

A Battonya–Pusztaföldvári-hát térségének nagy entalpiájú geotermikus energia vagyona (II. rész): kútpárral történő hasznosítás UNFC-2009 kód szerinti osztályozása

KUN Éva^{1,3}, ZILAHÍ-SEBESS László¹, SZANYI János²

¹Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága

²Szegedi Tudományegyetem

³e-mail: eva.kun@sztfh.hu

The high enthalpy geothermal energy resource of the Battonya–Pusztaföldvár High (Part II): UNFC-2009 code classification in case of well-doublet utilization

Abstract

In the first part of our study (KUN et al. 2022), we presented the geological and hydrogeological characteristics of the fractured pre-Neogene–pre-Cenozoic basement of the Battonya–Pusztaföldvár High and a hydrodynamic and heat transport model for geothermal energy utilization. In the present study, using the above-mentioned semi-synthetic equiporous model, the amount of heat that can be extracted by a doublet well was calculated for several scenarios, taking into account the technological constraints. The calculations were performed using the classification framework UNFC-2009 code developed by the United Nations Economic Council for Europe (UNECE 2016a). Uncertainty in the data was accounted for by Monte Carlo simulation, and the resulting parameter ranges were used to generate fuzzy numbers as inputs to the models. The recoverable geothermal reservoir data obtained with the FEFLOW® finite element modelling software were then compared with the statically calculated values. The difference between the two calculations is half an order of magnitude in favour of the modelled values, which we believe better reflects the expected values than the static resource calculation. In the present study, the UNFC-2009 code geothermal resource classes of the Battonya–Pusztaföldvár High project was assumed as follows: E3.2, F3.3 and G4. Based on our studies, it was concluded that a reservoir of limited volume, considered as nearly closed, even with optimally located production-recovery well pairs, can be depleted rapidly (up to 20–30 years) if it cannot be connected to a larger system providing continuous heat supply, such as deep fractured systems opening up with neotectonic movements. Our study did not include an accounting of the challenges posed by the composition of the geothermal fluid, nor an analysis of the time-varying processes (geochemical, structural, etc.) of the filtration equipment and well environment, but we are aware that these can all be critical factors in the sustainable operation of a high enthalpy geothermal doublet. We strongly believe that our study makes a useful contribution to the numerical characterization of the real risks of geothermal research and energy utilization, helping the planning of projects from an economic perspective.

Keywords: hydrodynamic and heat transport modelling, geothermal potential, basement highs, UNFC-2009 method, FEFLOW® modelling software, pore space utilization

Összefoglalás

Tanulmányunk első részében (KUN et al. 2022) bemutattuk a Battonya–Pusztaföldvári-hát repedezett preneogén–prekainozoos aljzatának földtani, hidrogeológiai adottságait és a geotermikus energia hasznosítását célzó hidrodinamikai és hőtranszport modelljét. Jelen tanulmányban, az említett felszintetikus, ekviporózus modell segítségével, kiszámítottuk az egy kútpárral (doublet) kitermelhető hő mennyiségét több forgatókönyv szerint, a technológiai korlátokat szem előtt tartva. A számítások során az Egyesült Nemzetek Európai Gazdasági Tanácsa által kidolgozott UNFC-2009 kód nevű osztályozási keretrendszert alkalmaztuk (UNECE 2016a).

Az adatokban rejlő bizonytalanságot Monte Carlo szimulációval vettük figyelembe, majd az így létrejött paramétertartományokból fuzzy számokat képezve alkottuk meg a modellek bemenő adatait. Ezt követően a FEFLOW® véges elemes modellező szoftverrel kapott kitermelhető geotermikus készlet adatokat összevetettük a statikus módon számolt értékekkel. A két számítás között fél nagyságrend eltérést kaptunk a modellezett értékek javára, mely véleményünk szerint jobban tükrözi a várható értékeket, mint a statikus készletszámítás eredménye. A Battonya–Pusztaföldvári-hát jelen tanulmányban feltételezett projektjének UNFC-2009 kód szerinti geotermikus készlet osztálya: E3.2, F3.3 és G4.

A vizsgálat sorozat alapján megállapítottuk, hogy egy lehatárolt térfogatú, közel zártan tekinthető rezervoár optimá-

lisan elhelyezett termelő-visszasajtoló kútpárok esetén is hamar kimerülhet (akár 20–30 év alatt), ha nem tud rácsatlakozni egy nagyobb, folyamatos hőszállítást biztosító rendszerre, mint amilyenek a neotektonikai mozgásokkal felnyíló, mélységi vetőrendszerek.

Vizsgálatunknak nem volt része a geotermikus fluidum összetételéből adódó kihívások számbavétele, valamint a szűrőberendezés és a kútkörnyezet időben változó folyamatainak elemzése (geokémiai, szerkezeti stb.), de tudatában vagyunk, hogy ezek mind kritikus tényezők lehetnek egy nagy entalpiájú geotermikus kútpár fenntartható üzemeltetésekor.

Úgy véljük, tanulmányunk hasznosan járul hozzá a geotermikus kutatás és energiahasznosítás valós kockázatainak számszerű jellemzéséhez, segítve a projektek gazdasági szempontú tervezését is.

