitású kőzetbe fúrt kutak esetén is rendkívül fontos a magas áteresztőképességgel rendelkező kőzet kiterjedése, amely nem feltétlenül érzékelhető a kezdeti szakaszban. Míg 100 perc megfigyelés után két ilyen kútban a hidraulikus emelkedési magasságok közötti eltérés 10% alatti, 10000 perc elteltével ez az érték jóval 50% felé is nőhet. Ennek következménye lehet, hogy egy gyakorlati kútteszt során a különbségek mértéke akár elhanyagolhatónak tűnhet, míg csupán pár nappal később a két kút nagyon jelentős különbséget mutat. Ezek alapján egy jelentős heterogenitást mutató területen érdemes hosszú idejű, több napos tesztek végezni az előírt két órás kapacitáslépcsők helyett. Nagy kiterjedésű, jó permeabilitású kőzettest esetén alacsony energiabefektetést igénylő visszasajtolás lehetséges, viszont ha a kiterjedés ismerete nélkül létesített kút egy projekt előrehaladott fázisában ütközik rosszabb permeabilitású közegbe, jelentősen romolhat annak hatékonysága és gazdaságossága. Részletesebb következtetések érdekében mindenképpen szükség van a probléma további, részletesebb és nagyobb léptékű vizsgálatára, illetve fontos a felállított modell egyedülálló kutak mellett kútpárookra, kútmezőre való kiterjesztése.

8. Összefoglalás

Dolgozatom célja a heterogén víztározók permeabilitásának a termálvíz-visszasajtolásra gyakorolt hatásának vizsgálata volt. Ehhez elsőként ismertettem a vizsgált téma fontosságát, majd a Zala-vármegyei referenciaterületet, a felszínalatti vízáramlást leíró alapegyenleteket, és a numerikus modellezés során alkalmazott végeselemes módszer elméleti leírását. Leírtam a modell által megoldott egyenleteket, majd a modellépítés fázisait, a modell homogén verifikációját, a modell bemeneti paramétereinek meghatározásának folyamatát, majd kitértem a heterogén permeabilitáseloszlás geostatisztikus módszerrel történő generálására is. Végül ismertettem a modell numerikus számításai alapján kapott eredményeimet, bemutattam a vizsgált paramétereket, és következtetéseket vontam le a szimulációk együttes eredményein, majd kiválasztott kútkettősök ábráin keresztül. Kutatásomból arra a következtetésre jutottam, hogy egy visszasajtoló kút által megcélzott közeg esetén nem csak a kút által szűrőzött rész permeabilitása, hanem a kedvező közeg kiterjedése is jelentős hatással bír a projekt sikerességére. Emellett a dolgozatom igazolja, hogy a rezervoárookban fellépő heterogenitások vizsgálata nagy jelentőséggel bír, és számos egyéb szempont alapján érdemes folytatni a megkezdett kutatást.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőimnek, Molnár Bencének és Markó Ábelnek, akik ajánlották számomra ezt a témát, és végig támogattak az intenzív munka során. Továbbá szeretném megköszönni az Eötvös Collegium és a Bolyai Kollégium földtudomány műhelyeinek a konstruktív beszélgetéseket és a gyakorlási lehetőségeket. A kutatás az Éghajlatváltozás Nemzeti Multidiszciplináris Laboratórium RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú projekt keretében valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Axelsson, G. (2012). Role and management of geothermal reinjection. *Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells*, 11–17.
- Ben Mahrez, H., Márton, P., Márton, B., Mádl Szőnyi, J., Kovács, J., & Sztanó, O. (2023). Hydrostratigraphic decomposition of fluvio-deltaic sediments inferred from seismic geomorphology and geophysical well logs in the Pannonian Basin, Hungary. *Global and Planetary Change*, 230, 104285. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104285>
- Bianchi, M., & Zheng, C. (2009). SGeMS: A Free and Versatile Tool for Three-Dimensional Geostatistical Applications. *Groundwater*, 47(1), 8–12. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00522.x>
- Budai, S., Willems, C. J. L., Colombero, L., & Westaway, R. (2024). Influence of sedimentary architecture on static connectivity and geothermal doublet performance (Mezőberény, SE Hungary). *Marine and Petroleum Geology*, 164, 106820. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2024.106820>
- BVEG. (2024). *Geologische Risikobewertung tiefegeothermischer Projekte*. Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. https://www.bveg.de/wp-content/uploads/2024/04/Finaler-Entwurf_Geologische-Risikobewertung-tiefegeothermischer-Projekte_GRAUDRUCK_BVEG_DGMK.pdf
- COMSOL Multiphysics. (2020). *Porous Media Flow Module User's Guide, Version 5.6*. COMSOL AB.
- Cooper Jr, H., & Jacob, C. E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 27(4), 526–534.

