

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

A geotermikus beruházások kockázatelemzési stratégiájának hőtranszport-modellezésen alapuló fejlesztése a Budai Termálkarszton mint mintaterületen

Tóthi Tamara

Geofizikus mesterszak,
Kutató geofizikus szakirány

Témavezetők:

^{1,3}Dr. Szijártó Márk – tudományos főmunkatárs

^{2,3}Mádlné Dr. Szőnyi Judit – egyetemi tanár

Eötvös Loránd Tudományegyetem,

¹Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

²Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék

³Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra



Budapest, 2025

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	2
1.1 A téma kutatási háttere.....	2
1.2. Probléma és célkitűzések	2
2. Elméleti háttér	4
2.1. A geotermikus energia jelentősége.....	4
2.2. A Budai Termálkarszt és Zugló, mint mintaterület	4
2.2.1. A kutatási terület földrajzi elhelyezkedése és a tervezett kút paraméterei	4
2.2.2. A Budai Termálkarszt földtani, hidrogeológiai viszonyai	6
2.2.3. Numerikus hidrogeológiai modellek a Budai Termálkarszton	7
3. Módszertan.....	10
3.1. A kockázatelemzési módszerek	10
3.1.1. A kockázatelemzés alapjainak bemutatása egy hazai innováció alapján	10
3.1.3. A hőmérséklet és a hozam, mint kockázati tényezők	14
3.1.4. A kockázat meghatározása kvalitatív módon	15
3.2. A numerikus modellezés módszerének bemutatása	17
4. Eredmények	21
4.1. A vízádó réteg elérésének valószínűsége.....	21
4.2. A víztartó minősége, és az elvárt hozam elérésének valószínűsége	22
4.3. A megfelelő vízminőség elérésének valószínűsége	25
4.4. A hőmérsékleteloszlás becslése és a megfelelő hőmérséklet elérésének valószínűsége a választott mélységben.....	26
4.5. A visszasajtolás megvalósíthatósága	31
4.6. A Monte Carlo-szimuláció eredménye	32
4.7. A POS _p meghatározása	33
5. Diskusszió	35
5.1. Hozambecslés	35
5.2. Hőmérsékletbecslés	36
5.3. Visszasajtolás	37
5.4. A magyar és német ajánlás összehasonlítása	37
6. Összefoglalás és következtetések	39
7. Irodalomjegyzék	40
8. Mellékletek.....	43
9. Függelék – Saját eredmények.....	45
10. Köszönetnyilvánítás.....	46

1. Bevezetés

1.1 A téma kutatási háttere

Egy éve kezdtem el foglalkozni a geotermikus beruházások geológiai kockázatainak értékelésével. Budapest és a Budai Termálkarszt jelenleg is a geotermikus beruházók érdeklődésének középpontjában áll nagy hőpiaca és kiemelkedő geotermikus potenciálja miatt (MEKH, 2020). A kockázatelemzés elvégezhető arra a területre, ahol egy geotermikus projektet terveznek megvalósítani. A földtani kockázatok megfelelő értékelésével megelőzhető a nem gazdaságos beruházások megvalósítása, illetve a környezeti szempontból nem fenntartható hévíztermelésen alapuló rendszerek létesítése. Az elemzés módszertanának alapját egy nemzetközi szinten dinamikus formálódó elképzelés adja. Ennek elemeként Németországban is született útmutató a geotermikus projektek kockázatának értékelésére (BVEG – DGMK, 2024). Magyarországon Szilágyi Imre (MVM Zöld Generáció) adaptálta a szénhidrogéniparban nemzetközi szinten már évtizedek óta bevett módszert a geotermikus energia területére. A két terület azonban eltérő kockázati tényezők vizsgálatát követeli meg, így a szénhidrogénipari módszer átültetése során értékelni kell, hogy melyek a közvetlenül implementálható módszertani elemek, s melyek azok, melyeken alakítani kell a geotermikus energiára vonatkozóan. Szilágyi Imre és Mádlné Dr. Szőnyi Judit együttműködése révén született meg a gondolat a módszer tesztelésére különböző típusú geotermikus rezervoárookra. Markó Ábel PhD hallgató vezetésével sziliciklasztos mintaterületen, a Zalai-medencében végeztünk hasonló értékelést (Markó et al, 2024). A módszert folyamatosan fejlesztjük, dinamikus formáljuk. E dolgozatban karbonátos mintaterülettel foglalkozom.

1.2. Probléma és célkitűzések

A geológiai kockázatok értékelésére egyértelműen szükség van a geotermikus beruházásoknál. Ennek több oka is van. Például maguk a mélygeotermikus beruházások – főként a fúrástechnológia miatt – magas költséggel járnak. Egy olyan területen, ahol a körülmények nem megfelelőek a geotermikusenergia-hasznosításra, a projekt nem térül meg gazdaságilag. Emellett fontos, hogy a rendszerek fenntarthatóan működjenek, a fenntartható hozamot meg nem haladó termeléssel. A túlzott fluidumkitermelés olyan problémákat okozhat a drasztikus vízszintsökkenés miatt, mint például talajsüllyedés, a víztartó réteg kompaktciója által. Másik probléma lehet a rendszerek egymásra hatása. Azaz, hogy az új hasznosítók a korábbi piaci szereplők (pl.: termálfürdők) elől szivattyúzzák el a vizet, mely a turizmusra is negatív hatással lehet. Ez csak néhány példa a lehetségesen felmerülő problémák közül, de összefoglalóan elmondható, hogy a nem megfelelő geotermikusprojekt-tervezés természeti,

társadalmi és gazdasági problémákat vonhat maga után. Emiatt fontos, hogy a kockázatokat – a meglévő ismereteinkre alapozva - minél körültekintőbben értékeljük egy-egy projekt megkezdése előtt. Az egyedi projektek kockázatértékelésére alapozva pedig a potenciálisan megvalósítható projektek sorba állíthatóak. Ezzel a módszerrel így azok a projektek támogathatóak és finanszírozhatóak elsősorban, melyek kisebb földtani kockázattal rendelkeznek.

A dolgozatomban bemutatásra kerülő kockázatelemzési módszertan alapján szeretném véghez vinni a kockázatelemzési folyamatot - a magyar útmutatás szerint - a Budai Termáلكarszt egy kiválasztott hasznosítási pontjára. Emellett az is a célom, hogy egy konkrét karsztosodott karbonátos víztartó esetében bemutassam, hogy mik gátolhatják az elemzés mélységét, és melyek azok az elemek, amelyek megismerését fejleszteni lehetne. Ezen belül fontos célkitűzés a módszertan szubjektivitásának csökkentése, és annak vizsgálata, hogy ez miként minimalizálható egy iparági útmutató alapján. A kutatásomban különös hangsúlyt helyezek a numerikus modellezés szerepére, illetve arra, hogy ezt miként lehet beépíteni a folyamatba a hőmérsékletbecslés pontosítása érdekében. Mindezzel egyidejűleg egy újabb lépést szeretnék tenni a Budai Termáلكarszt rendszerének jobb megismerésére, főként annak hőmérsékleteloszlását illetően.

Ennek során első lépésben áttekintést adok a korábbi hidrogeológiai modellekről a Budai Termáلكarszt rendszerére vonatkozóan. Ezek után bemutatom a kockázatelemzés módszertanát a hazai elképzelés és a német útmutató alapján (BVEG – DGMK, 2024 és Szilágyi, 2023), hogy felvezessem, milyen módszer képezi a későbbi eredmények alapját. Ezt követően bemutatom, azt a szelvényt amely mentén elvégeztem a numerikus modellezést, ismertetem a módszert és a határfeltételeket. Az *Eredmények* fejezetében összefoglalom a kockázatelemzés és a numerikus modellezés eredményeit, valamint azt, hogy milyen problémák merültek fel az elemzések elvégzése közben, illetve mi az, amin fejleszteni lehetne.

2. Elméleti háttér

2.1. A geotermikus energia jelentősége

A geotermikus energia felhasználási lehetőségeinek kutatása igen fontos a zöld átállás szempontjából. Az üvegházgáz-kibocsátás jelentősen csökkenthető a geotermikus energia használatával a fosszilis energiahordozók égetése helyett (Paulillo et al, 2019). Emellett, a geotermikusenergia-felhasználás a vízvisszasajtolás alkalmazása mellett hosszú távon fenntartható. Habár eme beavatkozás fenntartja a rétegyomást, és biztosítja a hosszabb távú vízkitermelést, természetesen a rendszer kiépítése magasabb beruházási költséget jelent a visszasajtoló kutak fúrása miatt.

Meglepő, de világviszonylatban is alacsony a geotermikusenergia-használat aránya. A teljes megújulóenergia-piacnak az elektromos áram előállítását tekintve mindössze nagyjából 0,5%-át tette ki 2022-ben (Geothermal Energy in the EU, 2023). 2021-es adat alapján az Európai Unióban ez az arány némileg magasabb: itt a megújulóenergia-alapú áramtermelés 2,8%-át tette ki. 2022-ben az Európai Unió áramtermelésének 0,2%-át adta (Geothermal Energy in the EU, 2023). A European Geothermal Energy Council szerint geotermikus energiával kielégíthető lenne a hűtés-fűtés 25%-a, az elektromosáram-igény 10%-a Európában (Geothermal Energy in the EU, 2023). Ebből az látható, hogy az arányok még nagy mértékben növelhetők.

Magyarországon a rendelkezésre álló geotermikus erőforrások jobb kihasználására szintén számos tanulmány született, melyek közös megállapítása, hogy jelentős mértékben lehetne növelni a geotermikus energia részarányát az energiamixben gazdaságos, fenntartható módon (Szanyi et al, 2021). A geotermikus energia az elsődleges megújuló energiahordozók termelésében 5,33%-ot, felhasználásában 5,54%-ot tesz ki 7528 TJ értékkel (MEKH, 2024a), az országos hőenergia-termelésben pedig 6,95%-ot tesz ki a 2023-ra vonatkozó becsült adatok alapján (MEKH 2024b).

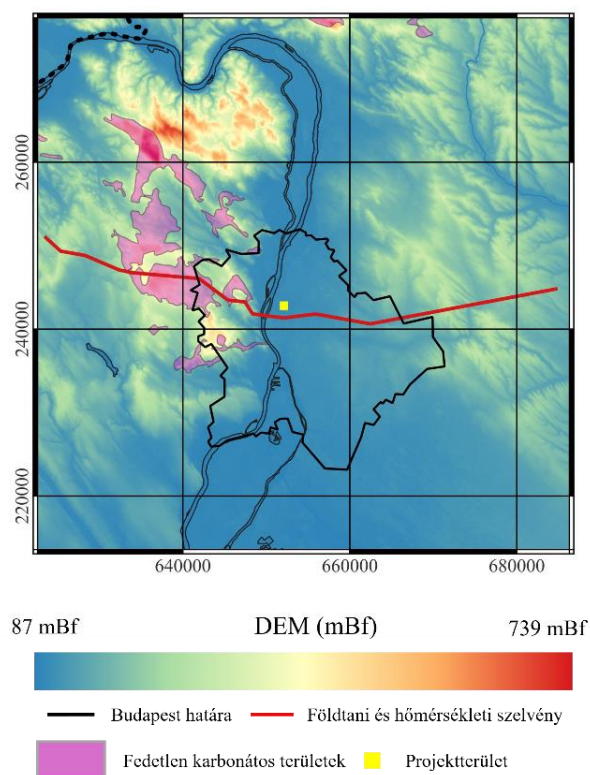
2.2. A Budai Termálkarszt és Zugló, mint mintaterület

2.2.1. A kutatási terület földrajzi elhelyezkedése és a tervezett kút paraméterei

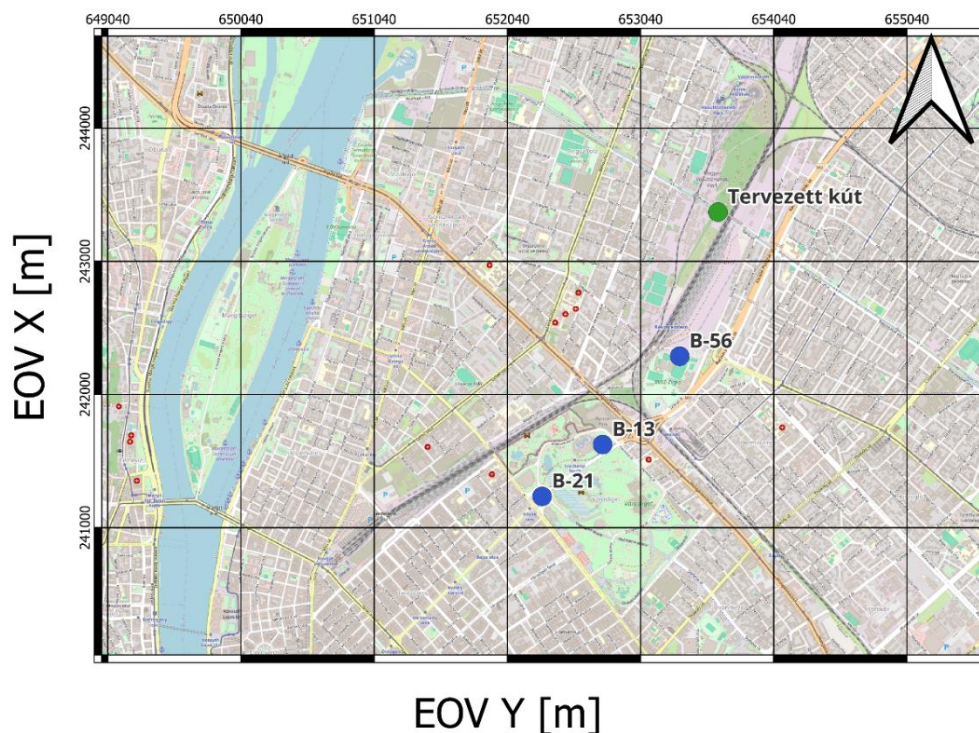
A geotermikus kockázatok geológiai elemzésének vizsgálatához a Budai Termálkarsztot (BTK), mint egy karsztosodott karbonátos mintaterületet választottam. Azonban a terület nem csak karbonátos jellege miatt specifikus, hanem mivel Budapest főváros területét érinti, ezért a geofizikai mérések korlátozottsága miatt is. Emiatt a területen zajló felszínalatti vízáramlás és hőtranszport-folyamatok pontosabb megértéséhez elsősorban a már meglévő kutak adatait (vízföldtani naplók), földtani feldolgozásokat (pl. Wein, 1974), az ezek alapján készült földtani

(Fodor, 2013, SZTFH adatai, 2024) és vízföldtani (pl. Szijártó et al, 2021) szelvényeket és numerikus modellezést lehet használni. Az agglomerációs területeken 2D és 3D reflexiós szeizmikus és magnetotellurikus mérések eredményei is elérhetőek. 2023-ban kezdte meg a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatóságának Földtani Igazgatósága a Budapesti Geotermikus Projekt megvalósítását, melynek célja a már meglévő adatokra alapozva, illetve új mérési eredményekkel földtani modellt építeni Budapestre. Ennek adatai azonban a dolgozat készítésekor még nem nyilvánosak. A hidrogeológiai modellezéshez az SZTFH és az Eötvös Loránd Tudományegyetem közötti együttműködés értelmében azonban rendelkezésemre bocsátották a földtani felületeket. Ezekről a *Módszertan* fejezetben lesz szó részletesebben.

Az 1. ábrán látható a BTK, az azon belül vizsgált projektterület, illetve egy később bemutatásra kerülő földtani és hőmérsékleti szelvény. A projektterületen, Zuglóban, Rákosrendező vasútállomásnál egy konkrét tervezett kút is kijelölésre került a kutatásom keretein belül, melyet a 2. ábra mutat be a már korábban fűrt kutakkal. Erre azért volt szükség, mert a kockázati értékelést egy adott földrajzi helyszínre kellett elvégezni az általam alkalmazott módszer szerint. A tervezett kút talpmélysége a terepszinttől számítva 1250 m, mely -1139 mBf-en helyezkedik el. A kutat terv szerint településfűtésre használnák, melynek elvárt névleges kapacitása 2,5 MW_h.



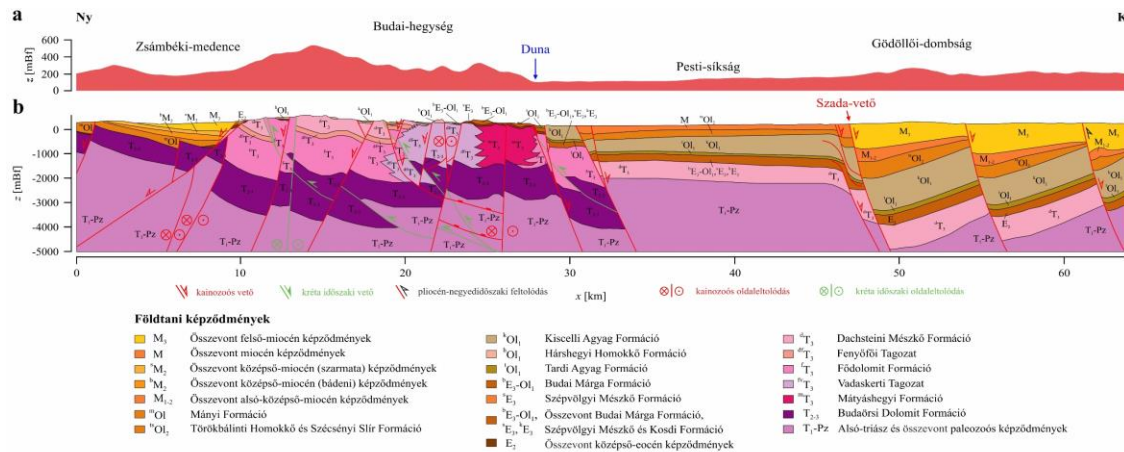
1. ábra: A kutatási terület domborzati viszonyai a Szijártó et al. (2021) által vizsgált vízföldtani szelvénnnyel



2. ábra: A projektterület három már létező termálkúttal (kék: B-21, B-13, B-56) és a tervezett kúttal (zöld)

2.2.2. A Budai Termálkarszt földtani, hidrogeológiai viszonyai

A Pannon-medence központi részén fekvő BTK nyugati, azaz budai része részben fedetlen és 2–3 km vastagságban triász mészkő, dolomit, márga és tűzkő alkotja, melyek a terület fő karsztos vízadói. Kelet felé ez a karbonátos szekvencia levetődik (Haas, 1988; 2013; Haas et al., 2000; 2014; Fodor, 2013), így nagyobb mélységbe és fedett helyzetbe kerül (Mádlné Szőnyi 2019). A keleti, azaz pesti oldalon az eocéntől kezdődően sziliciklasztos üledék, édesvízi mészkő és márga, majd az oligocénban agyag, a miocén időszaktól kezdődően ismét főként sziliciklasztos üledék települt a triász karbonátokra (Báldi és Báldi-Beke, 1985 stb.). Ennek köszönhetően a vízfogó és vízadó hidrosztratigráfiai egységek váltakoznak a pesti oldalon (Mádlné Szőnyi, 2019). A BTK jellegzetes geológiai felépítését a 3. ábrán bemutatott földtani szelvény szemlélteti. A BTK rendszer leegyszerűsítve tehát úgy definiálható, hogy a budai oldal fedetlen karbonátos terület, melyben a korábbi hipogén karsztosodás részben epigén jegyekkel felülíródott (Leél-Őssy, 2017). A pesti oldal pedig fedett karbonátos terület (Szijártó et al, 2021), mely egy eltemetett hipogén karsztrendszert tartalmaz. Ezek az üregrendszerek a vízáramlási rendszerek hatására fejlődtek ki (Mádlné Szőnyi, 2019).