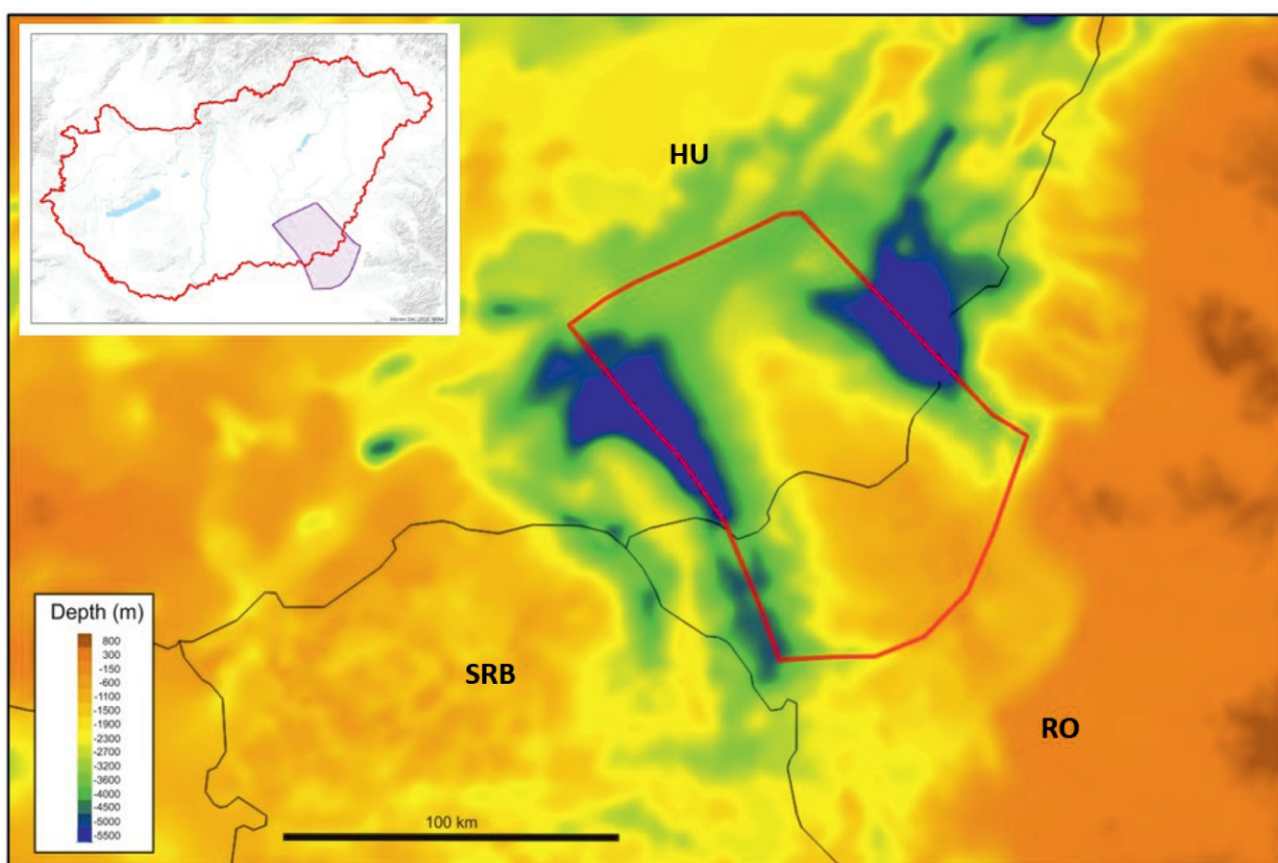
Tárgyszavak: hidrodinamikai és hőtranszport modellezés, geotermikus potenciál, aljzati magaslát, UNFC-2009 módszer, FEFLOW® modellező szoftver, póruster használat

Földtani, hidrogeológiai adottságok

A Battonya–Pusztaföldvári-hát geotermikus energiatermelés szempontjából releváns földtani és hidrogeológiai adottságait tanulmányunk első részében részletesen tárgyaltuk (KUN et al 2022). Jelen tanulmányban ennek rövid kivonatát ismertettjük.

A metamorf képződményekből és gránitból (alárendelten karbonátokból) álló alaphegység ÉK-i és DNy-i szomszédságában Dél-Magyarország két legmélyebb, –6500, illetve –7000 m-es mélységet is meghaladó neogén süllyedéke (HAAS et al. 2010), a Békési-medence és a Makói-árok, helyezkedik el (1. ábra). Az aljzat Fábiánsebestyéntől, –3600 m-es mélységből, DK felé fokozatosan emelkedik,

Battonya térségében –1000 m-es tengerszinthez viszonyított magasságot elérve (T. KOVÁCS 1965). Az alaphegységi kiemelkedés fölött az első pannóniai képződmény a Békési Konglomerátum Formáció. Ezt követően a behordási területektől távoli, behordott üledékekben szegény kondenzált rétegsorok (mészmárga, márga, agyagmárga) települtek. A Pannon-tó fokozatos feltöltődésével a háton megjelennek a lejtő üledékei is, ezt követően pedig a pannóniai üledékgyűjtő peremei uralkodóan deltaüledékek, majd folyóvízi üledékek rakódtak le. Az Alföldi Formációcsoport (Békési Konglomerátum, Endrődi Márga, Szolnoki Homokkő és Algyői Formáció) összlete a Battonya–Pusztaföldvári-hát területén mintegy 600–800 méter vastag, míg a Makói-árok irányában az 2500–3500 métert, a Békési-medence felé pe-



1. ábra. A Battonya–Pusztaföldvári-hát hidrodinamikai modelljének (piros vonal) határa a prekainozoos aljzatfelszíntérképen ábrázolva

Figure 1. The boundary of the pilot model (red line) presented on the map of pre-Cenozoic basement surface

dig a 3000 méter vastagságot is eléri. Az Újfalui és Zagyvai Formációk, mint a Dunántúli Formációcsoport tagjai együttesen a Battonya–Pusztaföldvári-hát területén mintegy 600–800 m vastagságúak, a medencék irányában azonban együttesen elérhetik a 2000 métert is. A pliocénban és a negyedidőszakban a területen folytatódott a folyóvízi, tavi, mocsári üledékképződés. A mélymedencékben az üledékképződés folyamatos volt, a negyedidőszaki üledékek vastagsága a 600–800 métert is elérheti, míg a kiemelt hátságokon a rétegsor a kitett helyzetének és a lepusztulásnak is köszönhetően sokkal vékonyabb (alig 150 méter).

A vizsgált térségben alapvetően két, függőlegesen egymásra épülő áramlási rendszer definiálható: egy felső, gravitáció által vezérelt áramlási rendszer és egy alsó, az árkokban bizonyítottan túlnyomóságú áramlási rendszer, melyeket a késő miocén mélyvízi, tengeri agyagos képződmények választják el (TÓTH & ALMÁSI 2001). A korábbi szénhidrogénkutatások adatai alapján az alsó mezozoos–paleozoos zóna képződményeiben a tárolóképeséget leginkább a tektonika alakította ki, ahol az aljzat felső mállott zónája is tárolóvá válhatott. A térségre jellemző geotermikus gradiens $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ a felső 2000 m-en.

A geotermikus energia hasznosítás alapfogalmai

A geotermikus rendszerek esetében meghatározó, hogy a hordozó közegként szolgáló fluidum rendelkezésre áll-e vagy sem.

BREDE et al. 2013 ezen az alapon a geotermikus rendszereket két részre osztja, hidrotermális (fluidum rendelkezésre áll), illetve petrotermális rendszerekre (fluidum nem elegendő a hőkivételhez). Az utóbbiakat korábban HDR-rendszereknek nevezték (Hot Dry Rock). Az osztályozást tovább finomítva, azokat a rendszereket, ahol a hőforrás, a rezervoár és a munkaközeg is természetes, hagyományos vagy konvencionális geotermikus rendszernek, míg amelyben a hőforrás természetes, de a rezervoár és/vagy a munkaközeg mesterséges, vagy mesterségesen befolyásolt, *növelt hatékonyságú* (enhanced), nem konvencionális geotermikus rendszereknek nevezzük. Innen ered az EGS elnevezés (Enhanced Geothermal System). Eszerint a termálvízadó kutak mesterséges hozamnövelése kémiai kezeléssel vagy repesztéses technológiával már a nem konvencionális termelési módok közé tartozik (SZANYI 2019).