- Eaton, T. T. (2006). On the importance of geological heterogeneity for flow simulation. *Sedimentary Geology*, 184(3–4), 187–201.
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.11.002>
- Galsa A. (2018). *Földi Áramlások Fizikája*. ELTE.
- Galsa, A. (2020). *Numerical Modelling of Geophysical Problems*. [s.n.].
- Goldbrunner, J., Bauerl, R., Kolb, A., & Schubert, A. (1999). Geothermal cascade use at Geinberg, Austria. *Bulletin d'hydrogéologie*, 17, 209–216.
- Gringarten, A. C. (1978). Reservoir lifetime and heat recovery factor in geothermal aquifers used for urban heating. *Pure and Applied Geophysics*, 117, 297–308.
- Horváth, F., Musitz, B., Balázs, A., Végh, A., Uhrin, A., Nádor, A., Koroknai, B., Pap, N., Tóth, T., & Wórum, G. (2015). Evolution of the Pannonian basin and its geothermal resources. *Geothermics*, 53, 328–352.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.07.009>
- Kepinska, B. (2003). Current geothermal activities and prospects in Poland—An overview. *Geothermics*, 32(4), 397–407. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2003.07.006>
- Lenkey, L., Mihályka, J., & Paróczy, P. (2021). Review of geothermal conditions of Hungary. *Földtani Közlöny*, 151(1), 65. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2021.151.1.65>
- Madarász, T. (2023). Geotermikus energia hasznosítás a Kárpát-medencében - lehetőségek és kihívások válság idején: Geothermal energy utilization in the Carpathian Basin - opportunities and challenges during crisis. *Bányászati, Kohászati És Földtani Konferencia*, 104–109.
- Mádlné, S. J., Czauner, B., Simon, S., Erőss, A., Zsemle, F., Pulay, E., & Havril, T. (2018). *Hidrogeológia*. Eötvös Loránd Tudományegyetem.

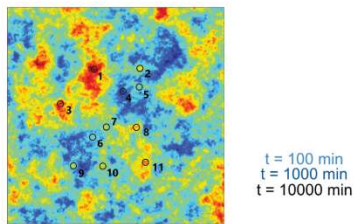
- Markó, Á., Tóth, M., Brehme, M., & Mádl-Szőnyi, J. (2022). Assessing reinjection potential of abandoned hydrocarbon wells in the Zala region (SW Hungary). *Proceedings of the European Geothermal Congress (EGC 2022)*, 384.
- Markó Á., Tóth M., & Mádl-Szőnyi J. (2024). Termálvíz-visszasajtolás és fenntarthatóság – a visszasajtolási potenciál előrejelzési lehetőségei homokkő rezervoárok esetén. *Scientia et Securitas, I(aop)*. <https://doi.org/10.1556/112.2024.00200>
- Molnár B. (2022). *Sztokasztikus közegmodellek szerepe a felszínalatti vízáramlás és hőtranszportfolyamatok szintetikus modelljeiben*. Eötvös Loránd Tudományegyetem.
- Nádor A. (2019). Geotermia határok nélkül a Kárpát-medencében. *Magyar Tudomány*. <https://doi.org/10.1556/2065.180.2019.12.4>
- Nikishkov, G. P. (2004). Introduction to the Finite Element Method. *University of Aizu*, 70.
- Remy, N., Boucher, A., & Wu, J. (2009). *Applied geostatistics with SGeMS: A user's guide*. Cambridge University Press.
- Rubio-Maya, C., Ambríz Díaz, V. M., Pastor Martínez, E., & Belman-Flores, J. M. (2015). Cascade utilization of low and medium enthalpy geothermal resources – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 689–716. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.162>
- Szanyi J., Nádor A., & Madarász T. (2021). A geotermikus energia kutatása és hasznosítása Magyarországon az elmúlt 150 év tükrében. *Földtani Közlöny*, 151(1), Article 1. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2021.151.1.79>
- Sztanó, O., Vallner, F., Katona, L., & Magyar, I. (2024). *High-resolution architecture and sand content of deltaic reservoirs: Insights from correlation of fully cored wells*. AAPG Europe Region Conference - Energy Transition: Is the European approach different? 28-29 May 2024 - Krakow, Poland.