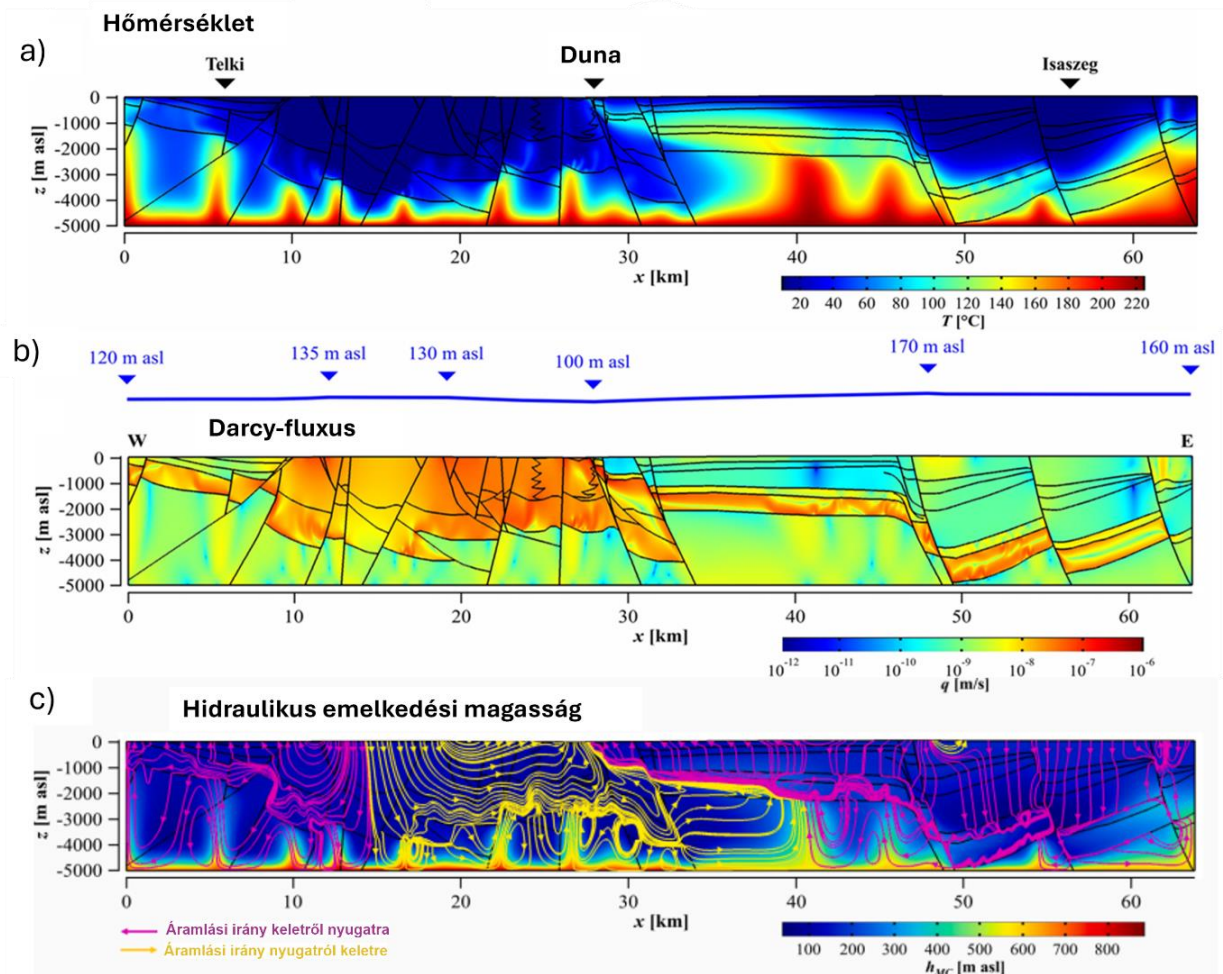


3.ábra: A Budai Termáلكarszt egy kelet-nyugat irányú keresztmetszelve (a) a topográfiával és (b) földtani értelmezéssel (Fodor, 2013); a szelvevény nyomvonala az 1. ábrán látható

2.2.3. Numerikus hidrogeológiai modellek a Budai Termáلكarsztzon

A BTK rendszerben zajló felszínalatti vízáramlás és hőtranszport-folyamatok kapcsolatáról már számos 2D numerikus szimulációt végeztek, az advekción és a termikus felhajtóerő hatását is figyelembe véve (Mádl-Szőnyi és Tóth, 2015; Havril et al, 2016; Szijártó et al, 2021, Kun et al. 2024). Ezek eredményei alapján kijelenthető, hogy ez egy igen komplex terület (például a különböző rendű áramlási rendszerek találkozása, a vízáramlást hajtó különböző erők együttes jelenléte miatt), melynek megismerése a mai napig folyamatban van. Az újabb és újabb geofizikai, földtani, vízkémiai adatok segítenek a BTK modelljének pontosításában. Az utóbbi években számos olyan modell született a BTK területén a fedett és fedetlen karbonátos régiók hipogén karsztosodásának modellezésére, melyben a víztartó és a vízzáró rétegeket ugyanazon vízáramlási rendszer részeként kezelik, hidraulikus folytonosságot feltételezve (Mádl-Szőnyi és Tóth, 2015, Mádl-Szőnyi, et al., 2022 és Kun et al, 2024 stb.).

Havril et al. (2016) az áramlási és hőszállítási folyamatok változását vizsgálta numerikus módszer segítségével geológiai időskálán. A kezdeti teljesen fedett, vízszintes tetejű karbonátos víztartó rendszer a kiemelkedés és erózió hatására fejlődött a jelenlegi fedetlen/részben fedett budai és zárt pesti rész állapotig. A szimuláció eredményei alapján a korai zárt fázisokban a termikus felhajtóerő által vezérelt szabad termikus konvekció volt a domináns hatás. Ez részben megváltozott a jelenlegi, főként topográfia-vezérelt advektív transzportfolyamat következtében, amit kényszerkonvekciónak is hívunk. Ez a hatás a részben továbbra is fennálló szabad konvekcióval együtt működik a BTK rendszerében (összetett termikus konvekció). A budai oldalon beszivárgó hideg víz jelentős hőmérsékletcsökkenéshez vezet a fedetlen rész esetében. Ezzel szemben Havril et al. (2016) jelentős hőfelhalmozódást írt le a modell (keleti) fedett részén, ahol a vízáramlás intenzitása mérsékeltebb a nyugati oldalhoz képest.

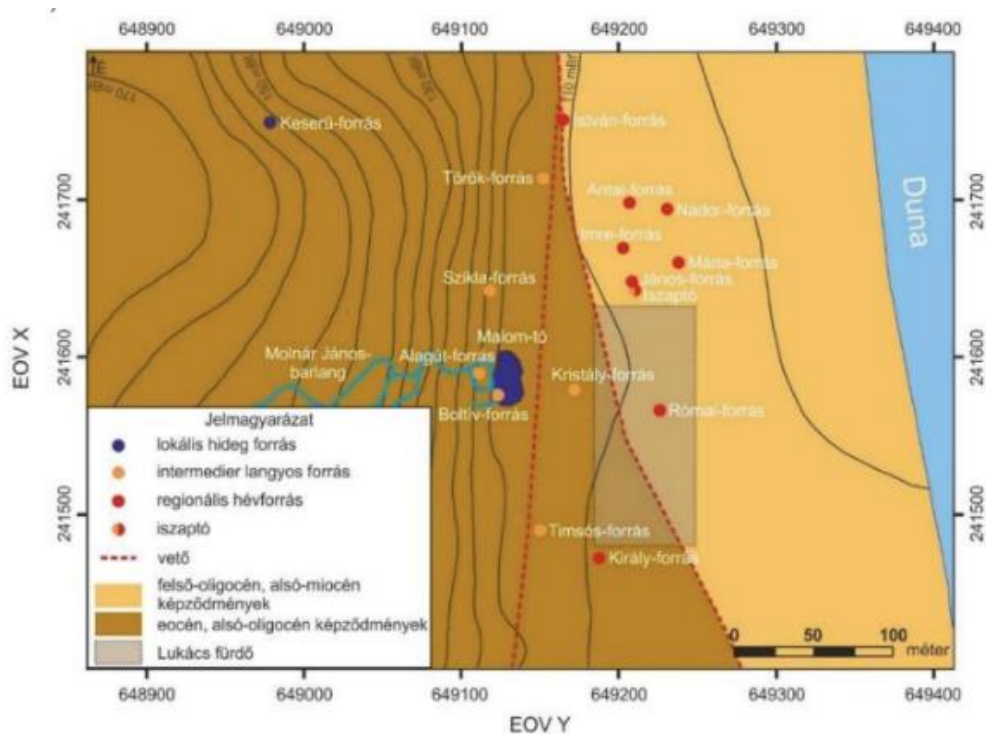


4.ábra: (a) Hőmérséklet, a (b) Darcy-fluxus és a (c) hidraulikus emelkedési magasság eloszlása áramlási irányokkal a BTK egy 2D szelvényén (1. és 3. ábra), $t=300\,000$ év elteltével (Szijártó, et al., 2021)

A 4. ábrán a 3. ábrán látható geológiai szelvényre elvégzett időfüggő szimuláció eredménye látható, ahol az összetett termikus konvekció hatását elemezték (Szijártó et al, 2021). A hőmérséklet-eloszláson (4.a ábra) megfigyelhető az áramlási rendszerek aszimmetriája, amelyet a budai oldalon hideg beszivárgást eredményező topográfia-vezérelt áramlás idéz elő. Ennek jellegét nagymértékben befolyásolja a számottevő fedőrétegek hiánya és a vízvezető-képesség eloszlása is. Például látható a 4.b ábrán, hogy a vízáramlás Darcy-fluxusa jóval magasabb a budai oldalon, mint a szelvény keleti részein, ahol viszont a felszín alatti víztükör magassága nagyobb értékeket vesz fel (s nagyobb a Dunához képest mért vízszintkülönbség), tehát ott nagyobb mértékű topográfiai hajtóerőt feltételezhetnénk ez alapján. Ugyanakkor a felhajtóerő által vezérelt áramlás továbbra is fennáll mindkét oldalon, a 2D modell mélyebb tartományaiban, mely a budai oldalon hozzáadódik a dominánsan

topográfia-vezérelt vízáramlási mintázathoz. A modellezés rávilágított a fedett pesti rész alatt ($x=35\text{--}48\text{ km}$) korábban feltételezett hőfelhalmozódásra (4.a ábra) (Szijártó et al, 2021).

A BTK komplex rendszerében elkülöníthetőek a meleg-, langyos és hidegvízű források megcsapolódási területei. A hideg források a lokális, a langyos források az intermedier rendszerekhez kapcsolódnak, a hévforrások pedig a regionális vízáramlási rendszerek végállomásai (Mádl-Szőnyi és Tóth 2015; Mádlné Szőnyi, 2019; Tóth et al. 2022). A megfigyelés felhívja a figyelmet arra, hogy egy-egy kúttal – nem kizárólag csak a kútmélység függvényében – változatos vízhőmérsékletű és változatos áramlási rendszerekhez tartozó tartományok érhetők el.



5.ábra: A rózsadombi kiáramlási terület egykori forrásainak helye (Lieb 2004; Erőss 2010 után módosítva in Bodor et al, 2015) a retrospektív feldolgozás alapján. A források besorolása statisztikai feldolgozás és numerikus szimulációs eredmények figyelembevételével történt (Bodor 2014 in Mádl-Szőnyi & Tóth 2015)

3. Módszertan

3.1. A kockázatelemzési módszerek

3.1.1. A kockázatelemzés alapjainak bemutatása egy hazai innováció alapján

A szénhidrogénipar több évtizedes működése során megszületett a gyakorlatban alkalmazott kockázatelemzési stratégiája, amely nagyon hasonlóan működik szerte a világban (Rose, 1999 és Suslick & Schiozer, 2004). Hasonlóan egységes kockázatbecslési rendszer kidolgozása lenne cél a geotermikus fejlesztések területén is, melyre több országban is indultak már kezdeményezések. Ezek általában hasonló alapokra épülnek, és az olajipari példát veszik kiindulási pontként (BVEG – DGMK, 2024 és Szilágyi, 2023). A szénhidrogénipar célja a különböző geológiai tényezők valószínűségének becslése, melyeket a gyakorlatban független valószínűségi változóként értelmeznek. Ezek szorzata adja meg a végső valószínűséget. A szénhidrogéniparban használt egyenlet a következőképpen írható fel (Szilágyi, 2023):

$$POS_{prospect} = POS_{source} \cdot POS_{migration} \cdot POS_{reservoir} \cdot POS_{seal} \cdot POS_{trap} \quad (1)$$

ahol POS = „Probability of Success”, $POS_{prospect}$ = prospect meglétének valószínűsége, POS_{source} = anyakőzet meglétének valószínűsége, $POS_{migration}$ = migrációs útvonal megfelelő adottságainak valószínűsége, $POS_{reservoir}$ = megfelelő rezervoár meglétének valószínűsége, POS_{seal} = megfelelő záróközet meglétének valószínűsége, POS_{trap} = megfelelő minőségű szénhidrogénscapda jelenlétének valószínűsége.

Figyelembe véve az (1) egyenletet, a hazai geotermikus kockázatelemzési rendszerről alkotott elképzelés úgy épül fel, hogy a következő öt elem vizsgálatát foglalja magában (Szilágyi, 2023):

- POS_{AP} = „Aquifer Presence (AP)”: Vízartó hidrosztratigráfiai egység jelenléte. Annak a valószínűsége, hogy a kívánt mélységben, ahol már elegendő hőmérséklet áll rendelkezésre, található-e megfelelő minőségű vízartó. Ezt a változót binomiális eloszlásra adjuk meg, azaz vagy jelen van a feltételezett vízartó a kívánt mélységben, vagy nem.
- POS_{AQ} = “Aquifer Quality (AQ)”: annak a valószínűsége, hogy a kiválasztott vízartóba fúrt kút nem lesz beáramláshiányos, melynek eloszlása binomiális. A vízartó minőségéhez egy olyan (normális vagy lognormális) valószínűségi eloszlást is rendelni kell, mely a hozamértékek várható eloszlását adja meg abban az esetben, amikor a kút nem beáramláshiányos.
- POS_{FQ} = “Fluid Quality (FQ)”: annak valószínűsége, hogy a vízminőség megfelelő-e, nem tartalmaz-e a túl sok oldott anyagot, illetve szénhidrogéneket, mely

megakadályozná a gazdaságos víztermelést. Feltételezés szerint a fluidumminőség tényezője is binomiális eloszlást követ.

- POS_T = “Temperature (T)”: annak a valószínűsége, hogy a kitermelhető víz hőmérséklete elegendő lesz a kívánt hasznosításhoz, mely binomiális eloszlásként definiálható. Hasonlóan a hozambecsléshez, ez esetben egy rezervoárhőmérséklet-eloszlásra van szükség arra az esetre vonatkozóan, amikor a vízhőmérséklet elegendő a geotermikus hasznosításhoz. Erről azt feltételezzük, hogy normális eloszlást követ.
- POS_{RI} = “Reinjection (RI)”: annak a valószínűsége, hogy a területen a visszasajtolás sikeresen megvalósítható. Ez elsősorban azt jelenti, hogy a kitermelt víz visszainjektálható az eredeti rétegbe úgy, hogy a rendszer a kívánt ideig fenntarthatóan képes működni – azaz a termális betörés bekövetkezése nélkül. Ezt a változót is binomiális eloszlásra adjuk meg.

Azt feltételezzük, hogy az itt felsoroltak egymástól független valószínűségi változók. A feltételes valószínűségi módszert használva – független valószínűségi változók esetén – a következő egyenlet írja le a geológiai megvalósítás valószínűségét (POS_G) (Markó et al, 2024 és Tóthi et al, 2024):

$$POS_G = POS_{AP} \cdot POS_{AQ} \cdot POS_{FQ} \cdot POS_T \cdot POS_{RI}. \quad (2)$$

A geológiai kockázat (POS_G) minden változó esetén kiszámítható a következőképpen:

$$Risk = 1 - POS, \quad (3)$$

továbbá,

$$POS_P = POS_G \cdot POS_C, \quad (4)$$

ahol POS_P = Probability of Project Success = Egy adott projekt sikerességének valószínűsége és POS_C = egy bizonyos előre kijelölt kapacitásérték elérésének valószínűsége, melyet Monte Carlo-szimulációval számíthatunk ki a hozam- és hőmérsékleti adatok eloszlásának felhasználásával:

$$Capacity = Q \cdot c_w \cdot (T_1 - T_2) \cdot \rho_{v\acute{I}z}, \quad (5)$$

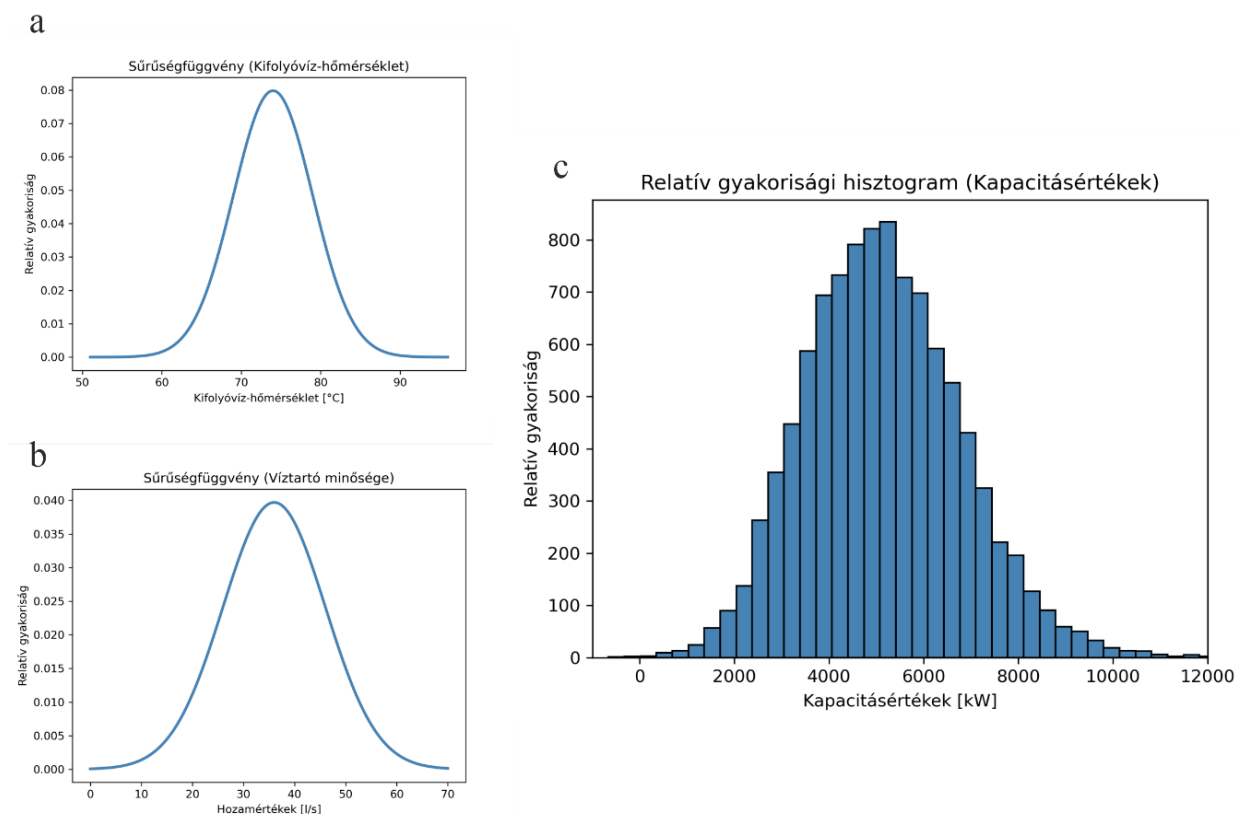
ahol Q = vízhozam [l/s]; c_w = a víz állandó nyomáson vett fajlagos hőkapacitása [J/kg°C]; T_1 = a kútfejen kifolyó víz hőmérséklete [°C]; T_2 = a visszasajtolási hőmérséklet (vagy az a hőmérséklet, mely esetében már nem gazdaságos a víz további hasznosítása az adott célra) [°C], $\rho_{v\acute{I}z}$ = a víz sűrűsége = 1 kg/l.