Mivel célunk a vizsgált projekt UNFC-2009 módszer szerinti osztályozása, ismertetjük ennek főbb fogalmait (UNECE 2016a).

Fenntarthatóság

A geotermikus energia hasznosításakor főleg a termelési szint (hozam, kifolyó hőmérséklet) fenntarthatósága szükséges hosszú ideig, azaz a kitermelési tényező állandósága biztosítandó (RYBACH 2021).

A fenntarthatóság alatt nagyon sokszor csak környezeti

szempontokat értünk, pedig általában véve bármely tevékenység fenntarthatóságának 3 pillére van: környezeti, társadalmi, pénzügyi. Ugyanis ha csak környezeti szempontokat veszünk figyelembe, az adott projekt léte már középtávon is veszélyeztetett, különösen ha pénzügyileg nem fenntartható. Tehát ha egy projekt környezetvédelmi szempontból fenntartható, de pénzügyileg finanszírozhatatlanul drága vagy vállalhatatlan társadalmi hatásokkal jár, akkor összességében nem fenntartható.

Geotermikus energia esetében, ha csak a klímavédelemre koncentrálnunk, és a gazdaságosság háttérbe szorul (pl. túl hosszú távvezetékkel kell építeni), vagy nincs meg a társadalmi elfogadottság (pl. lakossági tiltakozás megakadályozza a fűrés befejezését), akkor a környezeti szempontból kedvező projekt is kudarcra van ítélve.

Geotermikus energiaforrás

Geotermikus energiaforrás a kőzetben, üledékben és/vagy talajban található hőenergia, beleértve a benne levő fluidumokat is, amely kivonásra és energiatermékeké (hő- és villamos energia) történő átalakításra rendelkezésre áll. A geotermikus energiaforrás egyenértékű a kőolaj- és szilárd ásványi nyersanyagok esetében használt „telep” vagy „felhalmozódás” kifejezésekkel. A fő különbség a fosszilis tüzelőanyagokkal vagy a szilárd ásványi nyersanyagokkal szemben, hogy a projekt élettartama alatt a geotermikus energiaforrás meghatározható ütemben pótlódik. A készletek a termelés leállása után (sőt bizonyos mértékben már a termelés alatt is) a szomszédos hő- és folyadékterományokból regenerálódnak (csak idő kérdése, hogy milyen fokozaton és milyen gyorsan).

Geotermikus energiatermék

A geotermikus energiatermék közvetlenül hasznosítható a meglévő energiarendszerben és eladható az energiapiacra. Az energiatermékekre példa a villamos- és hőenergia. A geotermikus energiaforrásból ugyanazon kitermelési eljárás során kinyerhető egyéb termékek (például szilícium-dioxid, lítium, mangán, cink, kén vagy a termelés során felszínre hozott víz és gáz) nem minősülnek megújuló energiatermékeknek, mindazonáltal hozzájárulhatnak a projekt gazdasági életképességéhez, a befektetés gyorsabb megtérüléséhez. Így ha ezeket értékesítik, a bevételi forrásokat be kell vonni a gazdasági értékelésbe.

Geotermikus energiakészlet

Geotermikus energiakészlet a geotermikus energiaforrásból kinyerhető energiatermékek kumulált mennyisége, melyet az értékelés hatálybalépésének időpontjától a projekt élettartama vagy határideje végéig számítanak a referenciaponton. A referenciapont egy meghatározott hely a termelési láncban, ahol a geotermikus energiatermék mennyiségét mérik vagy becsülik. Általában az a pont, ahol az energiát harmadik személyeknek értékesítik, vagy ahol átkeül a gazdálkodó egység hasznosító részlegébe.

A geotermikus energia hasznosítás feltételei

A földi hőáram által felmelegített kőzettérfogot (a helyi kőzet-radioaktivitással együtt) igen jelentős energiát jelent – de a kőzetvázban kicsi az energiasűrűsége („híg energia”). A geotermikus energiaforrásokat kis (<90 °C), közepes (90–150 °C) és nagy entalpiájú (> 150 °C) csoportba sorolják (MUFFLER & CATALDI 1978 in MÁDLNÉ SZŐNYI 2006). Nagy entalpiájú energiatermelésre alkalmas rezervoárnál a gazdaságos üzemeltetéshez mind a hőmérsékletnek, mind a fluidumhozamnak kellően magasnak kell lenni legalább 30 évig, hogy a főbb infrastruktúrális elemek élettartamával közel azonos időtartamig a rendszer üzemeltethető legyen (UNECE 2016b). A termikus feltételt a vulkanikusan aktív területek (pl. lemezszegélyek), valamint az elvékonyodó litoszféra által megnövekedett, anomálishan magasabb hőáramsűrűséggel jellemezhető térségek, míg átlagos geotermikus gradienssel jellemezhető területeken a nagyobb kútmélység biztosítja. Ahhoz, hogy ez a „híg” energia koncentráltan rendelkezésre álljon, az áramló fluidum által szállított hőre is szükség van (konvektív hőtranszport), enélkül ugyanis a kútkörnyezet hőmérséklete rövid időn belül a kritikus hőmérséklet alá csökkenhet. A fluidum (és a hő) utánpótlódása a tároló képződmény porozitásának és permeabilitásának (hővezető tényezőjének) függvénye, ami hidrotermális esetben meghatározza termeléssel megzavart áramlási rendszer fluxusát.

Az EU Víz Keretirányelve, valamint az arra épülő hazai jogszabályok előírják, hogy azokon a víztesteken, ahol a jó állapot fennáll, azt továbbra is biztosítani és fenntartani szükséges, ahol pedig az állapot gyenge, ott intézkedésekkel javítani kell. Ezért a nagy mélységű geotermikus energia hasznosítás vagy koncesszióköteles szénhidrogén-bányászat során előírás, hogy a nyomásszintek és vízkémiai paraméterek kedvezőtlen változása a sekélyebb termálvíz- és ivóvíz-hasznosításokat ne érintse. Ezeket a szempontokat figyelembe véve, a jelen tanulmányban vizsgált potenciális geotermikus rendszereket teljes körű visszasajtolást feltételezve modelleztük. Megjegyezzük, hogy a termelés hatásának detektálásához jól megválasztott monitoring rendszer szükséges, mely a bányatelek határain túlmutat és a regionális termelés együttes hatását reprezentálja.

Módszertan, alkalmazott módszerek

A UNFC-2009 módszer rövid ismertetése

A UNFC-2009 kód használatának elsődleges célja az adott geotermikus projektekhez kapcsolódó erőforrások osztályozása. Az osztályozási folyamat az egyes projektekben a geotermikus energiatermékeként kinyerhető és átadható energiamennyiségek becslésére vonatkozik. A geotermikus energiával összefüggésben a projekt magában foglalja az összes rendszert és berendezést, amely a geotermikus energiaforrást összeköti azzal a referenciaponttal, ahol a végső geotermikus energiatermékeket értékesítik, felhasználják vagy átadják.