- Tóth, A. N. (2017). Zala megye geotermikus viszonyai. *Műszaki Földtudományi Közlemények*, 86(2.), 180–187.
- Willems, C. J. L., Nick, H. M., Donselaar, M. E., Weltje, G. J., & Bruhn, D. F. (2017). On the connectivity anisotropy in fluvial Hot Sedimentary Aquifers and its influence on geothermal doublet performance. *Geothermics*, 65, 222–233.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.10.002>
- Witter, J. B., Trainor-Guitton, W. J., & Siler, D. L. (2019). Uncertainty and risk evaluation during the exploration stage of geothermal development: A review. *Geothermics*, 78, 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.12.011>
- Zimmerman, W. B. J. (2006). *Multiphysics Modeling with Finite Element Methods* (Vol. 18). WORLD SCIENTIFIC. <https://doi.org/10.1142/6141>

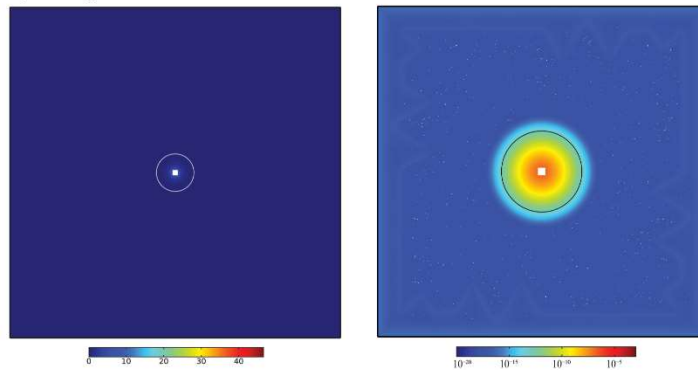
Mellékletek

I. számú melléklet: A 11 heterogén és a homogén realizáció térbeli elhelyezkedése, paraméterei, és ábrái. a) sor: adatok és a homogén realizáció. b-l) sorok: Az 1-11. kutak realizációi. 1. oszlop: A $t = 100, 1000, 10000$ min időpillanatban fennálló $q = 10^{-13}$ m/s kontúrvonalak a permeabilitáseloszlás térképén. 2. oszlop: h hidraulikus emelkedési magasság térbeli eloszlása, $h = 0,05$ m-es kontúrvonallal. 3. oszlop: q Darcy-fluxus térbeli eloszlása $q = 10^{-13}$ m/s kontúrvonallal.

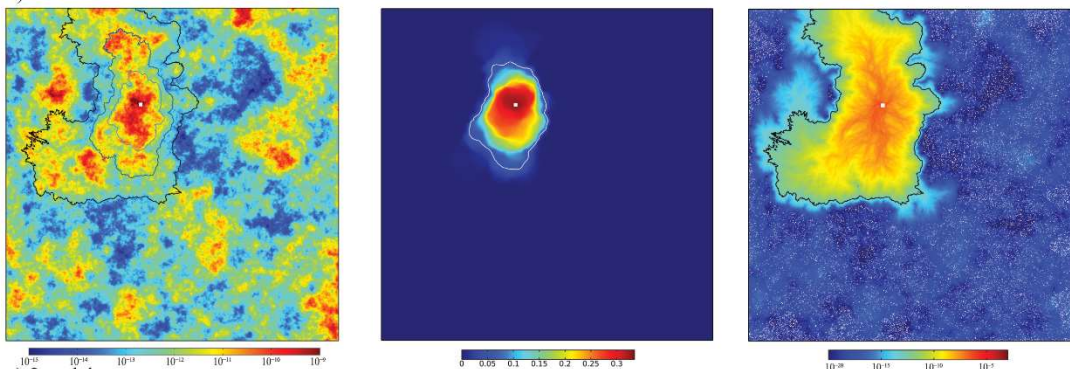
Kút neve	x [m]	y [m]	log(10k)	k [mD]
1	400	2100	8.508	$3.16 \cdot 10^7$
2	1000	2000	10.053	$2.22 \cdot 10^7$
3	-2000	400	9.536	$2.78 \cdot 10^7$
4	200	2000	14.075	1.5
5	1800	1300	12.204	0.25
6	-1100	-900	12.205	0.25
7	-500	-500	11.240	0.081
8	700	-600	13.085	$2.67 \cdot 10^7$
9	-3500	2100	11.489	0.144
10	-700	-2100	11.237	0.198
11	1500	-2000	13.333	$5.99 \cdot 10^7$
homogén	0	0	12.310	485