A Monte Carlo-szimuláció szemléletesen kiindul a két valószínűségi eloszlásból, és generál belőle egy harmadikat (6. ábra). Monte-Carlo-módszernek nevezünk számos olyan eljárást, technikát, melyek közös jellemzője, hogy véletlenszám-sorozatok generálásán alapulnak. Ezekkel a módszerekkel analitikusan követhetetlen feladatok eredményeit vagyunk képesek tetszőleges közelítéssel meghatározni (Kehl, 2012). Ez esetben a két feltételezett valószínűségi eloszlás alapján n -szer generáltam mintát, és így mind az n esetben végrehajtottam az (5) egyenlet által leírt műveletet. A kódot Python környezetben írtam meg, melyben erre létezik az `np.random.normal` függvény, így a kód a T_I értékekre a következőképpen írható:

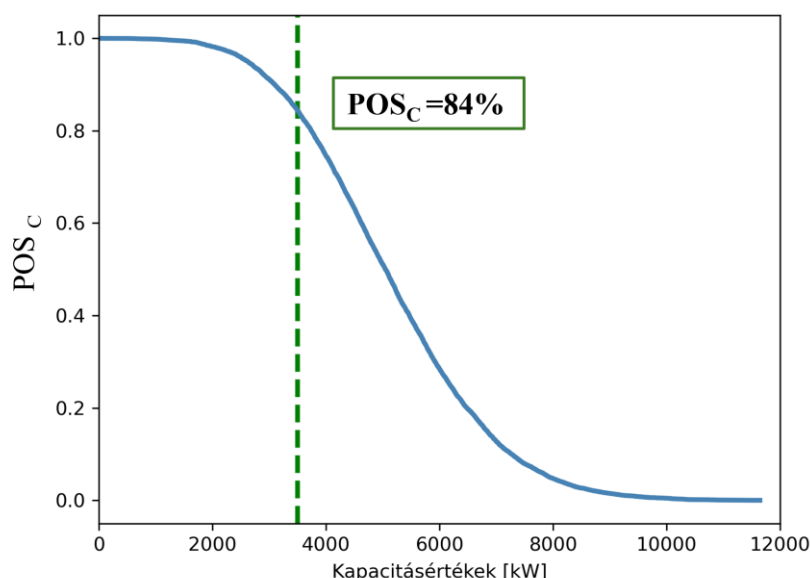
$$T1_values=np.random.normal(mean_T1,st_dev_T1,n) \quad (6)$$

ahol $T1_values$ = a véletlenszerűen generált eloszlás elemei; $mean_T1$ = az elméleti normális eloszlás várható értéke; st_dev_T1 = az elméleti normális eloszlás szórása. A kód ugyanezen az elven felírható a vízhozam esetében.

A Monte Carlo-szimulációt végrehajtó kódrészletet a *1.melléklet* tartalmazza.



6.ábra: A Monte Carlo-szimuláció (a, b) bemeneti és (c) kimeneti eloszlásai. Részletezve: (a) a kifolyóvíz-hőmérséklet sűrűségfüggvénye, (b) a hozameloszlás sűrűségfüggvénye, (c) a kapacitásértékek relatív gyakorisági hisztogramja



7.ábra: A kapacitásértékek POS függvénye, és az arról leolvasható kijelölt kapacitásérték elérésének valószínűsége

A szimulációval számított tapasztalati eloszlásfüggvény maga az $1-POS_C(\text{Capacity})$, hiszen definíció szerint az eloszlásfüggvény minden valós számhoz annak a valószínűségét rendeli, hogy a valószínűségi változó ennél kisebb értéket vesz fel. Azonban, a $POS_C(\text{Capacity})$ függvényt szeretném megkapni, mely minden valós számhoz annak a valószínűségét rendeli, hogy a valószínűségi változó ennél nagyobb értéket vesz fel. Tehát így már egyszerűen kiszámítható a $POS_C(\text{Capacity})$ függvény, mely ábrázolható, és a 7. ábrán látható módon leolvasható a segítségével az elvárt kapacitás elérésének valószínűsége, a POS_C értéke.

3.1.2. A német kockázatelemzési ajánlás összehasonlítása a hazai elképzeléssel

Érdemes összehasonlítani a német ajánlást az elemzésre a magyar koncepcióval. A német útmutató is önmagát egy általános alkalmazható módszerként definiálja, amely elsősorban egyedi projektek értékelésére lett kidolgozva (BVEG – DGMK, 2024). A módszer a következő képletet írja le:

$$POS_{\text{geological}} = POS_{\text{AquiferExistence}} \cdot POS_{\text{AquiferQuality}} \cdot POS_{\text{Communication}} \cdot POS_{\text{Chemistry}} \quad (7)$$

A képletben a „Communication” a termelő-és a visszasajtoló kút közötti kommunikációt jelenti, azaz hasonló szempontot vizsgál mint a magyar módszerben megnevezett visszasajtolás (RI). A hőmérséklet nincsen külön kockázati tényezőként feltüntetve, ennek illetve a hozam valószínűségeloszlás-vizsgálatát az ajánlás külön javasolja. Az eloszlások meghatározásának célja ez esetben is az, hogy hasonló módon, Monte Carlo-módszerrel becsülhető legyen a

kapacitás eloszlása. A különbség e tekintetben mindössze annyi, hogy a fluidum sűrűségének eloszlását, így annak bizonytalanságát is figyelembe veszi, mellyel a magyar ajánlás viszont nem számol. Az eloszlás meghatározása után lehetővé válik, hogy azzal tovább számoljunk a következő módon:

$$POS_{Total} = POS_t \cdot POS_{W(t)} \quad (8)$$

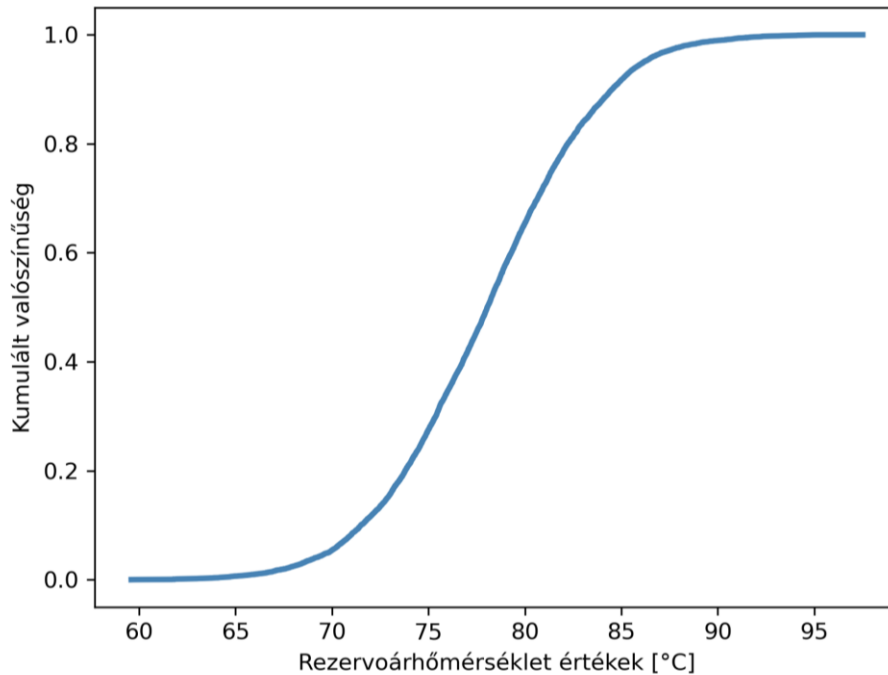
ahol POS_{Total} = A projekt sikerességének valószínűsége és $POS_{W(t)}$ = Adott kapacitásérték elérésének valószínűsége

Továbbá:

$$POS_t = POS_{geological} \cdot POS_o \quad (9)$$

ahol POS_t = technikai megvalósíthatóság valószínűsége és POS_o = operációs megvalósíthatóság valószínűsége, mely magában foglalja a fűrási és kútkiépítéshez kapcsolódó kockázatokat is. Látható tehát, hogy hasonlóan a magyar útmutatáshoz, a projektsiker valószínűsége a geológiai valószínűség és az elvárt kapacitásérték elérési valószínűségének szorzataként áll elő. Azonban itt még bevezettek egy további kockázati tényezőt (POS_o), mely a technikai akadályokat is figyelembe veszi (BVEG – DGMK, 2024).

3.1.3. A hőmérséklet és a hozam, mint kockázati tényezők

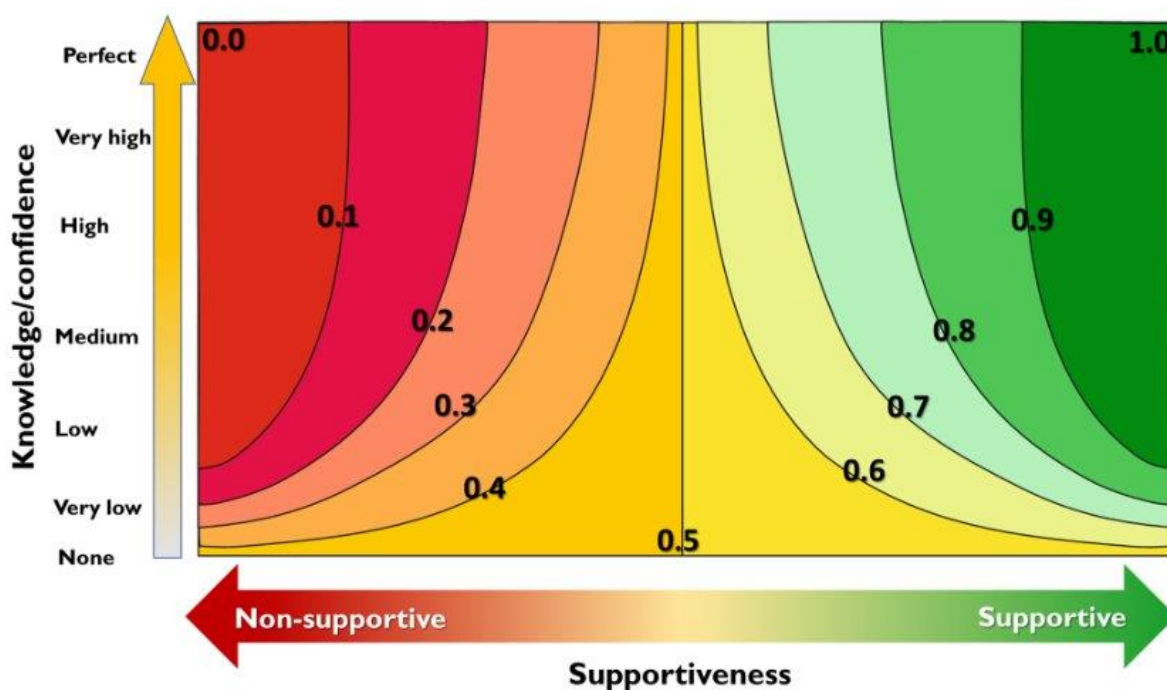


8. ábra: Példa egy víztartó rezervoárhőmérsékletének eloszlásfüggvényére

A leírtak alapján belátható, hogy mind a magyar, mind a német útmutatás szerint szükség van egy hozam- és hőmérsékleteloszlásra, mely megadja, hogy egy adott földrajzi koordinátákkal rendelkező pontban, adott mélységben mekkora hozam, és milyen rezervoárhőmérséklet várható (8. ábra). A hőmérséklet esetében következő lépésként meg kell adni a kútfejen kifolyó víz hőmérsékletének eloszlását, hiszen a víz felszínre érkezése közben hűlhet néhány °C-ot, és ez a hőmérsékleti érték az, mely meghatározza, hogy mennyi hő nyerhető ki a fluidumból. Ezek meghatározásáról részletesebben az *Eredmények* fejezetben lesz szó mind a hőmérséklet, mind a hozam esetében.

3.1.4. A kockázat meghatározása kvalitatív módon

Mivel a legtöbb esetben nem áll rendelkezésre megfelelő mennyiségű adat megbízhatóan elvégezhető statisztikai elemzéshez, így a kockázatok értékelését segíthetik kvalitatív módszerek is. Ilyeneket a szénhidrogéniparban is gyakran használtak és használnak. Erre példa a „bullhead-diagram”, amelynek mintájára készült el a 9. ábra (Markó et al, 2024 in press) által bemutatott diagram (melyhez hasonló a német módszertanhoz is készült).



9.ábra: A kvalitatív kockázatértékelést támogató diagram (Markó et al, 2024 in press, In: Eurokarst - Advances in Karst hydrogeology. s.l.:Springer)

A diagram a következőképpen hasznosítható: a vízszintes tengely mentén aszerint lehet elmozdulni, hogy a rendelkezésre álló adatok mennyire támogatják az adott geotermikus projekt létrejöttét, azaz mennyire tűnik reálisnak a geotermikusenergia-hasznosítás. A függőleges tengely mentén mozogva pedig az adatok mennyisége és minősége, így azoknak a megbízhatósága jelenik meg. Kevés adat esetén a neutrális zóna, azaz a $0,4 < POS < 0,6$ közötti tartomány kiszélesedik. Ennek az az oka, hogy ha kevés a rendelkezésre álló adat, akkor azok lehetnek támogatóak, vagy éppen ellenkezőleg, a kevés adat nagy bizonytalanságot tartogat, így a projekt megvalósulásának valószínűsége 50% körüli. Ha sok megbízható adatunk van a területről, akkor a helyzet éppen ennek ellenkezője: a neutrális zóna szűkebb, és biztosabbak lehetünk abban, hogy a projekt biztosan megvalósul, vagy biztosan sikertelen lesz. Ez esetben tehát a $POS < 0,1$ és a $POS > 0,9$ zónák szélesednek ki. A korábban megnevezett kockázati tényezők mindegyikét fel lehet tüntetni ezen a diagramon.

3.2. A numerikus modellezés módszerének bemutatása

Mivel jelen dolgozatomban hangsúlyozottan jelenik meg a hőmérsékletbecslés, így ennek módszertanát részletesen bemutatom. A numerikus modellezést a COMSOL Multiphysics szoftverben végeztem. Ennek első lépéseként szükség volt egy földtani szelvényre, melyet a Szabályozott Tevékenységek Felügyeli Hatóságának (SZTFH) Földtani Igazgatóságától kapott földtani felületekből állítottam össze. A kapott felületek a következők voltak: Prekainozoós tető, Prekiscelli-Tardi tető, Preneogén tető, Prepannon tető és Prekvarter tető. A szelvény nyomvonala a 11. ábrán látható („Zugló” szelvény). A felszíni potenciometrikus értékek (forrás: Mádl-Szőnyi et al, 2019) megadták a felszín alatti víz szintjét, mely egyben a modellter felső határát is definiálja. Mindezeket figyelembe véve öt réteg különíthető el a modellben, melyre a későbbiekben definiáltam a hőtani és hidraulikus paramétereket. A modellter vertikális kiterjedése $d=5140,3$ m, horizontális kiterjedése pedig $L=54,45$ km.

A kétdimenziós szimuláció során a topográfia-vezérelt felszínalatti vízáramlás és hőtranszport együttes hatását vizsgáltam, állandó vízsűrűség mellett. A matematikai problémát a (10) kontinuitási egyenletből, a (11) Darcy-törvényből, illetve a (12) hőtranszport-egyenletből felírt differenciálegyenlet-rendszer megoldásával lehet jellemezni:

$$\Phi \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \nabla[\rho_w \mathbf{q}] = 0, \quad (10)$$

$$\mathbf{q} = -\frac{\mathbf{k}}{\eta_w} \nabla p, \quad (11)$$

$$[\Phi \rho_w c_w + (1 - \Phi) \rho_{mx} c_{mx}] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w c_w \mathbf{q} \nabla T = \nabla \{ [\Phi \lambda_w + (1 - \Phi) \lambda_{mx}] \nabla T \}, \quad (12)$$

ahol Φ a porozitás, ρ_w a víz sűrűsége, t az idő, $\mathbf{k}$ a kétdimenziós permeabilitás-tenzor, η_w a víz dinamikai viszkozitása, c_w a víz állandó nyomáson vett fajlagos hőkapacitása, ρ_{mx} a kőzetmátrix sűrűsége, c_{mx} a kőzetmátrix fajlagos hőkapacitása, λ_w a víz hővezető-képessége, λ_{mx} a kőzetmátrix hővezető-képessége, melyet ez esetben a porozitás és a kőzetmátrix térfogati átlagolásával számítottam. A számítás során keresett paraméterek: p nyomás; $\mathbf{q}$ Darcy-fluxus; T hőmérséklet pedig az ismeretlenek.