A UNFC-2009 osztályozás alapja egy háromdimenziós

rendszer, melynek tengelyei az adott projekt gazdasági-társadalmi életképességét, illetve a szabályozási környezetet és a környezeti aspektusokat (E tengely), a projekt állapotát és megvalósíthatóságát – a technológia rendelkezésre állását is beleértve – (F tengely), valamint a földtani ismeretesség megbízhatóságát (G tengely) jellemzik. E tényezők alapján a meghatározott (számszerűsített) nyersanyagmennyiség egy háromjegyű kóddal jellemezhető (E, F, G kategóriák), amely egzaktan használható bárhol a világon.

Az egyes kategóriák és alkategóriák meghatározásait NÁDOR (2016) a *Földtani Közlönyben* részletesen bemutatta, az alábbiakban csak a G-tengelyt ismertetjük részletesebben. A UNFC-2009 szándékosan kerüli a „vagyon” és „készlet” fogalmakat, ugyanis azok meghatározása nem egyértelmű. Mivel a vonatkozó G-kategóriába besorolt energiamennyiség az értékelés időpontjától a projekt befejezéséig kitermelhető energiára vonatkozik, így az E, F, G kategóriák meghatározása az értékelés időpontjának függvénye.

A G tengely célja, hogy tükrözze az összes lényeges bizonytalanságot, amely befolyásolja a becsült kitermelhető geotermikus energia mennyiségét. A tengelynek 3+1, azaz 4 kategóriája van. Az ismert (fúrással feltárt) geotermikus energiaforrásokat G1, G2 és G3 kategóriák szerint kell osztályozni, amelyek az adott valószínűségi szint szerint kitermelhető hőmennyiséget mutatják. Míg potenciális geotermikus energiaforrás esetén, amelyben a fenntartható módon kitermelhető hőenergia meglétét még nem igazolták közvetlen bizonyítékokkal (pl. fúrás, kútteszt, kútgéofizika stb.), a G4 kategóriába kell sorolni, ahol a becslés bizonytalanságát a G4.1, G4.2 és G4.3 alkategóriákban kell megjeleníteni.

A UNFC-2009 értékelés a készletbecslés bizonytalansága szerinti kategóriái:

P90=G1 (bizonyított) konzervatív/ magas valószínűségű becslés – P90: 90% a valószínűsége, hogy a kitermelhető vagyon elér egy megadott értéket, vagy ennél több.

P50=G1+G2 (bizonyított+valószínű) legjobb valószínűségű becslés – P50: 50% a valószínűsége, hogy a kitermelhető vagyon elér egy megadott értéket, vagy ennél több.

P10=G1+G2+G3 (bizonyított+valószínű+lehetséges) legalacsonyabb valószínűségű becslés – P10: 10% a valószínűsége, hogy a kitermelhető vagyon elér egy megadott értéket, vagy ennél több.

Nyilvánvaló, hogy a hőmennyiség (készlet) becslésének bizonytalansága a bemeneti és számítási paramétereinek becslési bizonytalanságaiból ered. Legyen szó akár szilárd ásványi nyersanyagokról, akár fluidumokról, a készletbecslés első lépése mindig térfogatszámítás, ahol leggyakrabban a rétegvastagságot kezeljük valószínűségi változóként. Az ásványvagyonbecslés kőzettérfogot számítást követő lépése – mind szilárd ásványi nyersanyagok, mind fluidumok esetén – a térfogaton belüli, a vagyonmennyiséget meghatározó valamilyen „minőségi” paraméter eloszlásának a meghatározása. A geotermikus energia esetében – függően a készletbecslés fajtájától – ilyen paraméter a tároló effektív porozitása, valamint a kitermelhető hozam és a kifolyó hőmérséklet értéke, illetve a szivárgási tényező. Hőmennyiség (kész-

let) számításakor e paraméterek átlagértékeinek becslése a számítás alapja. A geotermális hasznosítás esetében elsődlegesen a hatékony pórustérfogat hőtartalmát, míg hosszabb távon a repedésekkel feltárt kőzetvázban tárolt hőmennyiséget termelik ki. A statikus becslésnél a bizonytalanság forrása az effektív porozitás és a hőmérséklet becslésének bizonytalanságából adódik. Mivel a földtani és fizikai paraméterek helyről helyre változnak, és a fúrásból származó adatok lényegében csak a vizsgált tér milliomod részéről adnak közvetlenül mért információt, ugyanakkor egy nagyobb térfogatra vonatkoznak, ezért minden egyes adat valószínűségi változónak tekinthető, beleértve a térfogatot is.¹

Ennek megfelelően a bemenő adatokhoz hozzá kell rendelni valamilyen bizonytalansági sávot (szórást), amellyel a modellparaméterek reprezentativitását jellemezhetjük.

A modell reprezentativitása az *a priori* információkon és az arra alapozott mintavételi stratégián múlik. A bizonytalanságot többféle módon határozhatjuk meg aszerint, hogy mennyi és milyen információ áll rendelkezésre. Az *a priori* információ lehet csak annyi, tudjuk, milyen földtani közegben vagyunk. Ezt nevezhetjük a becslés nulladik szintjének. Ha már van 1 db fúrás, a megmért értéket valamilyen elméleti szórásértékkel látjuk el.² Ezt a becslés első szintjének nevezzük, mivel van a birtokunkban mérési adat.

Ennél értékesebb, ha több fúrásban korreláció segítségével azonosítunk egy képződményt, mert akkor mért adatok alapján kapunk információt a földtani közeg fizikai paramétereinek szórásáról.

Az erre alapozott statisztikai alapú készletbecslés a második szint, ahol már a modellezés bemenő paramétereinek van mérésre alapozott várható értéke és szórása.

Fontos hangsúlyozni, hogy a becsült átlagérték és szórás is a földtani közeget jellemzi, nem a mérési hibák szórásáról van szó. Ezért ha a modellt valóságos mérésadatokra építjük, akkor az egységes hitelesítési rendszert eleve feltételezzük.³ A modellezett réteg felületeit felszíni észlelések során vagy fúrásokban mért adatok (lyukgeofizika), illetve azok földtani szelvények mentén végzett korrelációja segítségével szerkesztjük meg. Jelentős segítséget ad a fúrások-

¹Szemléletes példa a megismerés földtani lehetőségeiről, ami rávilágít az adatok reprezentativitására és a modellalkotás jelentőségére: Ha egy négyzet alakú területen a fúrások távolsága egymástól 200 m és a fúrások átmérője 200 mm, akkor az egész térfogatnak mindössze az 1 milliomod részét vizsgáltuk csak, ha 100%-os a magminta-vétel. Ugyanez az arány a mélyfúrás-geofizikai mérések esetében sem jobb a fúrások talpáig számított térrészre vonatkozóan, mint egy ötvenezred, ha úgy vesszük, hogy a lyukfúrásból kb. 40 cm mélységig kapunk értékelhető információt. A valóságban ez egy rendkívül optimista becslés, mivel szondák egy része nem körkörösén adja az információt, ezért ez a szám inkább csak egy kétszázévezred vagy még kisebb.