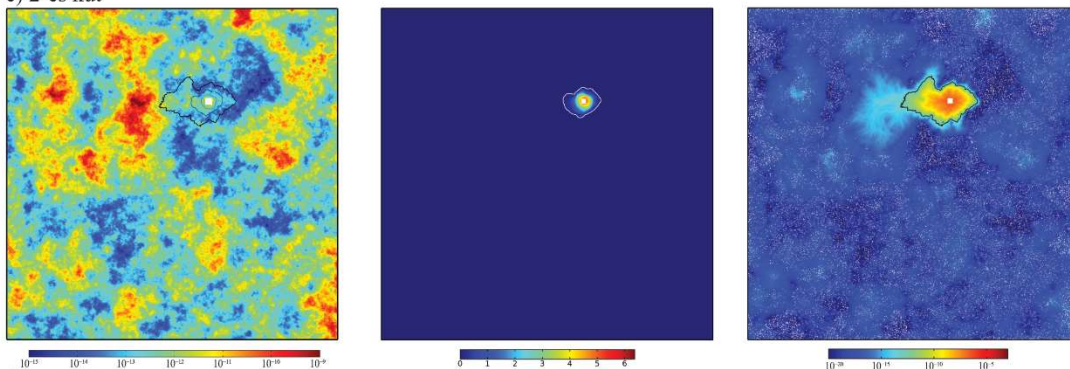
a) homogén kút



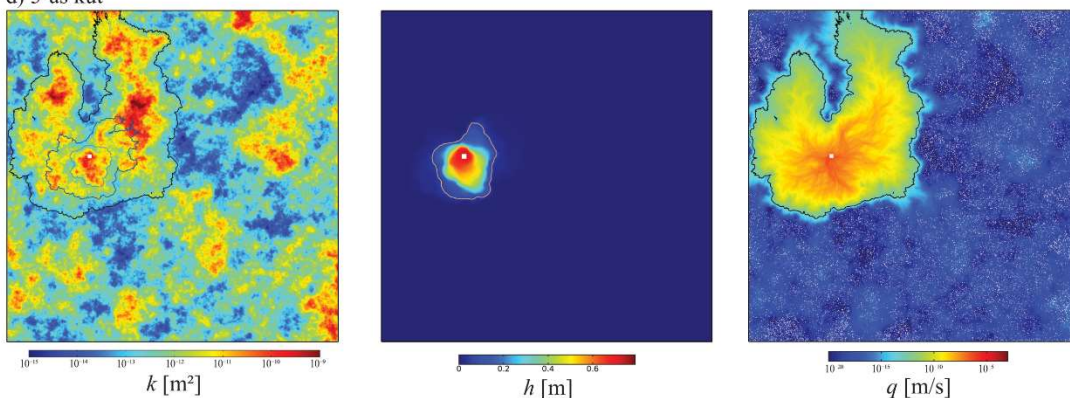
b) 1-es kút



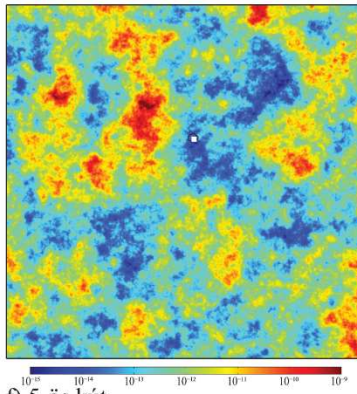
c) 2-es kút



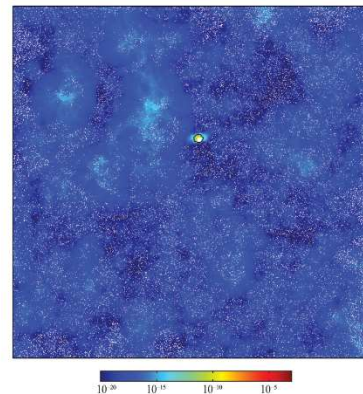
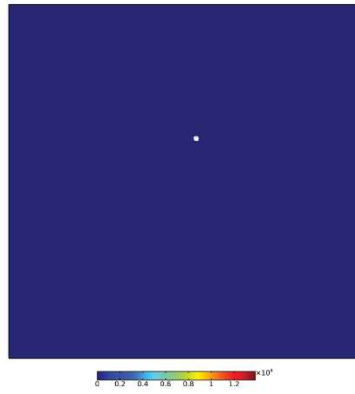
d) 3-as kút