A fizikai paramétereket az 1. táblázat foglalja össze, míg a modellezés során használt konstans értékeket a 2. táblázat mutatja. Az adatok kiindulási alapját Szijártó et al, 2021 adta, ahol a paraméterek meghatározása korábbi numerikus szimulációk, illetve adatfeldolgozások eredményei alapján történt: Garamhegyi et al., 2020; Rman és Tóth, 2011 (T-JAM project); Tóth, 2018; Mádl-Szőnyi et al., 2019; Eppelbaum et al., 2014; Bodri 1981; Dövényi és Horváth, 1988; Békési et al., 2018. Szijártó et al, 2021 esetében a modell 11 hidrosztratigráfiai egységből épült fel, azonban a jelen modellezés öt hidrosztratigráfiai csoportot tartalmaz – kiindulva az

SZTFH adatai alapján szerkesztett kronosztratigráfiai szelvényből. Ennek megfelelően egyes rétegeket össze kellett vonni. Minden paraméter esetében a számtani átlagolást alkalmaztam. Ennek indoklására szükség lehet a tenzorok esetében azok irányfüggése miatt. A kétdimenziós hidraulikusvezetőképesség-tenzort (**K**) Szijártó et al., 2021 horizontális komponensként (K_{xx}) definiálta, így ennek megfelelően több réteg átlagos vízvezető-képessége kiszámítható a következő képlettel (Salát et al, 2002):

$$K_{xx} = \frac{\sum_i K_i d_i}{d} \quad (13)$$

A képlet felírható a permeabilitásra is, hiszen az kifejezhető a hidraulikus vezetőképességből a következő módon:

$$k = \frac{K \cdot \eta_w}{\rho_w \cdot g} \quad (14)$$

A prekainozoós képződményt további két részre osztottam fel. A szelvény alsó részére egy téglalap alakú impermeábilis tartományt definiáltam a 10. ábrán látható módon, melynek vastagsága 1 km – annak érdekében, hogy függetlenítsem a megoldást az alsó határon definiált hőtani határfeltételtől. Az ábra a többi réteg permeabilitását is vizualizálja.

Kronosztratigráfiai besorolás	Hidrosztratigráfiai besorolás	K [m/s]	k [m ²]	Φ	ρ _{mx} [kg/m ³]	λ _{mx} [W/mK]	c _{mx} [J/kgK]
Prekvarter képződmények	Neogén üledékes víztartó	10 ⁻⁶	5,1·10 ⁻¹⁴	0,15	2200	1,8	840
Prepannon képződmények	Neogén üledékes és karbonátos víztartó	6,50·10 ⁻⁷	3,31·10 ⁻¹⁴	0,1	2400	1,9	870
Preneogén képződmények	Oligocén üledékes vízrekesztő	3,75·10 ⁻⁸	1,91·10 ⁻¹⁵	0,075	2250	1,65	1500
Prekiscelli-tardi képződmények	Eocén-oligocén üledékes víztartó	10 ⁻⁶	5,1·10 ⁻¹⁴	0,15	2100	2,00	840
Prekainozoós képződmény	Triász karbonátos víztartó	6,54·10 ⁻⁶	3,33·10 ⁻¹³	0,12	2720	2,325	820
Prekainozoós képződmény (segédréteg)	Alsó triász-paleozoós vízrekesztő	-	Impermeábilis réteg	0	2720	2,325	820

1. táblázat: A hidrosztratigráfiai egységek hidraulikus és hőtani paraméterei

Paraméter	Paraméter leírása	Értéke
ρ_w	Víz állandó sűrűsége	1000 kg/m ³
η_w	Víz dinamikai viszkozitása	5·10 ⁻⁴ Pas
c_w	Víz fajlagos hőkapacitása	4200 J/kgK
λ_w	Víz hővezető-képessége	0,6 W/mK
T_s	Felszíni hőmérséklet	11 °C
q_{hb}	Hőfluxus a modelltér alján	90 mW/m ²

2. táblázat: Egyéb paraméterek összefoglaló táblázata

A következőkben a modell határfeltételeit fogom bemutatni. Elsőként a Darcy-fluxushoz kapcsolódó peremfeltételeket definiálva:

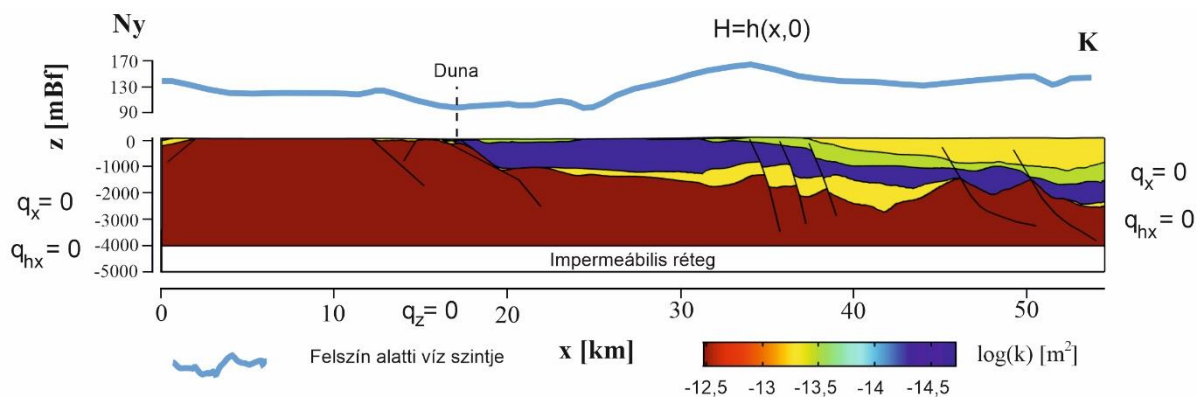
$$q_x|_{x=0,L} = q_z|_{z=d} = 0 \quad (15)$$

Ez azt jelenti, hogy a két oldalsó határon, illetve az alsó határon keresztül nincs áramlás, azaz impermeábilis határok.

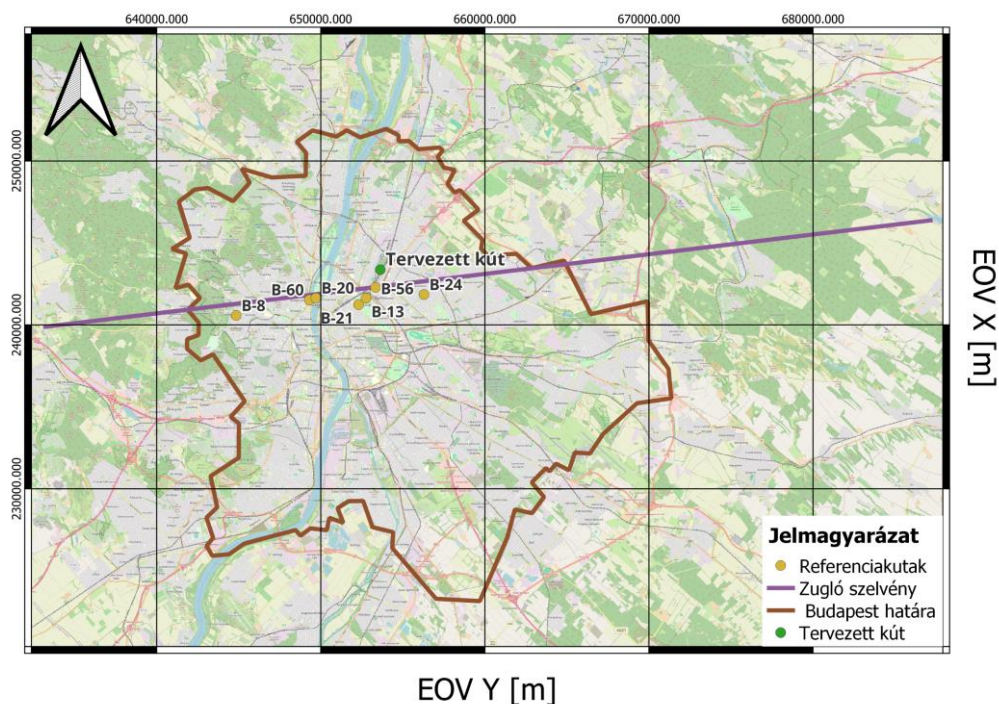
A felső határt pedig a felszín alatti víztükör definiálja: $H=h(x,0)$.

A hőtani határfeltételeket a 2. táblázatban látható T_s és q_{hb} definiálják. A T_s megadja a felszíni hőmérsékletet, a q_{hb} pedig a hőfluxust a modelltér alsó határán. A két oldalsó határ pedig hőszigetelőként viselkedik, azaz itt:

$$q_{hx}|_{x=0,L} = 0 \quad (16)$$



10. ábra: A modell geometriai felépítése, a rétegek permeabilitása (logaritmikus skálán), a vízáramlásra és a hőtranszport-folyamatokra vonatkozó határfeltételekkel (függőleges túlmagasítás 1,5-szörös)



11. ábra: A 2D szelvény nyomvonala, a kalibrációhoz használt kutak a tervezett kút helyzetével

A 11. ábra mutatja be a szelvény nyomvonalát. Emellett jelöli azokat a kutakat, melyek hőmérsékletadatait használtam fel a kalibrációhoz. Ezekről ad áttekintést a 3. táblázat. A talphőmérsékletek értékei segítségével ellenőriztem, hogy a rétegek 1. táblázatban megjelölt permeabilitását (vízvezető-képességét) változtatva, hogyan változik a szimuláció eredménye, közelebb került-e a valósághoz vagy sem. Ezt számszerűen a legkisebb négyzetes eltérés segítségével határoztam meg a következő módon:

$$\text{RMS} = \frac{\sum (T_{\text{modell},i}^2 - T_{\text{mért},j}^2)}{\sum T_{\text{mért},j}^2}, \quad (17)$$

ahol $T_{\text{modell},i}$ az i -edik szimulációval kapott hőmérsékletérték adott pontban és $T_{\text{mért},j}$ j -edik referenciapontban mért hőmérséklet.

Fúrás megnevezése	Fúrás jele	Hőmérsékletmérés mélysége [mBf]	Mért hőmérséklet jele
XII. kerület Alkony út	B-8	-74	T1
Lukács fürdő V.	B-60	-52	T2
Margitsziget-II.	B-20	-207	T3
Városliget-I.	B-21	-864	T4
Városliget-II.	B-13	-1149	T5
BVSC Sporttelep	B-56	-1125	T6
Paskál fürdő	B-24	-1625	T8

3. táblázat: A hőmérsékleti kalibrációhoz felhasznált kutak néhány releváns adata

4. Eredmények

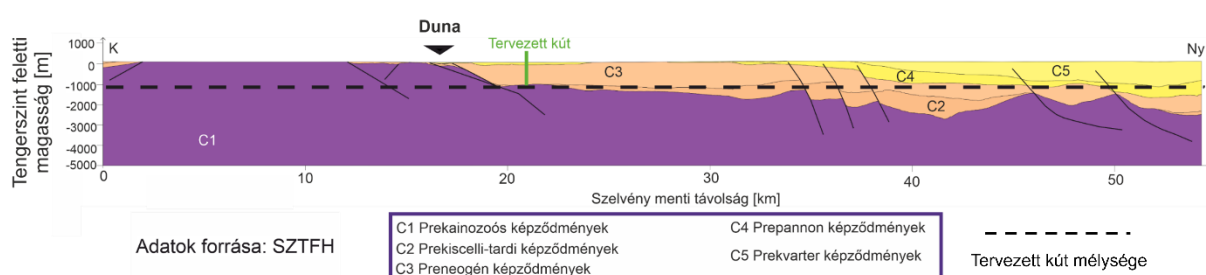
Az elemzés elvégzése során a magyar útmutatás szerint jártam el, így az eredmények bemutatása e módszertan alapján történik.

4.1. A víztartó réteg elérésének valószínűsége

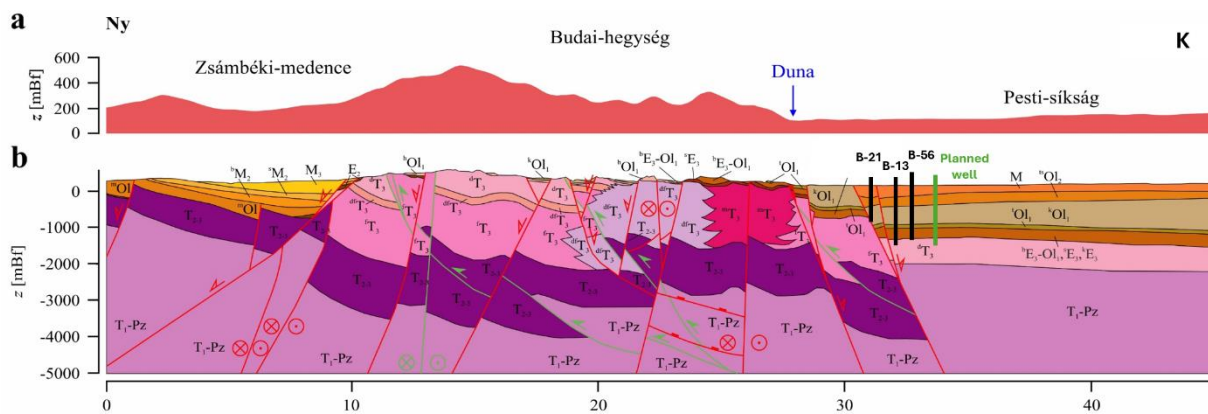
Mivel a víztartó réteg meglétének valószínűsége nehezen számszerűsíthető, a kvalitatív értékelést alkalmaztam. Geofizikai (pl.: szeizmikus, mélyfúrási geofizika) mérések hiányában, a már megszerkesztett földtani szelvények és a hévízkutak rétegsorai állnak rendelkezésre. Az SZTFH által rendelkezésemre bocsátott adatok alapján szerkesztett „Zugló” szelvény (12. ábra) formációs szinten nem mutatja be részletesen a földtani rétegződést, így korábbi szelvényeket is bevontam az elemzésbe (13. ábra).

Ezek alapján megállapítható, hogy a víztartó réteg ez esetben várhatóan a Dachsteini Mészkő Formáció, mivel a két legközelebbi fúrás, a B-13 (Városliget-II.) és a B-56 (BVSC Sporttelep) a Dachsteini Mészkövet fúrta meg (13. ábra). A tervezett kút ezektől keleti irányba esik, amely irányban a Dachsteini Mészkő továbbra is megtalálható. Mivel a tervezett kút nagyon közel helyezkedik el a meglévő kutakhoz, így relatíve kevés, de jó minőségű, megbízható adat alapján feltételezhető, hogy a tervezett fúrás eléri a Dachsteini Mészkő Formációt a kívánt mélységben. A rétegsorok alapján a formációtető 1172 m (B-56) és 1246 m (B-13) mélységben található. Mivel a szelvények alapján kelet felé haladva nagyobb mélységbe kerülhet a formációtető, a megcélzott mélység így 1250 m.

A kvalitatív megfontolásokat figyelembe véve tehát a víztartó elérésének valószínűsége magas, a kockázat alacsony, így a **POS_{AP}=95%**.



12.ábra: Az SZTFH adatai alapján szerkesztett „Zugló” elnevezésű rétegtani szelvény



13.ábra: A Budai Termálkarszt egy kelet-nyugat irányú keresztmetszvényének részlete a 2. ábrán megjelenített kutakkal (Fodor, 2013)

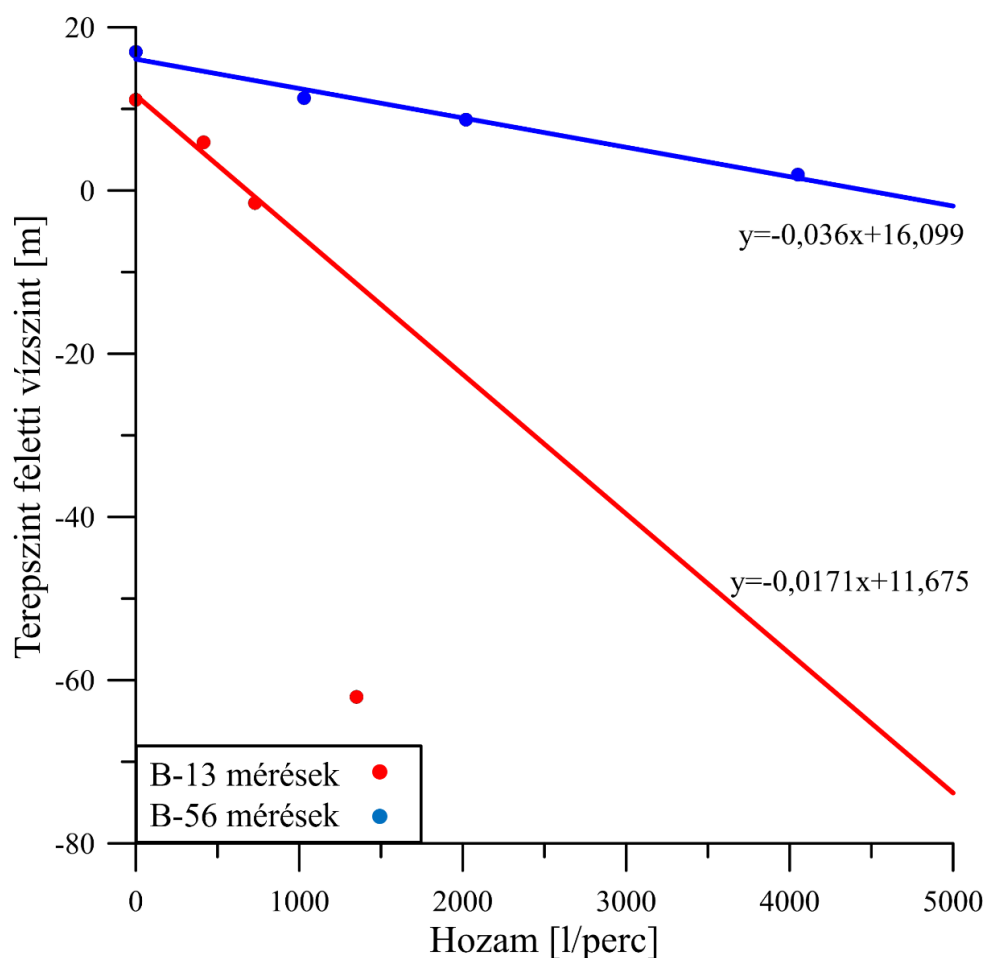
4.2. A víztartó minősége, és az elvárt hozam elérésének valószínűsége

A feltételes valószínűségi rendszer keretein belül maradván tehát az a feltevés, hogy a Dachsteini Mészko Formációból szeretnénk kitermelni a vizet, emiatt azokat a kutakat vontam be a további elemzésbe, melyek szintén ebből a rétegből végzik a vízkitermelést, illetve a tervezett kúthoz közel helyezkednek el. Ezeknek a kritériumoknak mindössze két kút felelt meg: a BVSC Sporttelep B-56, illetve a Városliget-II B-13 kútja. Látható, hogy két kút adatait felhasználva nem lehet matematikailag megalapozott statisztikai becslést végezni. Mindezen nehézségek miatt ez esetben is egy kvalitatívabb megközelítésre volt szükség annak érdekében, hogy valamilyen módon mégis becslést tudjak adni a hozam várható eloszlására.