²Ez például a gamma-gamma lyukgeofizikai sűrűségmérés esetében származhat a beütésszám négyzetgyökeiből is, de származtatható az adott formáción belüli paraméterek szórásából is. A Monte Carlo számítás esetében a legegyszerűbb, ha valamilyen kis %-t, például 5%, vagy mérésértékben adjuk meg a szórást, például +/- 0,05 g/cm³.

³A felszínen vagy fúrólyukakban vett mintákon elvégzett mérések, a geofizikai adatgyűjtés, az adatfeldolgozás és az értelmezés, ideértve a különböző térfogatszámítások alapjául szolgáló térképek szerkesztését is, mind hibákkal terhelt, azonban ezek jó hitelesítés mellett ismert bizonytalanságok, szemben a vizsgált közeg nem ismert fluktuációival.

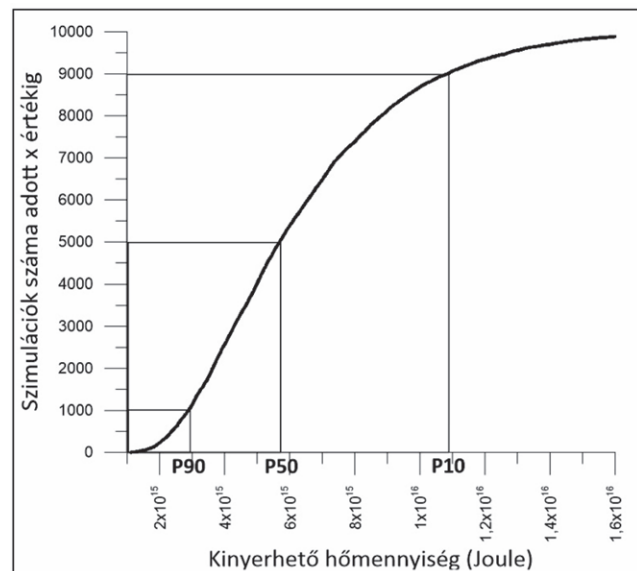
ból szerzett részletes információ térbeli kiterjesztéséhez a felszíni geofizika, ezen belül is főleg a szeizmika.

A hidrogeológiai modellezés alapadatai a bemenő paraméterek valamilyen kombinációjából származnak. A bemenő paraméterek mindegyike egy adott eloszlással, az ebből számolható átlagértékkel és szórással jellemezhető. Egy adott geotermikus rezervoár esetén a bemenő paraméterek többsége, pl. az effektív porozitás és a szivárgási tényező, rétegvastagság bizonytalanságának kezelésére a leggyakrabban alkalmazott módszer a Monte Carlo szimuláció (VON NEUMANN 1951, NÁDOR et al. 2019).

Az ásványvagyon- és készletosztályozás során a különböző kategóriákba soroláshoz szükség van a bizonytalanság mértékének magadására. Egy megadott paraméterek szerinti elvégzett determinisztikus készletbecslésből még nem tudjuk megmondani, hogy milyen valószínűséggel van egy bizonyos értéknél nagyobb vagy kisebb készletünk. A Monte Carlo módszer lényege, hogy mért adatok helyett azok szimulált (véletlenszámként generált) értékeit alkalmazzuk az adott paraméter megadására (egy konkrét értéket szórással látunk el), s az így kapott eredményeket értékeljük ki a mért hatás helyett (ZILÁHI-SEBESS 2016).

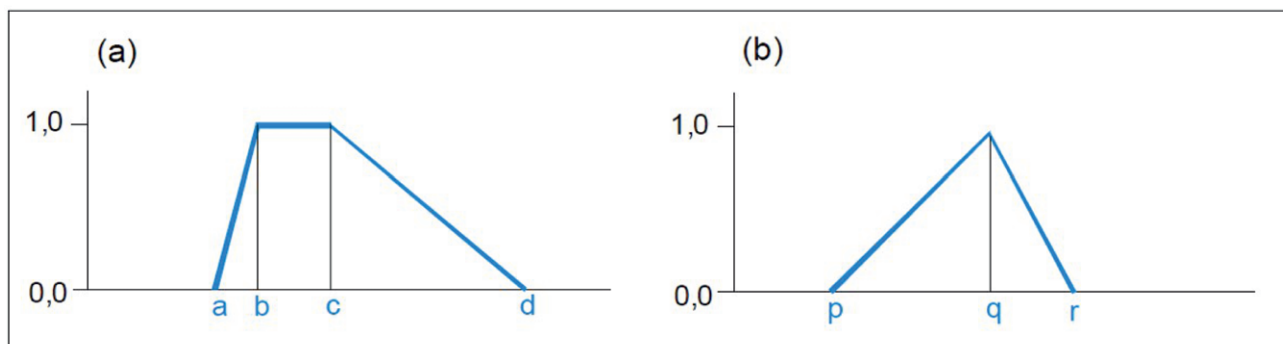
A Monte Carlo eljárás szerinti becslésnél véletlenszám-generátorral végrehajtott számítás sokszor – legalább ezer-szer – elvégezve és utána a megoldásokat nagyság szerinti sorrendbe állítva egy jellemző eloszlást kapunk. A később bemutatott statikus hőmennyiség számítás esetében a bizonytalanság kezelésére mi is a Monte Carlo módszert használtuk (2. ábra).