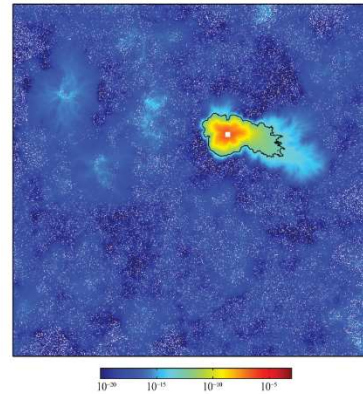
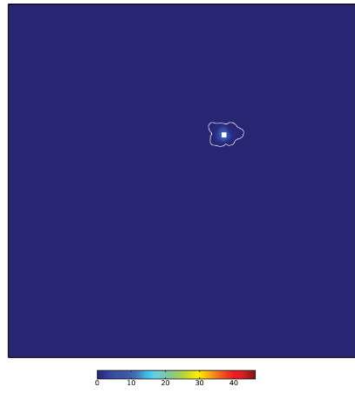
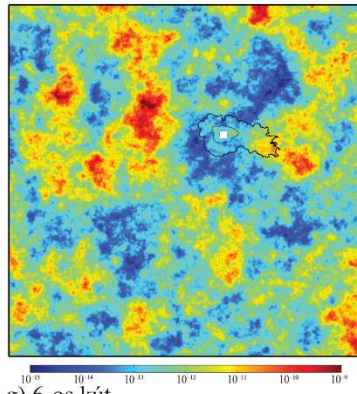
e) 4-es kút



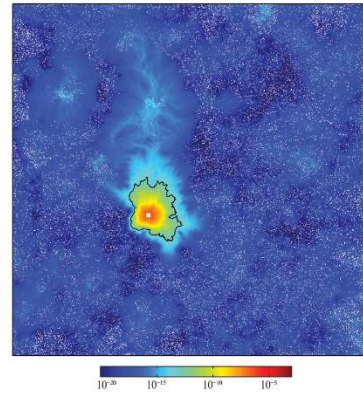
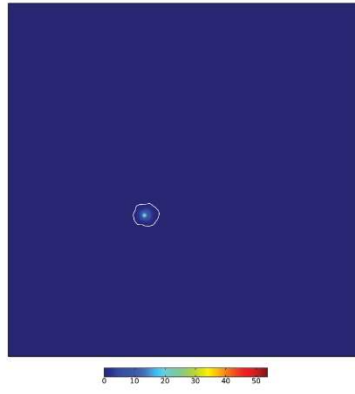
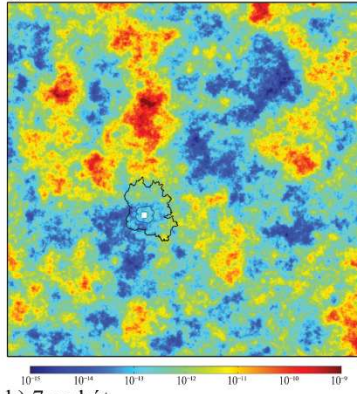
$t = 10000$ min $t = 1000$ min $t = 100$ min