A 4. táblázat foglalja össze a vizsgálatba bevont kutak esetén a kapacitásvizsgálat hozambecslés szempontjából releváns eredményeit a vízföldtani naplók adatai alapján:

B-13		B-56	
Terepszint feletti vízszint [m]	Hozam [l/perc]	Terepszint feletti vízszint [m]	Hozam [l/perc]
11,32	1030	5,9	415
8,67	2020	-1,53	730
1,94	4050	-62,04	1350

4. táblázat: A hozambecsléshez felhasznált kutak hozam-vízszint adatai. A félkövér dőlt betűs értékeket a hozambecslés számítási folyamatába is bevontam.



14.ábra: A hozam-vízszint összefüggések grafikus ábrázolása

A B-13 kút mérési adatai megközelítőleg egy lineáris egyenes mentén helyezkednek el a hozam-vízszint összefüggést vizsgálva (14. ábra). Azonban a B-56 kút esetében az egyenes arányosság 730 l/perc hozamig fennáll, majd az ennél nagyobb (pl.: 1350 l/perc) hozam esetén már nagy mértékű vízszintcsökkenés tapasztalható.

Továbbá rendelkezésre állt a Városliget-II B-13 kút hévíztermelése az 1993-mas és 2002-es évekre vonatkozóan, melyet az 5. táblázat foglal össze a l/perc egységre átszámított átlagos víztermeléssel együtt.

Év	Hévíztermelés [m ³ /év]	Hévíztermelés [l/perc]
1993	1 924 000	3661
2002	1 335 000	2540

5. táblázat: Hévíztermelési adatok a Városliget-II B-13 kútra vonatkozóan. A félkövér dőlt betűs értékek arra utalnak, hogy ezek az értékek a konkrét számítási folyamatba is bevonásra kerültek.

A hozamot jelen esetben egy normális eloszlású valószínűségi változóként definiáltam. Ennek vonatkozásairól is részletesebben fogok írni a diszkusszióban. Ehhez tehát két paraméter megadására volt szükség: a várható értékre (E) és a szórásra (σ), melyet a 6. táblázat foglal össze. A 15. ábra pedig grafikusan jeleníti meg az eloszlást.

Paraméter	Érték
Várható érték (E)	2160 l/perc=36 l/s
Szórás (σ)	600 l/perc=10 l/s

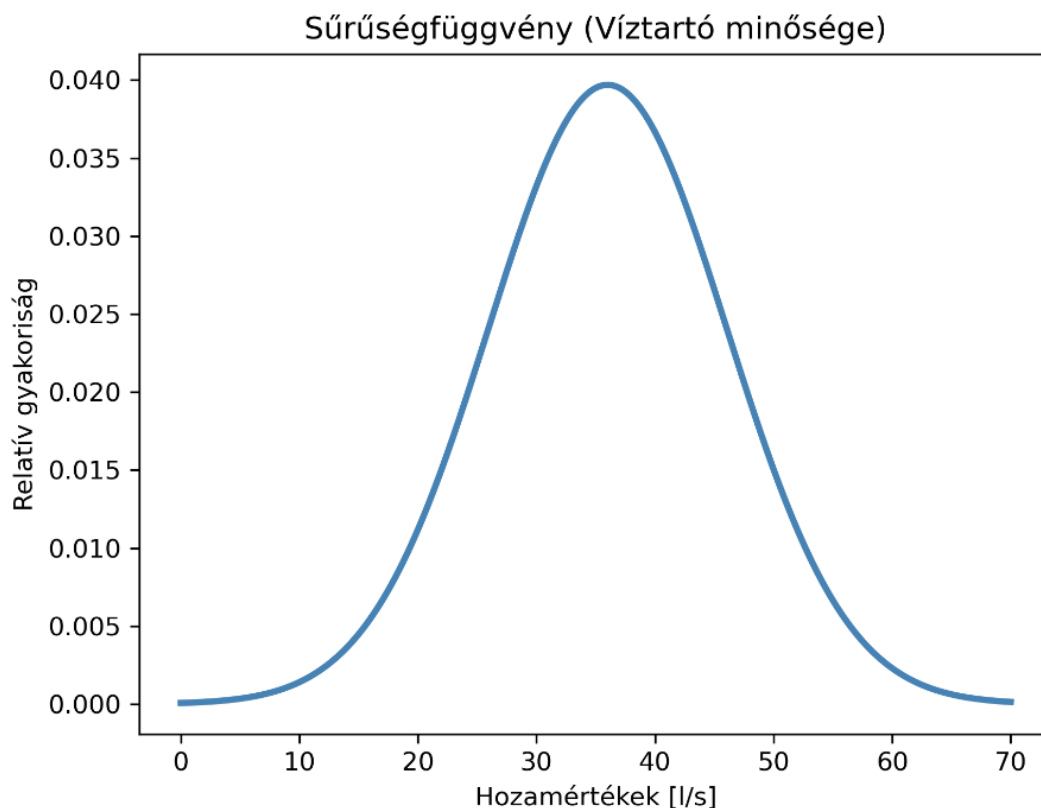
6. táblázat: A hozameloszlás becsült paraméterei normális eloszlás esetén

A várható értéket a 4. és 5. táblázatokban vastagon szedett értékek alapján becsültem meg. A 7. táblázat foglalja össze ennek részleteit. A kiemelt értékekből számtani átlagolással számoltam várható értéket a táblázatban megadott súlyokkal.

Hozam [l/perc]	Adat forrása	Súly	Súlyozás indoklása (amennyiben a súly $\neq$ 1)
3661	B-13 1993 évi termeléséből	1	
2540	B-13 2002 évi termeléséből	2	1993 utáni adat
4050	B-13 maximális termelési adata	1	
730	B-56 maximális termelési adata, mely még illeszkedik a hozam-vízszint változását leíró lineáris görbére	3	Ez van legközelebb a tervezett kúthoz, és egyben friss adat

7. táblázat: A hozam várható értékének becsléséhez felhasznált adatok, és azok súlya a számításban

Mivel a táblázatban megjelenített értékek alapján számított szórás túl nagy értéket adott (22 l/s), a hozameloszlás szórását matematikai megfontolásokat figyelembe véve becsültem meg. Az egyszerűség kedvéért jelen esetben feltételeztem a hozam adatok normális eloszlását, így azt a megkötést kellett tennem, hogy az értékek csak alacsony valószínűséggel csökkenjenek a 0 l/s szint alá. Ennek megfelelően a szórást úgy határoztam meg, hogy az adatok kevesebb mint 0,02%-a essen abba a tartományba, ahol az értékek 0-nál kisebb értéket vesznek fel. Így az adatok 99,98%-a várhatóan nagyobb hozamot jelent mint 0.



15. ábra: A hozameloszlás sűrűségfüggvénye a tervezett kútra

Ezt követően már csak az maradt hátra, hogy a POS_{AQ} -t megbecsüljem. Ez azt jelenti, hogy arra kell egy becslést adni, hogy mekkora a valószínűsége annak, hogy a kút nem lesz beáramláshiányos. A 9. ábra kvalitatív logikáját alkalmaztam ez esetben is. Ugyan kevés az adat, azok a tervezett kúthoz közeli, megbízható adatok, illetve főként támogatóak, így $POS_{AQ}=90\%$ minősítést adtam meg.

4.3. A megfelelő vízminőség elérésének valószínűsége

A vízminőség meghatározásánál azon közeli kutak adatait vettem figyelembe (ahol azok rendelkezésre álltak), melyek a pesti, azaz fedett oldalon helyezkednek el, hiszen várhatóan a budai fedetlen oldalon a csapadékvíz beszivárgása miatt a felszínalatti víz oldottanyag-tartalma alacsonyabb. A 8. táblázat foglalja össze a vizsgálatba bevont kutak TDS (Total Dissolved Solids = Teljes oldottanyag-tartalom) adatait.

Kút	TDS [mg/l]
Városliget I B-21	1328
Városliget II B-13	1341
Paskál fürdő B-24	1073
Margitsziget IV B-19	1231
Margitsziget III B-18	872
Aquaworld I B-121	918
Erzsébet tér B-21	1253.3
Közpark utca B-39	1554

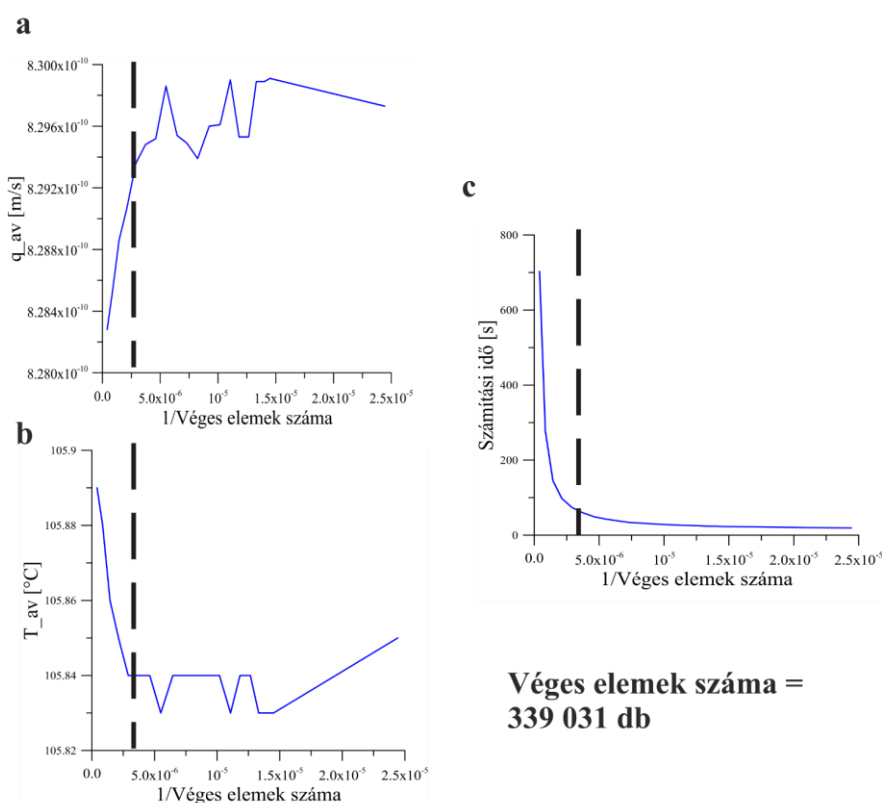
8. táblázat: Az egyes vizsgált kutak vízmintáinak mért TDS adatai

Az átlagos TDS ezen kutakban 1196 mg/l volt. A legalacsonyabb érték 872 mg/l, a legmagasabb pedig 1554 mg/l. Ez alapján elmondható, hogy a tervezett kút környezetében a felszínalatti víz sótartalma a kisebb sótartalmú brakkvíz kategóriájába sorolható. Ehhez a következő besorolást alkalmaztam: édesvíz TDS<1000 mg/l; brakkvíz TDS=1000–10'000 mg/l; sós víz TDS>10'000 mg/l (Deming 2002). Ez azt jelenti, hogy a teljes oldottanyag-tartalom relatíve alacsonynak tekinthető. A szénhidrogének jelenlétét pedig elhanyagoltam a projektterületen, abból kiindulva, hogy a vizsgált kutak esetében sem volt olyan szintű szénhidrogén-jelenlét, mely akadályozta volna a (tartós) vízkitermelést. Ezekre alapozva, a vízminőség nagy valószínűséggel el fogja érni az elvárt szintet, így a **POSFQ=95%**-on határoztam meg. Ennek oka, hogy ez esetben is a relatíve kevés adat viszonylag nagy megbízhatósági szintet ad, mert az adatok szórása kicsi (214,6 mg/l), és a mérési adatok térben közel helyezkednek el a kérdéses ponthoz.

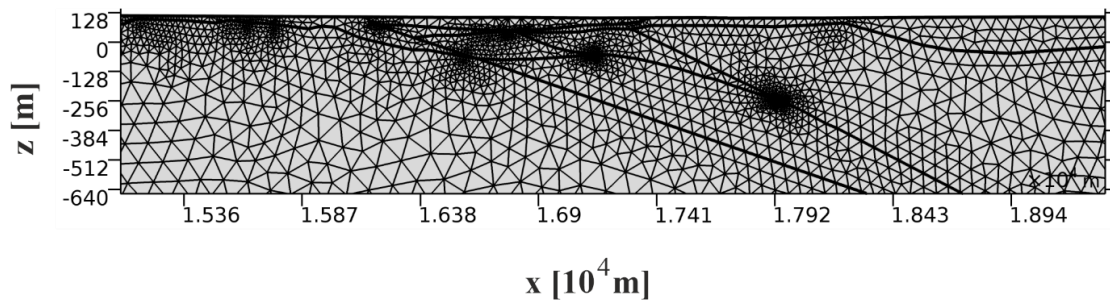
4.4. A hőmérsékleteloszlás becslése és a megfelelő hőmérséklet elérésének valószínűsége a választott mélységben

Ahogy a 3.1.3 fejezetben már szó volt róla, hogy a módszer részeként meg kell becsülni a hőmérsékleteloszlást a választott mélységben ($z=-1139$ m). Ennek érdekében egy kétdimenziós numerikus hidrogeológiai modellt állítottam fel. A hőmérsékletmodellezés során először egy véges elemszám-tesztet végeztem, mellyel a numerikus eredmények minőségének függvényében rögzítettem a rácsháló generálása során létrehozott véges elem-számot. A folyamat fő célja, hogy a lehető legrövidebb számítási idő mellett kellően pontos eredményt kapjunk a feltett kérdés megválaszolásához. A tesztelés során az egyes esetekben megadtam a maximális elemméretet a geometria belsejében, melyet a határokon minden esetben a felére csökkentettem. Így a legrosszabb felbontással rendelkező modell esetében a maximális elemméret 1000 m volt, és ennek megfelelően a határok mentén ez az érték 500 méterre

csökkent. A legjobb felbontású modell esetében pedig a maximális méret 20 m volt a geometria belsejében, illetve 10 m a határok mentén. A tesztelés eredményeit a 16. ábra mutatja be. A különböző végelelemszámok mellett megvizsgáltam a teljes modelltartományra jellemző átlagos hőmérséklet és Darcy-fluxus alakulását. Látható, hogy nagymértékű végelelemszám-változtatás hatására sem változik nagy mértékben a két érték, így nem okoz nagy hibát, ha némileg rosszabb felbontással dolgozunk. Ez számszerűen azt jelenti, hogy a teljes modellterre jellemző átlagos Darcy-fluxus 10^{-12} nagyságrendű változást mutat. Ez két nagyságrenddel kisebb az átlagos Darcy-fluxus értékeinél, melyek a 10^{-10} nagyságrendű tartományban mozognak. Az átlagos hőmérsékletre vonatkozóan ez a változás mindössze $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$. Azonban, a számítási idő jelentősen lecsökken rosszabb felbontás esetén, így a munkafolyamat időtartama csökkenthető. Ennek megfelelően olyan felbontással számoltam, mely esetében a maximális elemméret 50 m volt a modell belsejében. Az így legenerált véges elemek száma 339 031 db volt, s ez esetben még nem emelkedett meg jelentősen a számítási idő. A 17. ábra vizualizálja ezt a választott felbontást a Duna környezetében. Látható, hogy a csomópontokban részletesebb a rácsháló.



16. ábra: A végelelemszám reciprokának függvényében számított (a) átlagos Darcy-fluxus, (b) hőmérséklet és (c) számítási idő



17. ábra: A választott felbontás bemutatása a szelvény egy kivágott részén

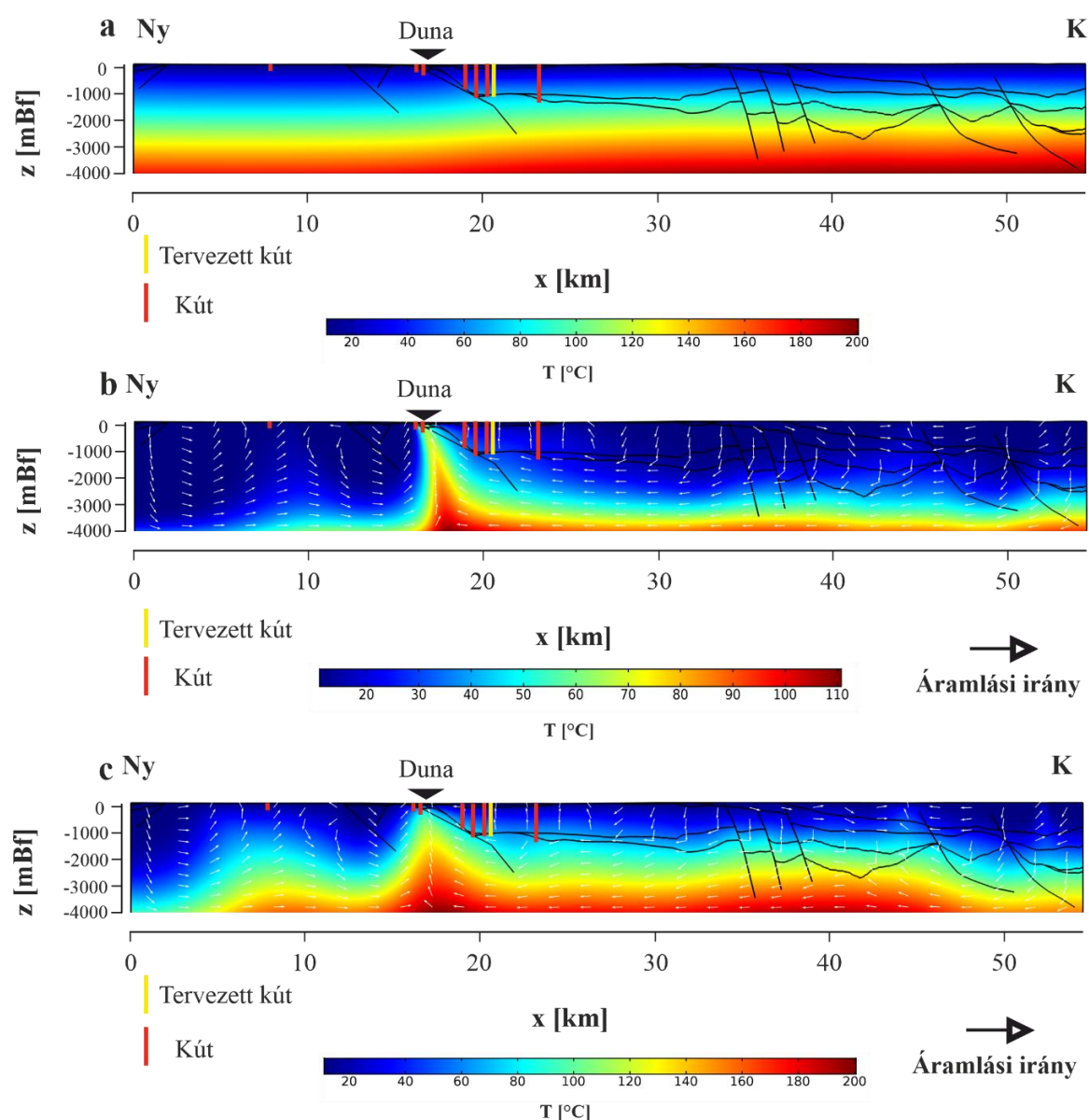
A következő lépésben a paramétertesztelés eredményeit fogom összefoglalni. Összesen 41 esetet vizsgáltam meg, amiből 40 esetben az egyes közegek vízvezetőképességét/permeabilitását változtattam meg, mellyel kalibráltam a modellt, míg a fennmaradó 1 esetben a konduktív modellt alkalmaztam. A 40 esetből 24 esetben négy réteg paramétereit változtattam úgy, hogy egyszerre csak egy réteg permeabilitás értékét teszteltem, hogy lássam, az milyen irányú és mértékű változást okoz a hőmérséklet értékeiben. A négy réteg a Prekainozoós, Prekiscelli-Tardi, Preneogén és Prepannon volt. A Prekvarter réteg változtatásával nem foglalkoztam annak kis térfogati részaránya miatt. A további 16 teszt során kapott eredményeket az 2. melléklet mutatja be. A 9. táblázat pedig áttekintést nyújt a mért hőmérsékleti adatokról, az eredetileg felállított és a konduktív modell eredményeiről, illetve a 16 paraméterteszt során született legjobbnak és legrosszabbnak minősített modell hőmérsékleti adatairól. A minősítést az átlagos négyzetes eltérés (RMS) alapján végeztem el ((17) egyenlet). Számítottam továbbá egy súlyozott átlagos négyzetes eltérést is (WRMS), melyben nagyobb súlyt adtam a tervezett kúthoz (T7) közeli kutak hőmérsékleti adatainak (pl.: T4, T5, T6, T8 – 11. ábra és 3. táblázat). A kétféle minősítés alapján ugyanazok a modellek kerültek a legjobb három modell közé, és ugyanaz is maradt a legrosszabb (9. táblázat).