Azonban modellezésénél az előbb említett 1000 eset, esetenként 5 változó paraméter óriási mennyiségű (10E+8



2. ábra. Egy adott térrész permeabilitásának függvényében Monte Carlo szimulációval, 10000 realizációból számolt különböző valószínűségi szintek szerint (P10, P50 és P90 értékek) kinyerhető hőmennyisége (NÁDOR & ZILÁHI-SEBESS 2016 alapján)

Figure 2. As a function of the permeability of a given space, the amount of recoverable heat calculated by Monte Carlo simulation [10000 realizations, according to different probability levels (P10, P50 and P90 values)]; (NÁDOR & ZILÁHI-SEBESS 2016)



3. ábra. Trapéz alakú fuzzy számok (a); háromszög alakú fuzzy számok (b); (vízszintes tengely a mért paraméter; függőleges tengely a tagságérték)
 Figure 3. Trapezoidal fuzzy numbers (a); triangular fuzzy numbers (b); (horizontal axis is the measured parameter; vertical axis membership value)

db) modell futtatását tenné szükségessé, ami jelen kapacitások mellett nem lehetséges. Ezért a paramétereiből fuzzy számokat alkottunk, és ezekkel futtattuk a modellt. Ugyanis bármely konkrét paraméterhez, pl. szivárgási tényező, definiálható egy tartomány melynek két szélső értéke még 0 tagságértékű (valószínűtlen esemény), míg a legvalószínűbb értéktartomány 1 tagságértékű, ezeket összekötve kapjuk az adott tulajdonságot leíró fuzzy számot (ZADEH 1965). Ezt a fuzzy számot derékszögű koordináta-rendszerben ábrázolva háromszög vagy trapéz alakú fuzzy számot kapunk, ahol a vízszintes tengely a mért paramétert, a függőleges tengely a valószínűséget jelenti. A 3. ábra (a) rész jelölésével az a–d tartományt tartónak, míg a b–c tartományt magnak nevezzük. Ha b és c értékek egybeesnek, háromszög alakú fuzzy számról beszélünk (3. ábra b része). A fuzzy számokkal való műveletekre is igaz a kiterjesztési elv, azaz ugyanazok a műveletek végezhetők velük, mint a valós számokkal (FANG & CHEN 1990, BÁRDOSY et al. 2000). Ha trapéz alakú és háromszög alakú fuzzy számok között végzünk aritmetikai műveletet, akkor az adott operátor a trapéz szám b és c értékéhez is a háromszög szám q értékét rendeli hozzá (3. ábra). Konstans számmal (crisp szám) való művelet esetén a fuzzy szám alkotóihoz ugyanaz a konstans szám rendelődik hozzá. A fuzzy szám visszaalakítható „crisp számmá”, ezt nevezzük defuzzifikálásnak. Ennek legáltalánosabb módja a fuzzy szám súlypontjának x koordinátáját megadni a defuzzifikált értéknek (REZESSY et al. 2005).

Termásvíztermelés különböző forгатókönyvek szerint

A Battonya–Pusztaföldvári szubregionális modellvizsgálatra (KUN et al. 2022) alapul véve mutatjuk be egy potenciális geotermikus hasznosítás (termelő-visszasajtoló kútpáron [doublet]) hidrodinamikai és hőtranszport modellezési vizsgálatát és a UNFC-2009 kód szerint számított kinyerhető energia mennyiségét.

A helyszín kiválasztása

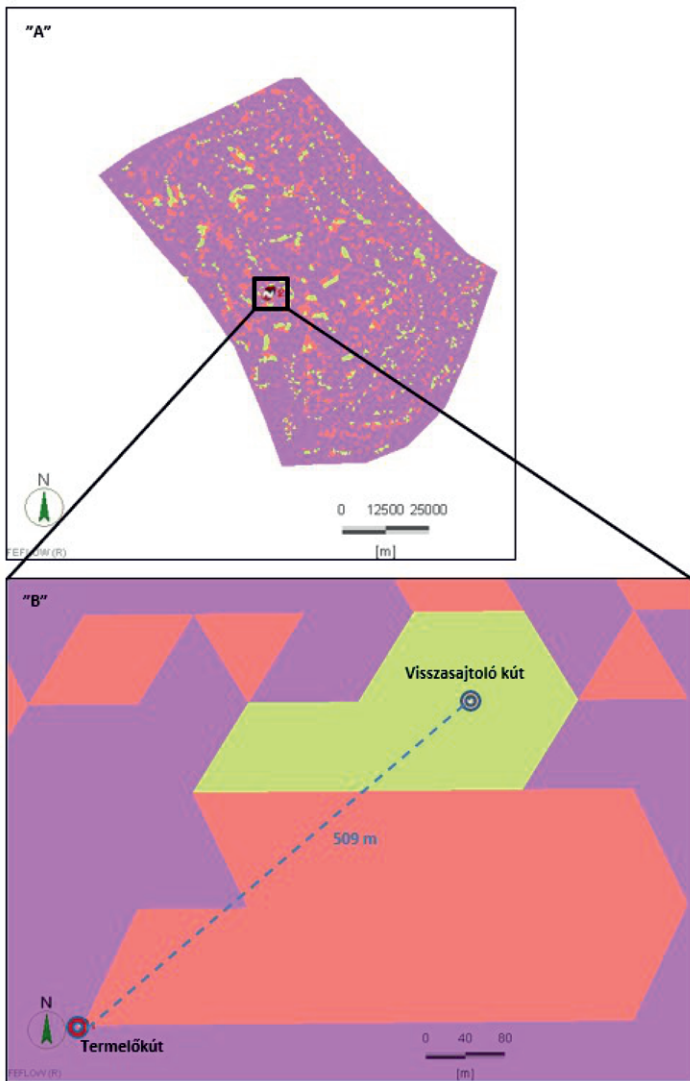
A helyszín kiválasztásának egyik szükséges feltétele volt, hogy a potenciális termelő kút talphőmérséklete meghaladjon a 150 °C-os értéket. A másik fontos feltétel, hogy a

hely alkalmas legyen egy hipotetikus EGS-erőmű létesítésére, vagyis a Battonya–Pusztaföldvári-hát feletti medenceüledékeket kizártuk. Ezek után az volt a kérdés, hogy a kristályos aljzatban vagy annak felső, repedésekkel átjárt, mállott zónájában helyezzük-e el a tervezett kútpárt. Ismereteink szerint az eddigi projekttervek a gránittest belsejét javasolták. Ismerve a mechanikus stimulációkban rejlő bizonytalanságokat (irányíthatóság, megfelelő méretű hőcserélő felület kialakítása), úgy döntöttünk, hogy a kristályos aljzat felső, a természetes folyamatok által „megviselt” zónáját választjuk, amely hidraulikai kapcsolatban lehet a felette települő báziskonglomerátummal. Ilyen térrész, a meglévő fúrások dokumentációi alapján, több is akadt a szubregionális modellterben. A kívánt mélységközött elért fúrások alapján Fábiánsebestyén, Medgyesbodzás, Békés és Pitvaros települések környezete tűnt potenciálisan megfelelőnek. De míg Fábiánsebestyén és Békés az alapmodell kiterjedésének szempontjából peremi helyzetű, Medgyesbodzás térségében pedig mezozoos karbonát alkotja az alaphegységet, így a választásunk Pitvaros térségére esett.