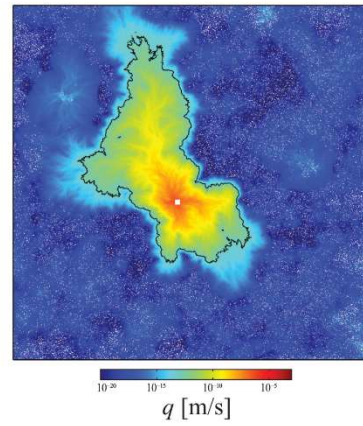
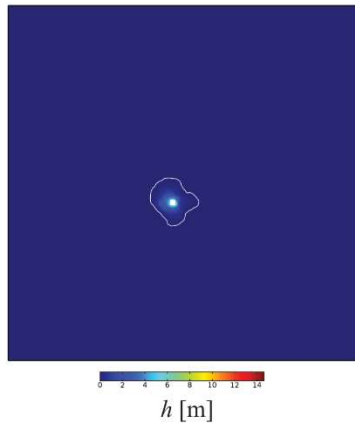
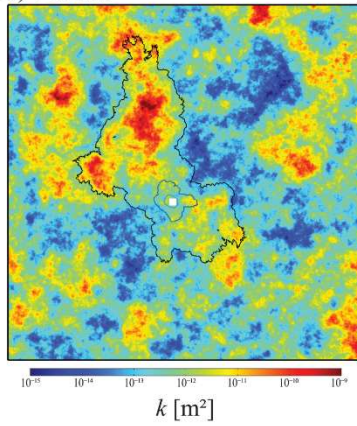
f) 5-ös kút



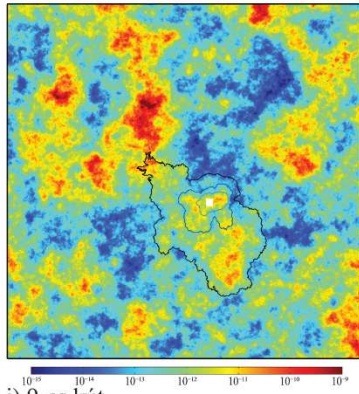
g) 6-os kút



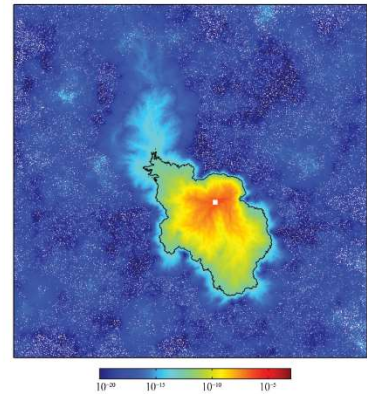
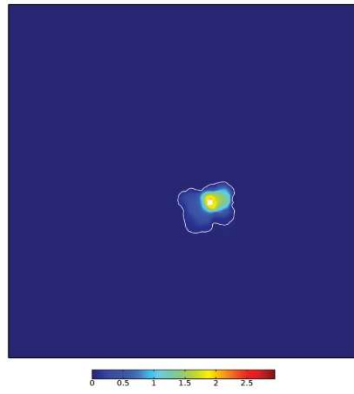
h) 7-es kút



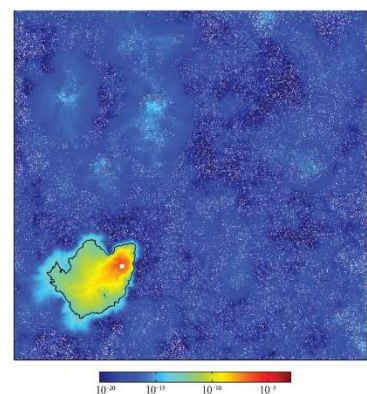
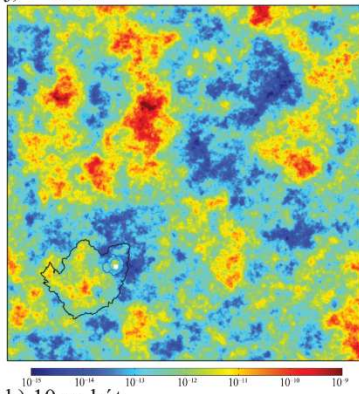
i) 8-as kút