Változat	a	b	c	d	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	RMS	WRMS
Mért adatok	-	-	-	-	12,1	51,0	71,0	76,2	77,5	78,5	-	75,5	-	-
Eredeti	1	1	1	1	11,0	39,9	62,1	34,7	33,4	31,2	30,5	28,9	0,0163	0,0162
Legrosszabb	0,01	10	1	1	13,0	21,7	36,2	89,6	101,9	97,5	95,1	82,4	0,0064	0,0044
Legjobb	0,05	10	0,2	1	12,1	45,9	78,9	78,1	82,6	75,5	72,2	81,8	0,0003	0,0002
Konduktív	-	-	-	-	13,4	19,1	26,6	62,7	76,9	76,9	77,8	101,0	0,0075	0,0046

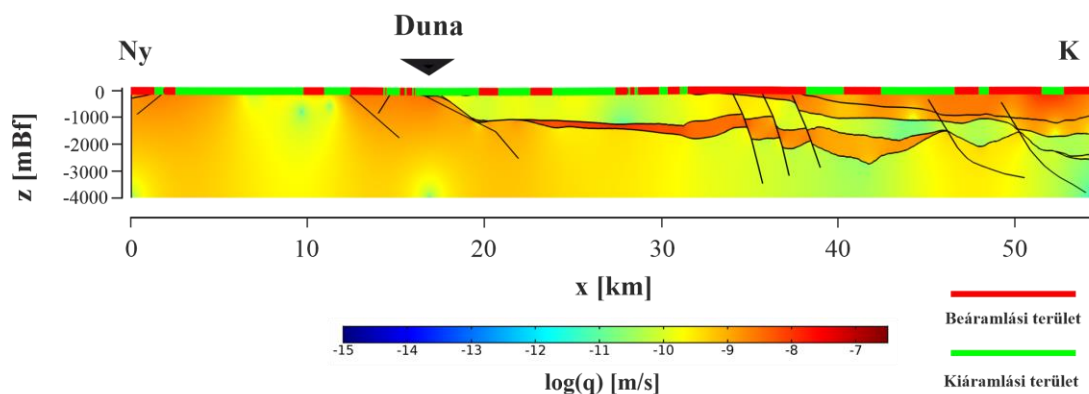
9. táblázat: A paramétertesztelés néhány eredményéről készült összefoglaló táblázat.

a = a Prekainozoós réteg eredetileg megadott permeabilitás értékének szorzószáma, b = a Prekiscelli-Tardi réteg eredetileg megadott permeabilitás értékének szorzószáma, c = a Preneogén réteg eredetileg megadott permeabilitás értékének szorzószáma, d = a Prepannon réteg eredetileg megadott permeabilitás értékének szorzószáma. Az eredeti permeabilitás értékek az 1. táblázatban szerepelnek.

A 18.a ábra a konduktív modellben számított hőmérsékleti szelvényt jeleníti meg, míg a 18.b ábra az eredeti paraméterekkel kapott eredményt mutatja a hőmérsékletszelvényre. A 18.c ábra a legjobbnak minősített szelvény mentén mutatja a számított hőmérsékleteloszlást. Ez esetben tehát az 1. és a 9. táblázatban foglaltak következtében a permeabilitás értékek a következők: A Prekainozoós rétegek esetében $1,665 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$, a Prekiscelli-Tardi rétegek esetében $5,1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, a Preneogén rétegekre vonatkozóan $3,82 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$. A Prepannon és Prekvarter rétegek esetén pedig változatlan maradt: $3,31 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$, illetve $5,1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$. A 19. ábra a Darcy-fluxust mutatja be a beáramlási és kiáramlási területekkel.



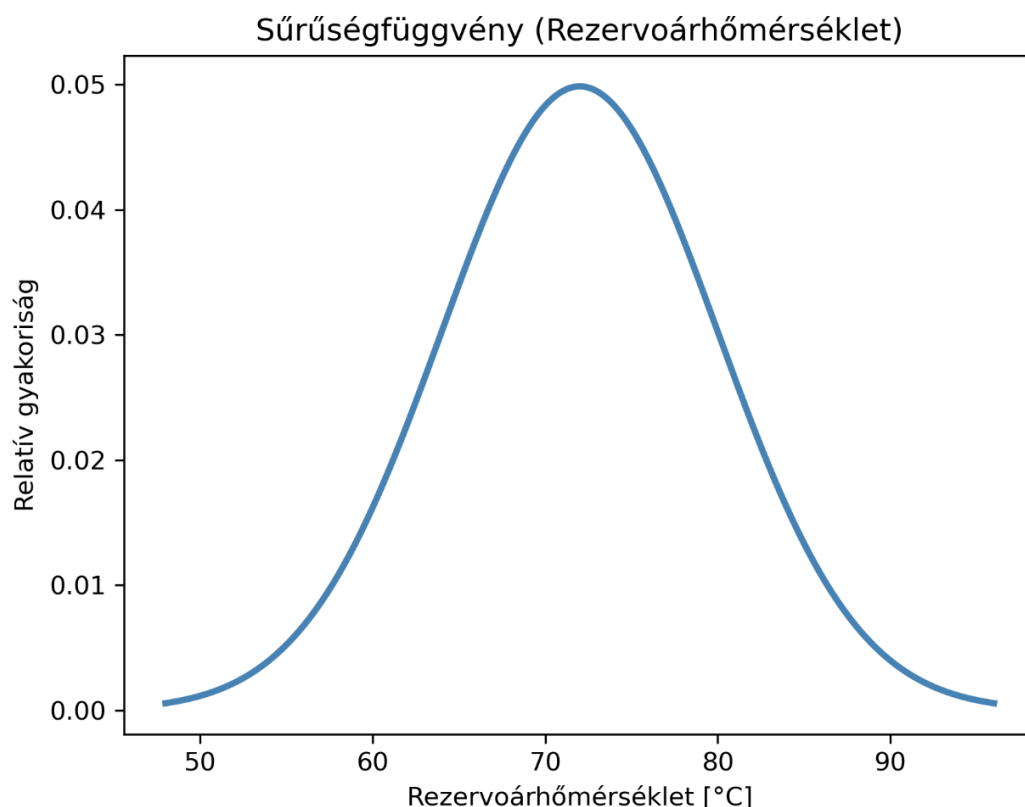
18.ábra: (a) A konduktív modell alapján számított hőmérsékletszelvény, (b) Az eredeti permeabilitásadatokon nyugvó modellezett hőmérsékletszelvény, (c) A legjobbnak minősített modellre vonatkozó hőmérsékleti szelvény



19. ábra: A legjobbnak minősített modellre vonatkozó szelvény a Darcy-fluxusra

A következő lépésben megnéztem, hogy a tervezett kút tervezett mélységében (-1139 mBf) mekkora hőmérséklet várható a legmegbízhatóbb modell alapján ($T_7 = 72,2\text{ °C}$). A szomszédos (T_8) pontban $6,3\text{ °C}$ az eltérés a mért értéktől, tehát ennek a becslt értéknek nagy a bizonytalansága, így önmagában ezt sem lehet magabiztosan használni. Emiatt a többi 16 modell eredményeit is megvizsgáltam. Ezek közül a legkisebb érték a tervezett kút pontjában, mélységében $52,2\text{ °C}$, a legmagasabb érték pedig 104 °C volt, az átlag $71,7\text{ °C}$, a szórás pedig $12,4\text{ °C}$. Mind a legkisebb, mind a legnagyobb érték kiugró, szélsőséges adatnak számít, így ezeket kiszűrtem. A szűrt adatok átlaga 72 °C volt, a szórása pedig 8 °C . Ez alapján a legjobbnak minősített modell által várt $72,2\text{ °C}$ elfogadható, s így a várható értéket 72 °C -ként definiáltam, a szórást pedig a számított 8 °C -ként, melyek reális értéknek tekinthetők. A hőmérsékleti eloszlást is normális eloszlásként definiáltam. Az eredményként kapott hőmérsékleti eloszlást a 20. ábra mutatja.

A hőmérsékleteloszlás bizonytalansággal terhelt több okból is: a kétdimenziós nyugat-keleti irányú modellezés miatt az észak-déli irányú vízáramlások hőhatása nem jelenik meg a modellben, illetve a termikus konvekció hatásával sem számoltam ez esetben. Valószínűsíthető, hogy északnyugati irányból egy hideg áramlat lecsökkenti a felszín alatti víz hőmérsékletét az észak-pesti területeken (Mádlné Szőnyi, 2019) – ennek hatása mérhető az Aquaworld térségében 7,5 km-re a tervezett kúttól (Aquaworld, B-145 kút, melynek talphőmérséklete $27,3\text{ °C}$ 1269,5 m mélységben). Ennek a hatásmechanizmusnak a déli irányú kiterjedését nem ismerjük pontosan, így már a projektterületen is kifejtheti hatását, növelve a beruházás bizonytalanságát – feltehetően kis mértékben. Ezeket a tényezőket figyelembe véve definiáltam a **POS_T=90%**-os értéket.



20. ábra: A rezervoárhőmérséklet becsült sűrűségfüggvénye

4.5. A visszasajtolás megvalósíthatósága

A termálvíz visszasajtolásakor azt kell figyelembe venni, hogy a legjobb megoldás, ha ugyanabba a víztartóba, ugyanabba a repedésrendszerbe juttatjuk vissza a fluidumot, melyből azt kinyertük. Ennek értelmében az lenne a cél, hogy megtaláljuk azt a repedéshálózatot, melyet a termelőút is megcélzott. Ennek nagy a valószínűsége, amennyiben a visszasajtoló kutat kis távolságra fúrják. Azonban számolni kell a termális betörés lehetőségével is, tehát azzal, hogy a hidegebb visszasajtoló víz lecsökkenti a felszín alatti térrész eredeti hőmérsékletét. Az, hogy ez pontosan mikor következik be, függ a visszasajtoló víz hőmérsékletétől. Jelen esetben azt feltételeztem, hogy a hőhasznosítást követően 40 °C-os víz marad vissza. Mivel a repedésrendszer hálózataról nagyon hiányosak az ismereteink, illetve numerikus modellezést nem végeztem a termális betörés időpontjának bekövetkezésére vonatkozóan, újfent szükség van a kvalitatív eszközök elemzésbe való bevonására (9. ábra). A POS=50% jelentené azt az állapotot, mely esetében gyakorlatilag nincsen adatunk, így a visszasajtolás 50% valószínűséggel lesz sikeres, és 50% valószínűséggel nem lesz az. Azonban ebben az esetben a kevés adat, mely rendelkezésünkre áll, inkább támogató jellegű, így a **POS_{R1}=60%**.

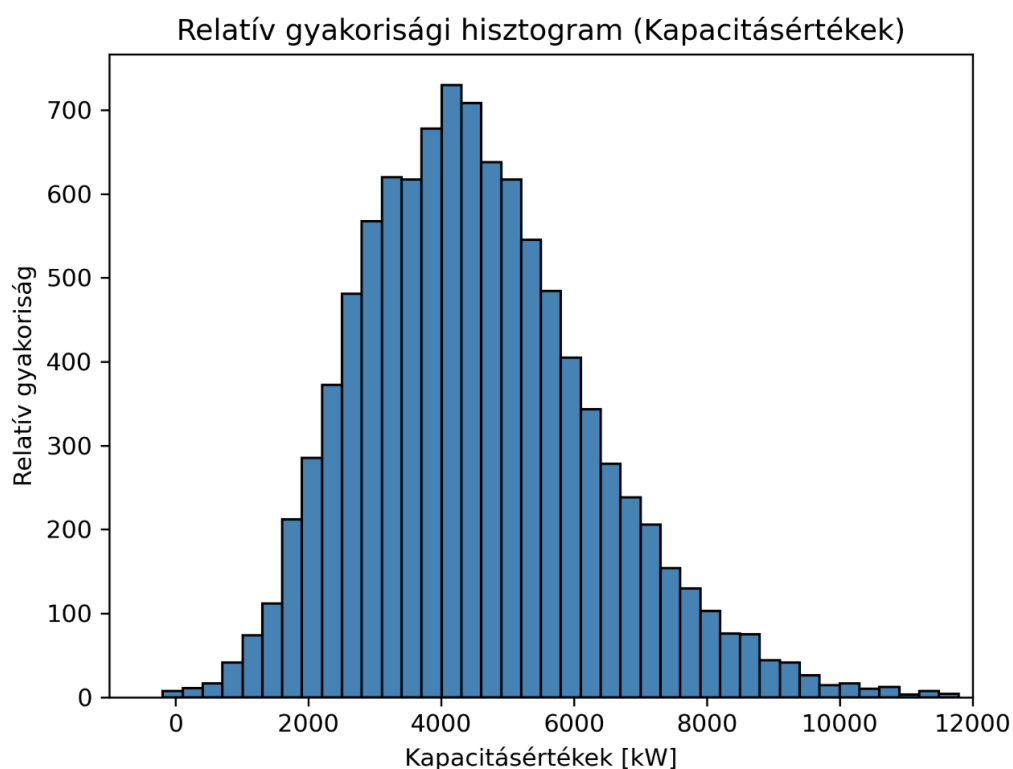
4.6. A Monte Carlo-szimuláció eredménye

A szimuláció végrehajtása előtt még meg kell határozni a kifolyóvíz-hőmérséklet eloszlását, hiszen a víz kútfejhez való érkezése során néhány °C-os hűlést szenved, így ennyivel alacsonyabb hőmérsékletű víz hasznosítható. A becsléshez a Liebe-formulát (Gálfi és Liebe, 1977) használtam:

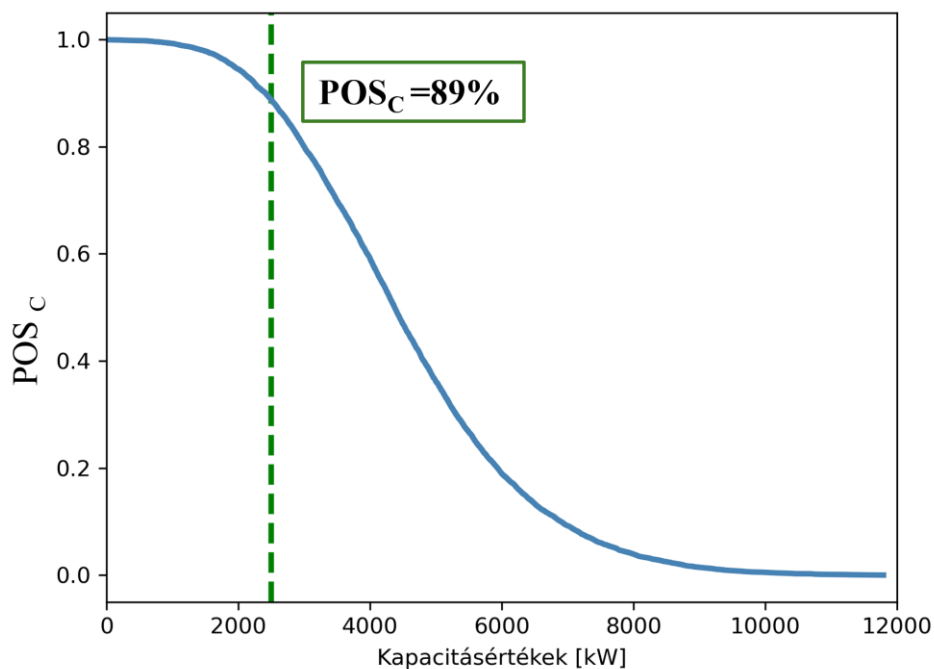
$$T_{kifolyó} = T_z - 5 \cdot z_f \cdot I^{-0,71} \quad (18)$$

ahol $T_{kifolyó}$ a kútfejen kifolyó víz hőmérséklete [°C], T_z a rezervoárhőmérséklet [°C], z_f a fakadási szint mélysége [km], I pedig a hozam [m³/perc].

Az egyenletbe az eloszlások várható értékeit helyettesítettem be, és így 70 °C-os hőmérsékletet kaptam eredményül. Az egyszerűség kedvéért jelen esetben feltételeztem a szimuláció során, hogy így a kifolyóvíz-hőmérséklet eloszlásának várható értéke 70 °C, szórása pedig 8 °C, azaz utóbbi nem változott. A 21. ábra mutatja a szimuláció eredményeként kapott relatív gyakorisági hisztogramot, a 22. ábra pedig a kapacitásértékek eloszlásfüggvényét. Erről pedig leolvasható, hogy 2,5 MW elvárt kapacitás 89% valószínűséggel érhető el.