A modellezett szcenáriók meghatározása

A szimulált szcenáriók elsősorban szivárgási tényező variánsokon alapulnak. Az adott réteget, azaz az alaphegység fellazult zónáját egy tetszőleges szivárgási tényező eloszlású paramétermezővel jellemeztük, három fő kategória mentén. Az intakt, repedésmentes kifejlődést *mátrix*ként aposztrofáltuk, a repedezett tartományokat *zseb*nek neveztük és változatos elrendezésben alakítottuk ki különböző kapcsolódásokkal a térben. Az előbb ismertetett két övezet között egy *köztes zónát* is definiáltunk (4. ábra). A mátrix szivárgási tényezője változatlan maradt az összes szcenárióban; míg a zsebek és a köztes zónák minimum, medián és maximum értékeit kombináltuk az összes lehetséges esetben.

Egy rezervoár hőmennyiségének számítását célszerű valószínűség-elméleti alapon megközelíteni, tekintettel a bemeneti paraméterek, mint porozitás, szivárgási tényező, a kőzetmátrix, valamint a hőmérséklet (és hozzá kapcsolódó fajhő és sűrűség) értékek különböző mértékű bizonytalanságára. A Monte Carlo paraméterbecslés értéksokaságára mennyiségi okokból nem lehet modellfuttatásokat végezni, viszont a fuzzy aritmetika segítségével a különböző para-



4. ábra. A célréteg szivárgási tényező kategória tartománya: „A” a teljes modellrétegben, „B” kinagyítva a rezervoár léptékében, Pitvaros település környezete (lila: mátrix, piros: zseb, zöldessárga: köztes zóna)

Figure 4. Target layer hydraulic conductivity category range in the entire model layer and extended in the reservoir region of Pitvaros settlement (purple: matrix, red: pocket, lime green: intermediate zone)

méterekeket háromszög alakú fuzzy számokkal megadva azok kitüntetett értékeire futtatható modell. A szimuláció során a víz fajhőjét konstansnak tekintettük ($4200 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Ebben az esetben a végeredményül kapott fuzzy háromszög kezdő nulla tagsáértékéhez tartozó száma adja a magasan megbízható, egy tagsáértékhez tartozó száma a legjobb, míg a záró nulla tagsáértékéhez tartozó száma az alacsony megbízhatóságú becslést.

A geometriai kialakítás (rétegszám, vastagság) az egyértelmű összehasonlíthatóság kedvéért változatlan maradt a vizsgálat sorozat folyamán.

A mátrix porozitása 0,02, a zsebé 0,04, ennek megfelelően a köztes zónát 0,03 értékkel definiáltuk.

A kilenc darab szivárgási tényező variáns (*I. táblázat*) három termelési változatban futtattuk le (összesen 27 változat). Minden esetben 1 db termelő és 1 db visszasajtoló kút került kialakításra, melyek hozamai:

$$Q_1 = 2000 \text{ m}^3/\text{nap}; Q_2 = 3000 \text{ m}^3/\text{nap} \text{ és } Q_3 = 5000 \text{ m}^3/\text{nap}$$

A visszasajtolás minden esetben $50 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra lehűlt fluidummal valósult meg, tehát a termelt víz modellezett hőmérsékletéből $50 \text{ }^\circ\text{C}$ -ot levonva, majd ezt a ΔT értéket a tömegárammal és a víz fajhőjével szorozva kaptuk meg a hőhasznosítás volumenét.

A különböző forgatókönyveket bemutató *I. táblázat*ban látható két „kakukktójás” eset is: a 3. esetben a zsebnek kisebb a szivárgási tényezője, mint a köztes zónának, tehát itt egy olyan esetet tanulmányozhatunk, amikor a fűrés nem találja el a legjobb szivárgási tényezőjű összletet (vagy felfoghatjuk úgy is, hogy az esetleges mechanikai stimuláció nem volt sikeres). Míg a 6-os számú esetben a zseb és a köztes zóna értéke megegyező, tehát a jó áteresztőképességű tartomány mérete nagyobb.

A termelt és a visszasajtoló víz mennyisége mind-egyik modellezett esetben azonos volt. A modellt tranziens módban futtattuk úgy, hogy éves szinten

I. táblázat. Modellvariánsok szivárgási tényezői ($K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$)

Table I. Hydraulic conductivity of model scenarios ($K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$)

Sorszám	Alapmodell elnevezése	Szivárgási tényező értékek ($K_x = K_y = K_z$)		
		mátrix	zseb (jobb rezervoár)	köztes zóna (gyengébb rezervoár)
1.	1_am_max_zseb_max_koztes.fem	2,0E-08 m/s	P10 (max) = 3,0E-04 m/s	P10 (max) = 7,92E-06 m/s
2.	2_am_med_zseb_max_koztes.fem	2,0E-08 m/s	P50 (med) = 7,9e-05 m/s	P10 (max) = 7,92E-06 m/s
3.	3_am_min_zseb_max_koztes.fem	2,0E-08 m/s	P90 (min) = 3,0E-06 m/s	P10 (max) = 7,92E-06 m/s
4.	4_am_max_zseb_med_koztes.fem	2,0E-08 m/s	P10 (max) = 3,0E-04 m/s	P50 (med) = 3,0E-06 m/s
5.	5_am_med_zseb_med_koztes.fem	2,0E-08 m/s	P50 (med) = 7,9E-05 m/s	P50 (med) = 3,0E-06 m/s
6.	6_am_min_zseb_med_koztes.fem	2,0E-08 m/s	P90 (min) = 3,0E-06 m/s	P50 (med) = 3,0E-06 m/s
7.	7_am_max_zseb_min_koztes.fem	2,0E-08 m/s	P10 (max) = 3,0E-04 m/s	P90 (min) = 8,0E-07 m/s
8.	8_am_med_zseb_min_koztes.fem	2,0E-08 m/s	P50 (med) = 7,9E-05 m/s	P90 (min) = 8,0E-07 m/s
9.	9_am_min_zseb_min_koztes.fem	2,0E-08 m/s	P90 (min) = 3,0E-06 m/s	P90 (min) = 8,0E-07 m/s

300 nap termelést 65 nap leállás követte végig a teljes 50 éves üzemelési időtartam alatt. Ez a termelési metodika 82%-os éves kihasználtságot jelent, ami megfelel a jelenleg alkalmazott üzemelési technológiának (REN21 2019). Természetesen sokféle termelési menetrend létezik a gyakorlatban, ezekben tervezett és eseti karbantartási időszakok rendszeresen előfordulnak.

A futtatás hosszának meghatározásakor a jelenlegi szabályozást vettük alapul, miszerint a koncesszió időtartamán belül a tervezett ásványi nyersanyag, illetve a geotermikus energia esetében a kutatási időszak 4 évnél hosszabb nem lehet. Ez a geotermikus energia és nem hagyományos eredetű szénhidrogén esetében két alkalommal, az eredeti kutatási időszak felével meghosszabbítható. Az elnyert szénhidrogén koncesszió 20 évre, a geotermikus koncesszió 35 évre szól, ez az időtartam újabb pályázat kiírása nélkül egy alkalommal, a koncessziós szerződés eredeti időtartamának felével meghosszabbítható. Tehát egy pályázati eljárásban a maximális üzemeltetési időtartam hozzávetőleg 50 év geotermikus hasznosítás esetén, de – ahogy később látni fogjuk – a futtatások során pl. a termelőkutak hőmérséklet-idő diagramja már korábbi időpontban és egyértelműen mutatja a továbbtermelés esetén várható hűlési trendet, azaz a gyengülő üzemelési kilátásokat.