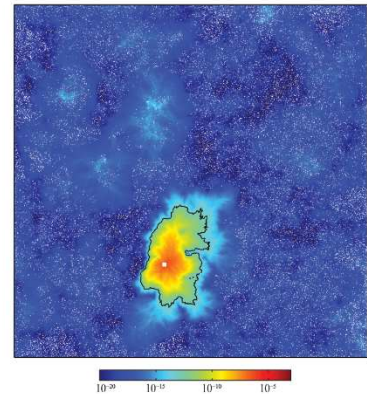
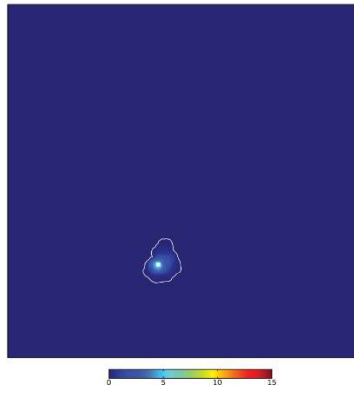
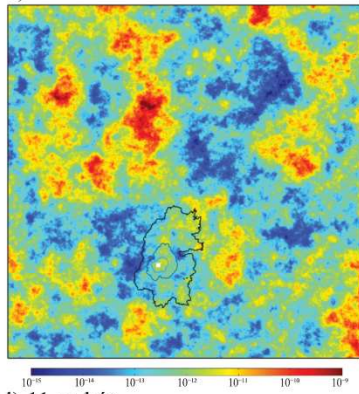
t = 10000 min t = 1000 min t = 100 min



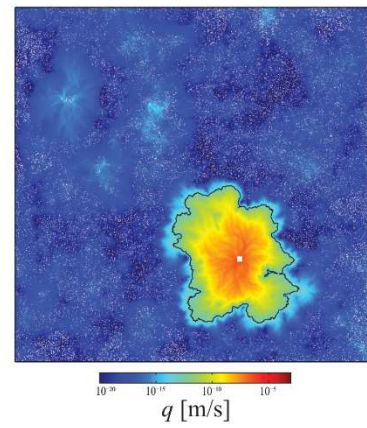
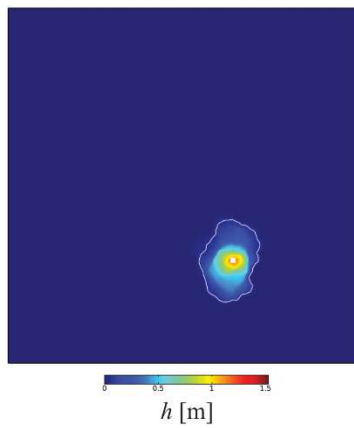
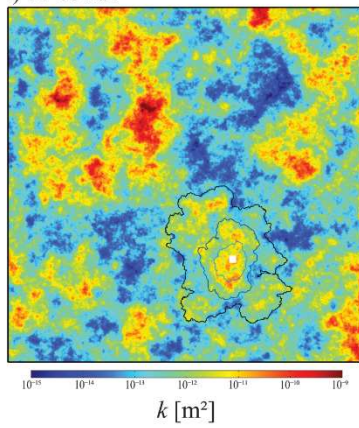
j) 9-es kút



k) 10-es kút



l) 11-es kút



$k \text{ [m}^2\text{]}$

$h \text{ [m]}$

$q \text{ [m/s]}$

II. számú melléklet: Saját eredmények

- A dolgozatomban az általam elvégzett munka leírása a 4. fejezet: Módszertan résztől kezdődik. Saját eredmény ezek alapján a
- Fizikai alapmodell felépítése a COMSOL Multiphysics program használatával, a modell határfeltételeinek, kezdeti feltételeinek megszabása
- 11 vízföldtani napló adatainak összegzése, majd azok alapján a fizikai alapmodell paramétereinek meghatározása
- A felállított alapmodell verifikációja homogén közegben, a futási eredményeken a Jacob-Cooper módszer alkalmazása
- Az SGeMS geostatisztikai szoftverrel heterogén közegmodell generálása geostatisztikai módszerekkel, melyet a COMSOL-ban felépített modellem használt
- A heterogén modell eltérő kúthelyekkel vizsgált 11 realizációjának elvégzése egy homogén kontroll modell mellett, majd a kapott 12 realizáció feldolgozása
- A realizációk összesített eredményeit bemutattam számos ábrán, példákon keresztül kvalitatív, majd kvantitatív módon is elemeztem, következtetéseket vontam le belőle
- A 9-es és 10-es kutakat részletesebben is összehasonlítottam, kiemelve a heterogenitás jelentőségét
- Meghatároztam a modellem és kutatásom limitációit, emellett jövőbeli lehetőségeit
- Eredményeimet összegeztem, konklúziót vontam belőlük, majd összegeztem a dolgozatban elvégzett munkámat
- A dolgozat végén egy 36 ábrából álló mellékletet is csatoltam, amelyen bemutatom az összes realizáció időbeli és térbeli hatását.