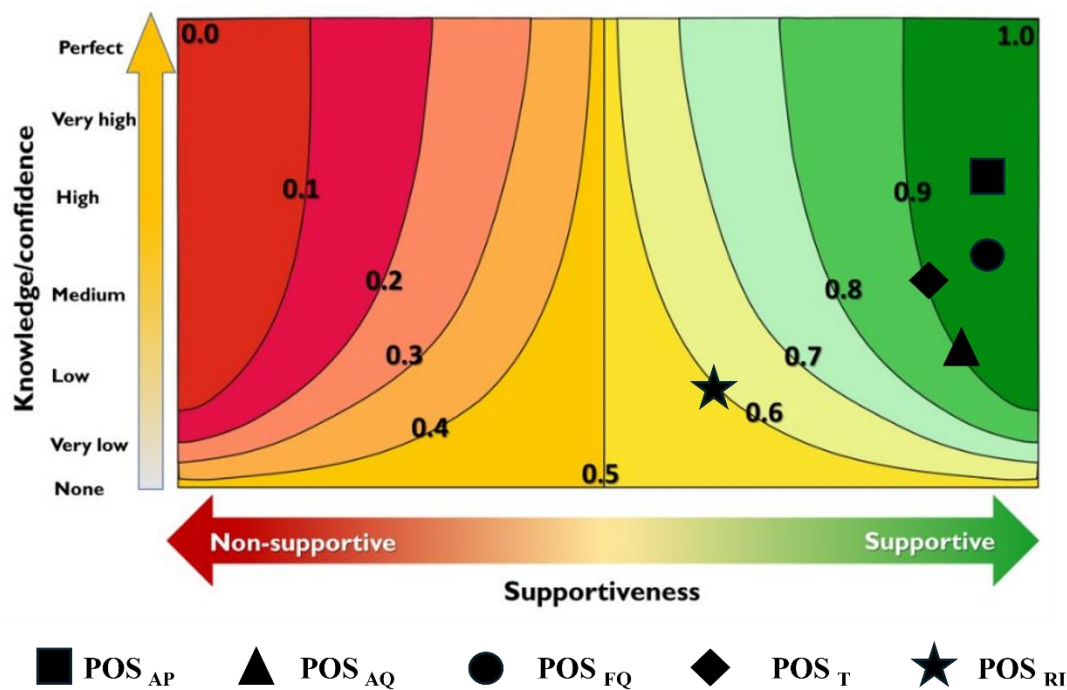
21. ábra: A kapacitásértékek relatív gyakorisági hisztogramja a Monte Carlo-szimuláció eredményeként



22. ábra: A kapacitásértékek eloszlásfüggvénye a Monte Carlo-szimuláció eredményeként

4.7. A POS_p meghatározása

A geológia- és a projektvalószínűség kiszámításához szükséges adatokat meghatároztam. Ezeket az eredményeket a 23. ábrán foglaltam össze (9. ábra alapján).



23. ábra: A geológiai valószínűség kiszámításához szükséges POS paraméterek összefoglaló ábrája

Ezekre a becsült adatokra alapozva, illetve a kapacitás eloszlásfüggvényéről leolvasott POS_C ($C=2,5$ MW) = 89% alapján, a (2) és (4) képletek logikáját követve elvégeztem a következő számításokat (a hőmérsékleti faktort elhagyva):

$$POS_G = 95\% \cdot 90\% \cdot 95\% \cdot 90\% \cdot 60\% = 44\% \quad (19)$$

$$\mathbf{POS_P = 44\% \cdot 89\% = 39\%} \quad (20)$$

Az eredmények tükrében elmondható, hogy a becslésünk alapján a projekt sikeres megvalósulásának valószínűsége 39%. A számítást követve belátható, hogy a visszasajtolás sikeres megvalósulása az, ami a legtöbb bizonytalanságot hordozza. Ennek megfelelően, az erre vonatkozó további információgyűjtésnek lenne a legnagyobb hozzáadott értéke a döntéshozatalban.

5. Diszkusszió

Mivel a kockázatértékelés végrehajtása során számos bizonytalanság és nehézség merült fel, melyek megakadályozták a megbízható kvantitatív elemzés végrehajtását, ezeket a nehezítő tényezőket a diszkusszióban szeretném összefoglalni. Először a hozambecslés során felmerült nehézségeket mutatom be. Ezt követően a hőmérsékleteloszlás becslésének korlátairól fogok pár szót szólni, majd a vízvisszasajtolást érintő további kutatási lehetőségekre térek ki. Végül pedig röviden összefoglalom a német és magyar útmutató módszertanának összehasonlítását.

5.1. Hozambecslés

Ahogy az *Eredmények* fejezetben kifejtésre került, ha a Dachsteini Mészkö Formációból szeretnénk kitermelni a vizet, akkor azokat a kutakat érdemes bevonni a további elemzésbe, melyek szintén ebből a rétegből végzik a vízkitermelést (11. ábra; B-13 és B-56). Ennek értelmében, a még szintén közelinek tekinthető Paskál fürdő kútja (B-24) nem került bevonásra az elemzésbe, hiszen az még az eocén víztartóból termel. A Városliget-I (B-21) kutat ugyanezen okból kifolyólag hagytam ki az elemzésből, mert az nagy valószínűséggel a Fődolomit Formációból nyeri a vizet, illetve a hozamértékek megtekintésénél is látni lehetett, hogy azok karakterisztikája nagyban eltér a két másik kút értékeitől.

Azonban a Dachsteini Mészkö Formáció kiterjedési területe a Dunántúli-középhegység (Császár, 1997). Így akár nagyobb területen is érdemes lehet részletesebb kutatást végezni, leválogatva az ezt a formációt harántoló hévízkutakat. Habár érdemes megjegyezni, hogy ez egy olyan karsztosodásra hajlamos karbonátos formáció, amely igen nagy heterogenitással jellemezhető mind permeabilitásában, mind vízvezető-képességében. Az említett jelleg elsősorban a másodlagos porozitástól függ, azaz a karsztosodott üregek számától, kiterjedésétől. Ennek eloszlását már korábbi munkákban is vizsgálták (Pável, 2014). A jelenlegi nyílt karszton mélyült kutakban kevésbé tapasztalhatók üregesedésre utaló jegyek, mint a fedett karszt esetében. Tehát, az egy formáción belüli magas fokú változatosság és bizonytalanság így felveti a kérdést, hogy érdemes-e több kutat bevonni az elemzésbe. Ezt a bizonytalanságot emellett tovább fokozza az a tény, hogy a vízföldtani naplókban is sokszor hiányzik a pontos információ a formációra vonatkozóan. Ezen bizonytalanságokat figyelembe véve döntöttem tehát úgy, hogy a tervezett kúthoz két legközelebbi kutat (B-13 és B-56) vonom be a hozambecslési eljárásba.

A következő felmerülő probléma az volt, hogy miként értékelem a kiválasztott kutak adatait. A rendelkezésre álló információk is változatosak, mert a régebbi és az újabb naplók esetében más és más információk érhetőek el. A régebbi kutak esetében sokszor hiányosak az

adatok (pl. Városliget I és II), míg az újabb kutak esetében sok információ megjelenítésre kerül, mely hasznos lehet a hozambecslésben. Ezek a következők: a kapacitásvizsgálatok eredményei, az ezek alapján számított permeabilitás és transzmisszivitás adatok. Egyéb adatokból pedig közvetetten meghatározható a rendelkezésre álló vízoszlop/leszívás. Ezekre alapozva pedig számítható egy megbízható, fenntartható kúthozam, melynek alapja a Cooper-Jacob-féle egyenesvonal-módszer (Gomo, 2020). Ezzel azonban az alapvető probléma, hogy zárt, homogén, izotróp víztartóra igazak a modellfeltételek (Dana & Jwan, 2016). Ismerve a terület földtani sajátosságait, a Budai Termálkarszt heterogén és anizotróp rendszerére ezt a módszert nem lehet megbízhatóan használni. Vannak azonban ennél összetettebb földtani-hidrogeológiai szituációkra fejlesztett módszerek is – például neurális háló alkalmazásával (Yin et al, 2011). Ezek részletes tárgyalása nem képezi tárgyát dolgozatomnak.

További probléma, hogy a fogalomhasználat egyes esetekben eltér a tudományos és az ipari szférában. Erre jó példa a fajlagos hozam esete. „A fajlagos hozam az a víztérfogat, amely a nyílt tükrű telített víztartó egységnyi felülete alól felszabadul a tározásból a vízszint egységnyi csökkenése hatására” (Mádl-Szőnyi et al, 2013, 59. old). Ennek mértékegysége ennek megfelelően a %, vagyis dimenziótlan. Ezzel ellentétben, a vízföldtani naplókban található fajlagos hozam mértékegysége l/perc/m. Az utóbbit egy adott vízhozamra számítják ki, s vizsgálják mekkora üzemi vízszintet, azaz mekkora vízszintcsökkenést okoz a nyugalmi vízszinthez képest. A leírtak alapján belátható, hogy a hozamelőrejelzés számos nehézségbe ütközik – különösen a karbonátos víztartó rétegek esetében. Így releváns kérdés, hogy milyen mértékben javítható az előrejelzés pontossága több adat bevonása és elemzése esetén.

További vizsgálatra váró problémakör, hogy a hozam adatok eloszlásakor megalapozottabb lognormális eloszlást feltételezni, hiszen a hozam a permeabilitás függvényeként változik, mely megközelítőleg lognormális eloszlást követ (Elmorsy et al, 2023). A módszer ennek megfelelő módosítása és ennek tesztelése szintén egy újabb kutatás tárgyát képezheti. A lognormális eloszlás alkalmazásával amiatt is megbízhatóbbá válik a hozambecslés, hogy így a szórás definiálása nem ütközik az *Eredmények* fejezetben ismertetett módon akadályokba.

5.2. Hőmérsékletbecslés

A kutatásomban a hőmérsékletet nagyobb megbízhatósággal tudtam megbecsülni, mint a hozamot, azonban természetesen itt is számos további bizonytalansági faktor befolyásolhatja egy adott pontbeli valós hőmérséklet meghatározását. Például, a pontosabb modelleredményekhez részletesebb földtani szelvényre lenne szükség. Emellett, mint arról az

Elméleti háttérben is írtam, a Budai Termálkarszt területén nagy valószínűséggel jelentős hatása lehet a termikus konvekciónak (Szijártó et al, 2021), melynek hatását egyelőre nem vizsgáltam. Továbbá, a kétdimenziós modellezés korlátait is mindenképp szem előtt kell tartani. Ennek értelmében alapvetően a nyugat-kelet irányú áramlások hatása modellezhető a modellem segítségével. Azonban korábbi kutatások alapján elmondható, hogy a felszínalatti vízáramlási rendszert észak-dél irányú áramlások is jellemzik. Erre egy példa a dorogi utánpótlódási terület felől az északi forráscsoporthoz érkező langyos/hideg víz (Mádlné Szőnyi, 2019). Ennek az északnyugat felől érkező áramlásnak a hatása így nem modellezhető a tanulmányban bemutatott “Zugló” szelvényen.

Ami pedig a hőmérsékleteloszlás meghatározását illeti, számos egyéb módon is végrehajtható a feladat. Jó példa lehet erre, hogy egyéb paraméterek (pl. anizotrópia) változtatásának hatása is vizsgálható, így az ezekre alapozott paraméterérzékenységi vizsgálat eredményei is bevonhatók a várható érték és a szórás meghatározásának folyamatába. Emellett a COMSOL Multiphysics programban a modellezés során Monte Carlo-szimulációt is lehet használni. Az így generált nagyobb számú eredményszelvényre alapozva is definiálható a hőmérsékleti eloszlás. Ennek alkalmazása a kutatás folytatásaként tervben van.

5.3. Visszasajtolás

Az *Eredmények* fejezetben bemutattam, hogy azzal a feltételezéssel éltem, hogy a távhőrendszerben történő közvetlen hőhasznosítást követően 40 °C-os víz marad vissza. Azonban, azt is figyelembe kell venni, hogy ez még tovább hasznosítható kaszkádrendszerben. Ez esetben ezzel is számolni kell, hiszen így alacsonyabb hőmérsékletű víz kerül visszasajtolásra a víztartóba. Emellett, a termális betörés időbeli bekövetkezésének becsléséhez numerikus modellezésre lenne szükség. A kaszkádrendszer megtervezése és a numerikus modellezés túlmutat a dolgozat határain. Ez jó példa arra, hogy többletmunka, -idő és -pénz befektetésével lehetne növelni (vagy ha nem támogatóak az új adatok, akkor csökkenteni) a POS értékét, de nem mindig van rá elegendő forrás.

5.4. A magyar és német ajánlás összehasonlítása

Összefoglalásképp elmondható, hogy mind a két módszer a feltételes valószínűségi rendszeren alapszik, és azt feltételezi, hogy a rendszerben definiált változók függetlenek egymástól. Hasonló valószínűségi változók kerültek definiálásra a két rendszerben: mindkettő számításba veszi a víztartó meglétét, annak minőségét, illetve a rezervoárból kinyerhető fluidum kémiaiáját a geológiai valószínűség kiszámításánál. A visszasajtolás is mindkét módszertanban megjelenik mint kockázati tényező, bár kicsit eltérő módon. A német útmutató

a termelő és visszasajtoló kút közötti kommunikációt nevezi meg valószínűségi változóként: úgy definiálja, hogy a $POS_{Communication}$ annak a valószínűsége, hogy a két kút közötti megfelelő kapcsolat révén megteremtődik a lehetőség a hosszú távú fenntartható termelésre a megfelelő vízutánpótlás által. A magyar POS_{RI} ennél tágabb definícióval rendelkezik, mert ez magában foglalja annak a kockázatát is, hogy a termális betörés miatt a kitermelhető víz hőmérsékletcsökkenést szenved el, s így idővel csökken a termelési hatékonyság. A hőmérséklet kissé eltérően jelenik meg a két szemléletmódban. A magyar rendszer szerint ez hozzájárul a geológiai kockázathoz, a német rendszer azonban ott nem számol vele. További eltérés ezen túlmenően, hogy a német rendszer foglalkozik a fúrás közben felmerülő technológiai akadályokkal, míg a magyar elképzelés ezt nem tartalmazza. Mindkét módszer tartalmaz egy kvalitatív értékelést segítő diagramot, mely elegendő kvantitatív adat hiányában segít értékelni a kockázati faktorokat.

A két módszer abban is hasonlít, hogy a hőmérséklet és a hozam esetében egyaránt ajánlja a valószínűségi eloszlás becslését. Ezek miatt is fontosak, mert ezekre alapozva Monte Carlo-szimuláció futtatható le, melynek eredményeként becsülhető az elérni kívánt névleges teljesítmény (kapacitás) elérésének valószínűsége. Mindkét rendszer úgy kapcsolja hozzá ezt az elemet a geológiai valószínűséghez, hogy ezzel még megszorozza azt.

6. Összefoglalás és következtetések

Dolgozatomban a geotermikus beruházások geológiai kockázatelemzési módszertanával foglalkoztam, mely mind gazdasági, mind fenntarthatósági szempontból kiemelkedő jelentőségű. Első lépésben a 2024 tavaszán megjelent német és a még dinamikusan formálódó magyar geotermikus elemzési eljárást hasonlítottam össze. Erre alapozva az mondható el, hogy a két módszertan lényegi elemeit tekintve megegyezik: a matematikai alapjai ugyanazok. Az eltérések elsősorban egyes valószínűségi változók definíciójában rejlenek, illetve vannak olyan elemek, melyek az egyik rendszerben megtalálhatóak, de a másikban nem. Mivel a két elképzelés egymástól teljesen függetlenül fejlődött, elmondható, hogy mindkét koncepció alapjaiban helytállónak tekinthető. A részletek felülvizsgálása hasznos lehet a módszertanok pontosítása, javítása, és a szubjektivitás csökkentése érdekében.

A Budai Termálkarszt mintaterületén a karbonátos rendszerre végzett elemzés számos nehézségre rámutatott. Ezek közül a legfontosabbak a következők voltak: a kutatási területen kevés adat áll rendelkezésre ahhoz, hogy megbízható, kvantitatív, statisztikai alapokon nyugvó becslést lehessen végezni, mely lehetővé teszi az egyes projektek objektív összehasonlítását. Mivel a különböző jellegű területekről (pl. belvárosi/agglomerációs) eltérő típusú földtani adatok állnak rendelkezésre, a módszertan nehezen általánosítható. Emellett, numerikus modellezés, empirikus formulák, vagy matematikai levezetésen alapuló képletek alkalmazása esetén sokszor a modellfeltételek nem adóttak (pl. komplex geometria, magas fokú anizotrópia, inhomogenitás miatt), így azok korlátozottan alkalmazhatók. Ilyen esetekben a kvalitatív értékelést támogató módszerek nyújthatnak megoldást, melyek felhívják egyúttal a figyelmet arra is, hogy további kutatásokkal, mérések elvégzésével új adatok szerezhetők be. Az új eredményekre alapozva pedig a minősítés nagyobb eséllyel elbillenhet a neutrális zónából egy olyan tartományba, ahol a tervezett projektről már egyértelműbben eldönthető, hogy érdemes-e megvalósítani, vagy sem. Végül pedig, az egyes szakmai közösségek eltérő fogalomhasználata is problémákat okozhat az adatgyűjtés során.

Reményeim szerint ezek a megállapítások megalapozzák azt, hogy a továbbiakban a magyar módszertant ezek figyelembevételével lehessen fejleszteni, s annak szubjektív jellegét minimálisra csökkenteni. Ennek értelmében a következőkben egy-egy résztema, probléma részletesebb vizsgálat alá kerülhet. Így például, a hőtranszport-modellezés eredményei is számos módon integrálhatóak az elemzési folyamatba – a dolgozatban bemutatott módszer mindössze egy a sok lehetőség közül. Ennek módszertani fejlesztése a kutatás folytatásaként tervben van. Emellett, a már említett hozambecslési eljárás kvantitatívabb megközelítésének kidolgozása is hasznos lehet - mind karbonátos, mind sziliciklasztos víztartók esetén.

7. Irodalomjegyzék

- Báldi T., Báldi-Beke M. (1985) The evolution of the Hungarian Paleogene basins. *Acta Geol. Hung.* 28 (1/2), pp. 5–28.
- Békési, E., Lenkey, L., Limberger, J., Porkoláb, K., Balázs, A., Bonté, D., Vrijlandt, M., Horváth, F., Cloetingh, S., van Wees, J.D., 2018. Subsurface temperature model of the Hungarian part of the Pannonian Basin. *Glob. Planet. Change* 171, 48–64. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.09.020>.
- Bodor P., Erőss A., Mádl-Szőnyi J., Kovács, J. (2015) A csapadék hatása a rózsadombi források utánpótlódási és megcsapolódási területén. *Földtani Közlöny*, 145 (4), pp. 385-395.
- Bodor P., Tóth Á., Kovács J., Mádl-Szőnyi J. (2014) Multidimensional data analysis of natural springs in a carbonate region. Extended Abstract, EAGE/TNO workshop: Basin Hydrodynamic Systems in Relations to Their Contained Resources, Utrecht, The Netherlands, 6–8 May 2015.
- Bodri, L., 1981. Geothermal model of the Earth's crust in the Pannonian Basin. *Tectonophysics* 72, 61–73. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90087-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90087-1).
- BVEG – DGMK (2024): Geologische Risikobewertung tiefegeothermischer Projekte. Stand: 03/2024. Federal Natural Gas Association, Petroleum and Geoenergy e. V. <https://dgmk.de/en/news/draft-of-the-new-guideline-for-geological-risk-assessment-of-deep-geothermal-projects-published/> [Letöltve: 2024.11.13.]
- Császár, G. (1997). Magyarország litosztratigráfiai alapegységei. *Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest*, 114.
- Dana, K. M., & Jwan, S. M. (2016). Performing pumping test data analysis applying Cooper-Jacob's method for estimating of the aquifer parameters. *Modelling in Civil Environmental Engineering*, 12(2), 9-20.
- Deming D. (2002) Introduction to hydrogeology. McGraw-Hill, New York. DOI: 10.1007/s10040-015-1274-x
- Dövényi, P., Horváth, F., 1988. A review of temperature, thermal conductivity and heat flow data for the Pannonian Basin. In: Horváth, F., Royden, L.H. (Eds.), *The Pannonian Basin: A Study in a Basin Evolution*. AAPG Memoir 45, 195–233. ISBN: 9781629811345.
- Elmorsy, M., El-Dakhkhni, W., & Zhao, B. (2023). Rapid Permeability Upscaling of Digital Porous Media via Physics-Informed Neural Networks. *Water Resources Research*, 59(12), e2023WR035064.
- Eppelbaum, L., Kutasov, I., Pilchin, A., 2014. Applied Geothermics, 1th ed. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p. 751. ISBN: 978-3-642-34022-2.
- Erőss A. (2010) Characterization of fluids and evaluation of their effects on karst development at the Rózsadomb and Gellért Hill, Buda Thermal Karst, Hungary. PhD Dissertation. ELTE Physical and Applied Geology. Budapest, Hungary 171 p
- European Parliament: Geothermal Energy in the EU, 2023. október; [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2023\)754566](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2023)754566) [Letöltve: 2024.11.14.]
- Fodor, L. (2013). A Budai-hegység felépítését szemléltető K-Ny irányú szelvények. In: Mindszenty A. (ed.) *Budapest: földtani értékek és az ember – városgeológiai tanulmányok*. Budapest: Eötvös Loránd University Press, pp. 20.
- Gálfi J. és Liebe P. 1977: Magyarország geotermikus hőmérséklettérképei a vízfeltáró fúrások alapján. *Kutatási Jelentés, VITUKI adattár*, Budapest
- Garamhegyi, T., Székely, F., Carrillo-Rivera, J.J., Mádl-Szőnyi, J., 2020. Revision of archive recovery tests using analytical and numerical methods on thermal water wells in sandstone and fractured carbonate aquifers in the vicinity of Budapest, Hungary. *Environ. Earth Sci.* 79, 129. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8835-6>.

- Gomo, M. (2020). On the practical application of the Cooper and Jacob distance-drawdown method to analyse aquifer-pumping test data. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100478.
- Haas, J. (2013). *Geology of Hungary*. Berlin: Springer-Verlag, p. 236.
- Haas, J. (1988). Upper Triassic carbonate platform evolution in the Transdanubian Mid-Mountains. *Acta Geologica Hungarica: A Quarterly of the Hungarian Academy of Sciences* 31(3-4), pp. 299-312.
- Haas, J., Budai, T., Csontos, L., Fodor, L., Konrád, G., Koroknai, B. (2014). *Geology of the pre-Cenozoic basement of Hungary: Explanation to the Pre-Cenozoic geological map of Hungary*. Budapest: Geological and Geophysical Institute of Hungary, p. 71.
- Haas, J., Korpás, L., Török, Á., Dosztály, L., Góczán, F., Hámorné, V.M., Oraveczné, S.A., Tardiné, F.E. (2000). Felső-triász medence és lejtőfáciesek a Budai-hegységben – a Vérhalom téri fűrészvizsgálatának tükrében. *Földtani Közöny* 130(3), pp. 371-421.
- Havril, T., Molson, J. W., & Mádl-Szőnyi, J. (2016). Evolution of fluid flow and heat distribution over geological time scales at the margin of unconfined and confined carbonate sequences-A numerical investigation based on the Buda Thermal Karst analogue. *Marine and Petroleum Geology*, 78, 738-749.
- Kehl, D. (2012). Monte-Carlo-módszerek a statisztikában. *Statisztikai Szemle*, 90(6), 521-543.
- Kun, É., Szabó, Zs., Tóth, Gy., Székvölgyi, K., Gáspár-Baranyi, E., Falus, Gy., Gál, N., Mekker, J., Szócs, T., Szép, E., Szűcs, A., Vári, Z., Rotárné Szalkai, Á., Maros, Gy., Héja, G. (2024): Hydrogeological and heat transport modelling of the Buda Thermal Karst (Budapest, Hungary) In: IAH2024 Davos Book of Abstracts, Paper: 106358
- Leél-Össy, S. (2017). Caves of the buda thermal karst. *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*, 279-297.
- Lieb I. (2004) A Lukács fürdő bemutatása. Földtani és hidrogeológiai viszonyai, történetének felkutatása és forrásainak retrospektív vizsgálata. Szakdolgozat. Eötvös Loránd Tudományegyetem. TTK, Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest.
- Mádlné Szőnyi, J. (2019). Felszínalatti vízáramlások mintázata fedetlen és kapcsolódó fedett karbonátos víztartó rendszerekben, a Budai-termálkarszt tágabb környezetének példáján (Akadémiai nagydoktori mű, ELTE).
- Mádlné Szőnyi, J., Czauner, B., Simon, S., Eröss, A., Zemle, F., & Pulay, E. (2013). Hidrogeológia. *Írta Mádlné Dr. Szőnyi Judit, Dr. Czauner Brigitta, Dr. Simon Szilvia, Dr. Eröss Anita, Zsemle Ferenc, Pulay Eszter és Havril Tímea. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest*, 139-140.
- Mádl-Szőnyi, J., Czauner, B., Veronika, I., Tóth, Á., Simon, Sz., Eröss, A., Bodor, P., Havril, T., Boncz, L., Sőreg, V., (2019). Confined carbonates? – regional-scale hydraulic interaction or isolation? *Mar. Pet. Geol.* 107, 591–612. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.06.006>.
- Mádl-Szőnyi, J., Eröss, A., Csondor, K., Iván, V., & Tóth, Á. (2022). Hydrogeology of the Karst regions in Hungary. In *Cave and Karst Systems of Hungary* (pp. 137-160). Cham: Springer International Publishing.
- Mádl-Szőnyi, J., Eröss, A., Havril, T., Poros, Z., Győri, O., Tóth, Á., ... & Mindszenty, A. (2018). Fluidumok, áramlási rendszerek és ásványtani lenyomataik összefüggései a Budai-termálkarszton. *Földtani Közöny*, 148(1), 75-96.
- Mádl-Szőnyi, J., Eröss, A. & Tóth, Á. (2017). Fluid flow systems and hypogene karst of the Transdanubian Range, Hungary—with special emphasis on Buda Thermal Karst. *Hypogene karst regions and caves of the world*, 267-278.

- Mádlné Szőnyi, J., Markó, Á., & Tóthi, T. (2024). Nem lehet mindenhol mindent, de mindenhol lehet valamit–Geotermikus energia hasznosítás lehetőségei a hazai ellátás diverzifikálása érdekében. *Scientia et Securitas*.
- Mádl-Szőnyi, J., & Tóth, Á. (2015). Basin-scale conceptual groundwater flow model for an unconfined and confined thick carbonate region. *Hydrogeology Journal*, 23(7), 1359.
- Markó, Á., Tóthi, T., Szilágyi, I., & Mádl-Szőnyi, J. (2024). *Geological risk analysis of geothermal developments in a sedimentary basin, Hungary* (No. EGU24-9927). Copernicus Meetings.
- Markó, Á., Tóthi, T., Szilágyi, I., Mádl-Szőnyi, J. (2024 in press): Geological risk analysis of geothermal developments – case study of the hypogene Buda Thermal Karst. In: Eurokarst - Advances in Karst hydrogeology. s.l.:Springer.
- MEKH (2020): Geotermikus Budapest <https://mekh.hu/geotermikus-budapest> [Letöltve: 2025.01.02.]
- MEKH (2024a). Elsődleges megújuló energiahordozók termelése és felhasználása <https://www.mekh.hu/eves-adatok> [Letöltve: 2024.11.12.]
- MEKH (2024b). Hőenergia termelés. <https://www.mekh.hu/evesadatok> [Letöltve: 2024. 11.12.] Paulillo, A., Striolo, A., & Lettieri, P. (2019). The environmental impacts and the carbon intensity of geothermal energy: A case study on the Hellisheiði plant. *Environment International*, 133, 105226.
- Rman, N., Tóth, Gy., 2011. T-JAM Vizfoldtani " koncepcionalis " modell, p. 25.
- Rose, P. R. (1999). Taking the risk out of petroleum exploration; the adoption of systematic risk analysis by international corporations during the 1990s. *The Leading Edge*, 18(2), 192-199.
- Salát P., Galsa A., Cserepes L., Drahos D., Hazai törmelékes üledékes rétegsorok permeabilitás anizotrópiája, Magyar Geofizika, 2002, 43/1, 17–26.
- Suslick, S. B., Schiozer, D. J. (2004). Risk analysis applied to petroleum exploration and production: an overview. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 44(1-2), 1-9.
- Szanyi, J., Nádor, A., & Madarász, T. (2021). A geotermikus energia kutatása és hasznosítása Magyarországon az elmúlt 150 év tükrében. *Földtani Közlöny*, 151(1), 79-79.
- Szijaártó, M., Galsa, A., Tóth, Á., & Mádl-Szőnyi, J. (2021). Numerical analysis of the potential for mixed thermal convection in the Buda Thermal Karst, Hungary. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34, 100783, pp.2.
- Szilágyi I. (2023). Geotermikus geológiai kockázatok elemzése és számszerűsítése. Hogyan és miért?, SZTFH, Geotermikus előadói nap Budapest. 2023. 09. 07.
- Tóth, Á., 2018. Groundwater Flow Systems and Hydraulic Connection of the Bakony–Balaton Highland–Lake Balaton Region (in Hungarian). PhD Thesis. Eötvös Loránd University, p. 169.
- Tóth, Á., Kovács, S., Kovács, J., & Mádl-Szőnyi, J. (2022). Springs regarded as hydraulic features and interpreted in the context of basin-scale groundwater flow. *Journal of Hydrology*, 610, 127907.
- Tóthi, T., Markó, Á., Szilágyi, I., & Mádl-Szőnyi, J. (2024). *Geological risk analysis of geothermal developments in the Buda thermal karst area* (No. EGU24-5687). Copernicus Meetings.
- Wein, Gy. (1974): A Budai-hegység tektonikája. Földr. Közi. 22. k. 2. sz. pp. 97—112.
- Yin, D., Shu, L., Chen, X., Wang, Z., & Mohammed, M. E. (2011). Assessment of sustainable yield of karst water in Huaibei, China. *Water resources management*, 25, 287-300.

8. Mellékletek

```
import numpy as np
from scipy.stats import norm
#Paraméterek definíciója:
T2 = 40 #Visszasajtolási hőmérséklet
mean_Q = 36 #l/s hozamértékek átlaga
st_dev_Q = 10.05 # hozamértékek szórása
cw = 4200 #J/kg°C víz állandó nyomáson vett fajlagos hőkapacitása
mean_T1 = 70 #°C rezervoárhőmérsékleti adatok átlaga
st_dev_T1 = 8 #°C rezervoárhőmérsékleti adatok szórása
n = 10000 #Szimulációk száma
#Normál eloszlások generálása a megadott paraméterek szerint:
T2_values = [T2] * n
T1_values = np.random.normal(mean_T1,st_dev_T1,n)
Q_values = np.random.normal(mean_Q,st_dev_Q,n)
#Monte Carlo-szimuláció: a kapacitáseloszlás [kW] becslése
capacity_values = []
i=0
while (i<n):
    capacity = (T1_values[i] - T2_values[i]) * Q_values[i]* cw/1000
    capacity_values.append(capacity)
    i=i+1
```

1. melléklet: A Monte Carlo-szimulációt megvalósító Python-kód részlete

változat	a	b	c	d	T_1 (B-8)	T_2 (B-60)	T_3 (B-20)	T_4 (B-21)	T_5 (B-13)	T_6 (B-56)	T_7 (Tervezett kút)	T_8 (B-24)	RMS	WRMS
mért					12,1	51	71	76,2	77,5	78,5		75,5		
1	0,01	10	1	1	12,979	21,739	36,157	89,56	101,85	97,455	95,123	82,416	0,006384	0,004383
2	0,05	0,2	0,2	1	12,049	45,691	70,813	94,798	103,59	96,68	95,063	104,05	0,004323	0,004328
3	0,05	5	1	1	11,923	31,459	61,9	93,37	94,754	84,794	80,022	66,345	0,002319	0,001877
4	0,05	5	1	5	11,922	31,313	61,738	93,037	94,325	84,35	79,584	65,831	0,002294	0,001843
5	0,05	10	1	1	11,96	32,727	64,652	85,935	85,211	75,031	69,969	60,062	0,00153	0,001171
6	0,05	10	0,1	1	12,058	45,592	76,537	76,849	82,479	75,549	72,417	84,755	0,000353	0,000296
7	0,05	10	0,2	1	12,072	45,875	78,883	78,064	82,607	75,465	72,163	81,771	0,000327	0,000242
8	0,05	10	0,5	1	12,03	40,205	74,707	82,899	85,114	76,877	72,949	73,29	0,000473	0,000347
9	0,05	10	0,8	1	11,985	35,206	68,384	85,073	85,357	75,923	71,303	64,755	0,001019	0,000773
10	0,05	10	0,9	1	11,972	33,892	66,451	85,522	85,273	75,458	70,613	62,282	0,001266	0,000966
11	0,08	10	0,5	1	11,701	42,861	79,105	74,746	76,137	68,74	65,322	67,903	0,000568	0,000441
12	0,1	10	0,1	1	11,554	44,409	77,904	74,658	79,032	71,909	68,876	81,35	0,000341	0,000254
13	0,1	10	0,2	1	11,574	46,744	82,054	71,672	74,974	68,185	65,228	75,607	0,000538	0,000403
14	0,1	10	0,5	1	11,564	42,361	79,013	71,003	72,238	65,261	62,112	65,453	0,000923	0,000793
15	0,1	10	0,9	1	11,533	35,014	70,235	70,334	69,2	61,407	57,761	54,599	0,002139	0,001902
16	0,1	10	1	1	11,526	33,516	68,126	70,037	68,387	60,368	56,59	52,248	0,002563	0,002272

2. Melléklet: A hidrogeológiai modell kalibrációja során dokumentált 16 modell

permeabilitás értékei és a szimuláció eredményének hőmérsékleti értékei a

referenciapontokban. a = a prekainozoós réteg eredetileg megadott permeabilitás

értékének szorzószáma, b = a prekiscelli-tardi réteg eredetileg megadott permeabilitás

értékének szorzószáma, c = a preneogén réteg eredetileg megadott permeabilitás

értékének szorzószáma, d = a prepannon réteg eredetileg megadott permeabilitás

értékének szorzószáma.

9. Függelék – Saját eredmények

1) Kérdésfelvetés

Dolgozatom célja a geotermikus projektek geológiai kockázatelemzési módszerének tesztelése volt a Budai Termálkarszt mintaterületén. Ennek révén a következő – általánosabb jellegű - kérdésekre kerestem a választ: Melyek a módszertanban rejlő nehézségek, akadályok? Mely elemek szorulnak fejlesztésre? Hogyan lehet minél kvantitatívabbá és megbízhatóbbá tenni a módszertant? Az elemzés végrehajtása során különös figyelmet fordítottam a hőmérséklet szerepére. Az ehhez kapcsolódó további felvetett fő kérdés a következő volt: Hogyan lehet a hőmérsékleti modellezés eredményeit beépíteni az elemzési folyamatba úgy, hogy a hőmérsékleti faktor bizonytalanságának megfelelő becslésével a várható hőmérsékleteloszlást definiálni tudjuk?

2) Alkalmazott módszerek

Első lépésben összehasonlítottam a magyar és a német kockázatelemzési módszertant annak érdekében, hogy megállapítsam, mennyire egyezik a két elképzelés, illetve fejleszthető-e a magyar eljárás a német mintára. Második lépésben pedig a Budai Termálkarszt egy kijelölt projektterületén végrehajtottam a kockázatelemzési folyamatot. Ennek során a legnagyobb hangsúlyt a hőmérsékleti tényező elemzésére fordítottam: numerikus modellező programban végeztem hőtranszport-modellezést. A többi kockázati faktor vizsgálata során kvantitatív és kvalitatív eszközöket alkalmaztam. A projekt által elérhető hőtéljesítményt pedig Monte Carlo-szimulációval modelleztem.

3) Eredmények

Az elemzés végrehajtása során számos nehézségre derült fény az elemzési eljárásokhoz kapcsolódóan: a korlátozott mennyiségű adat, a modellezésnél és egyéb kvantitatív módszereknél a modellfeltételek fennállásának hiánya, az egyes szakmai közösségek eltérő fogalomhasználata mind olyan tényezők, melyek nehezítik az elemzés megbízható végrehajtását. A módszertan részleteiben nehezen általánosítható a földtani változatosságból adódóan: minden egyedi területen az ott legmegbízhatóbban alkalmazható kvantitatív módszer megválasztására érdemes törekedni. Ahol erre nincsen lehetőség, ott pedig alkalmazhatóak a kvalitatív értékelési módszerek. Ami pedig a hőmérséklet-modellezést illeti, ennek eredményei számos módon integrálhatóak az elemzési folyamatba. A dolgozatban bemutatott lehetőség egy a sok közül, melyet a kutatás folytatásaként a későbbiekben fejleszteni szeretnék.

10. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek: Dr. Szijártó Márknak, aki a modellezés során tanúsított támogatásával nagyban előrelendítette a kutatást, és Mádlné Dr. Szőnyi Juditnak, aki sokat segített a Budai Termálkarszt rendszerének megismerésében. Emellett szeretnék köszönetet mondani Szilágyi Imrének a stratégiai megbeszélésekért, melyek sokat segítettek a módszertan megértésében, illetve Markó Ábelnek, akivel közösen sokat ötleteltünk az értékelés kisebb-nagyobb problémáin.

A tudományos diákköri dolgozat a kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-24 kódszámú egyetemi kiválósági ösztöndíj programjának a nemzeti kutatási, fejlesztési és innovációs alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. A szerződés száma: ELTE/15380/1(2024)

A projektet az Európai Bizottság és a Magyar Kulturális és Innovációs Minisztérium a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból, az Ír Környezetvédelmi Ügynökség, a Holland Kutatási Tanács és a Spanyol Kutatási Hivatal támogatja a ClimEx-PE nemzetközi konzorcium keretében, amelyet a 101060874 - Water4All európai partnerség 2022-es közös felhívása finanszíroz.

A 2023-1.2.2-HE_PARTNERSÉG-2023-00005 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2023-1.2.2-HE_PARTNERSÉG pályázati program finanszírozásában valósult meg.

A kutatás az Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú projekt keretében valósult meg.