A modellezett scenáriók eredményei

Ahogy az előző fejezetben ismertettük: összesen 27 db modellvariáns futtatása történt meg. Ezek eredményeinek kiértékelése egyrészt a visszasajtoló kút nyomásemelkedésének, másrészt a termelőkút depressziójának és hűlésének a mértékén alapult. A kiinduláskor üzemelési kritériumként és termikus végállapotként a maximum 200 méteres (20 bar) vízsztinváltozást (mind a termelő, mind a visszasajtoló kútban), illetve a termelőkútban a még ideálisnak tekinthető 25 °C hőmérséklet-csökkenést határoztuk meg. Ennél nagyobb mértékű nyomásváltozás már gazdaságtalanná tenné a geotermikus projektet, míg a hőmérséklet még elfogadható csökkenése a tömegfluxus függvénye. Azaz a 25 °C hőmérséklet-csökkenést jelzésértékűnek tartjuk, de a projekt még ennél nagyobb hőmérsékletcsökkenés esetén is termelhet profitot.

A II. táblázat alapján látható, hogy a futtatott verziók közül a termelőkút szempontjából 9 db, a visszasajtoló kút szempontjából pedig 13 db verzió nem teljesítette az előzetes hidrodinamikai feltételünket – figyelembe véve az átfedéseket –, ez összesítve 17 verzió.

Elemelve a számításokat, a szivárgási tényezők esetében, ha legalább a zseb vagy a köztes réteg minimum érték-

II. táblázat. A modellvariánsok hidrodinamikai eredményei /A piros háttérszín a termelőkút, a kék háttérszín a visszasajtoló kút 20 bárnál nagyobb nyomásváltozását szemlélteti, ezek a hidraulikus kritériumnak nem megfelelő modellváltozatok/

Table II. The hydrodynamic results of the model variants /the coloured background is illustrating the value of pressure change above 20 bar. red: production well, blue: injection well/

Sorszám	Szivárgási tényező variánsok zseb_köztes zóna	Változatok	Termelőkút maximális depressziója [m]	Visszasajtoló kút maximális vízsztinvnövekedése
1	max_max	sc1_2000	-6,9	37,7
2	max_max	sc1_3000	-10,6	55,2
3	max_max	sc1_5000	-17,4	90,4
4	med_max	sc2_2000	-20,1	38,3
5	med_max	sc2_3000	-30,2	56,2
6	med_max	sc2_5000	-50,3	92,2
7	min_max	sc3_2000	-460,3	51,1
8	min_max	sc3_3000	-690,8	69,4
9	min_max	sc3_5000	-1152,3	106,0
10	max_med	sc4_2000	-10,6	94,5
11	max_med	sc4_3000	-15,2	140,7
12	max_med	sc4_5000	-24,7	233,2
13	med_med	sc5_2000	-23,3	95,4
14	med_med	sc5_3000	-34,7	141,8
15	med_med	sc5_5000	-57,9	234,8
16	min_med	sc6_2000	-463,7	113,6
17	min_med	sc6_3000	-696,2	168,1
18	min_med	sc6_5000	-1161,3	277,1
19	max_min	sc7_2000	-22,7	340,7
20	max_min	sc7_3000	-32,2	509,8
21	max_min	sc7_5000	-53,8	848,5
22	med_min	sc8_2000	-35,9	341,4
23	med_min	sc8_3000	-52,6	510,6
24	med_min	sc8_5000	-87,1	849,6
25	min_min	sc9_2000	-476,0	360,4
26	min_min	sc9_3000	-714,5	538,3
27	min_min	sc9_5000	-1191,3	894,2

kel szerepel, akkor a rendszer üzemeltetése vízszintváltozás szempontjából az optimális értéken kívül esik. A visszasajtolás szempontjából a nagy hozam (legalább 5000 m³) is kockázatos lehet, ha a köztes zóna közepes vagy annál kisebb szivárgási tényezővel jellemezhető.

A vízszintváltozást, jelen esetben a termelőkút 300 nap termelését és az azt követő 65 nap leállását jelentő időbeli ciklus hidraulikai hatását egy modellbeli észlelőpontban (200 m-re a termelőkúttól) a 5. ábra szemlélteti. Ha a burkolóját nézzük, az első kb. 800 napban látunk egy enyhe felfutást a visszasajtolás hatásaként, összességében egy enyhén csökkenő vízszinttartományt kapunk stagnáló trenddel a végén.

A termelőkútban modellezett hőmérsékleti eredmények szerint az előzetes maximum 25 °C-os hőmérsékletcsökkenési kritérium csak a 35 éves időintervallumban teljesült, de ott is csak 2000 m³/nap hozam esetén (III. táblázat). Az 50 éves ciklus esetében a hőmérsékletváltozás átlaga 64 °C, a legkisebb (2000 m³/nap) hozamráták esetén 55 °C az átlag, a minimum érték is 49 °C, ami egy műszaki tervezésnél már nehezen fogadható el. A 35 éves üzemelés esetén lényegesen kedvezőbb a helyzet, bár az átlag meghaladja az 50 °C-t, a minimum hozamvariációk átlaga 22 °C, legkisebb hőmérséklet-különbség 15 °C.

A 6. ábra a termelőkútban számított hőmérsékletváltozás időbeli lefutását ábrázolja, az 1. scenáriónak megfelelő hidrodinamikai feltételek mindhárom hozamváltozata esetén.

A kisebb termelési ráták esetén a „hődepressziós front” helyett egy monoton függvény szerinti átmenet jön csak létre; a zseb egyenletesen hűl az egyensúlyi hőmérsékletig.

Elgondolkodtató jelenség, hogy az 5000 m³/nap terme-

lések esetében 32 év (11 680 nap) után a lehűlt kútkörnyezet újból melegedni kezd. Nézetünk szerint az első időszakokban túlhűlés történik, mert a rezervoárt megtestesítő zseb túl gyorsan lehűl, így az hidegebbé válik, mint a végső statikus hőmérséklet lenne. Az utánpótlás nagy része a visszasajtolásból érkezik, azaz a nagyobb szivárgási tényezőjű és hidegebb környezetből. Az időtengelyen leghidegebb minimumpont után (kb. 32 év) az utánpótlásba bekapcsolódik a termelési depressziós front által még nem érintett melegebb környezet.

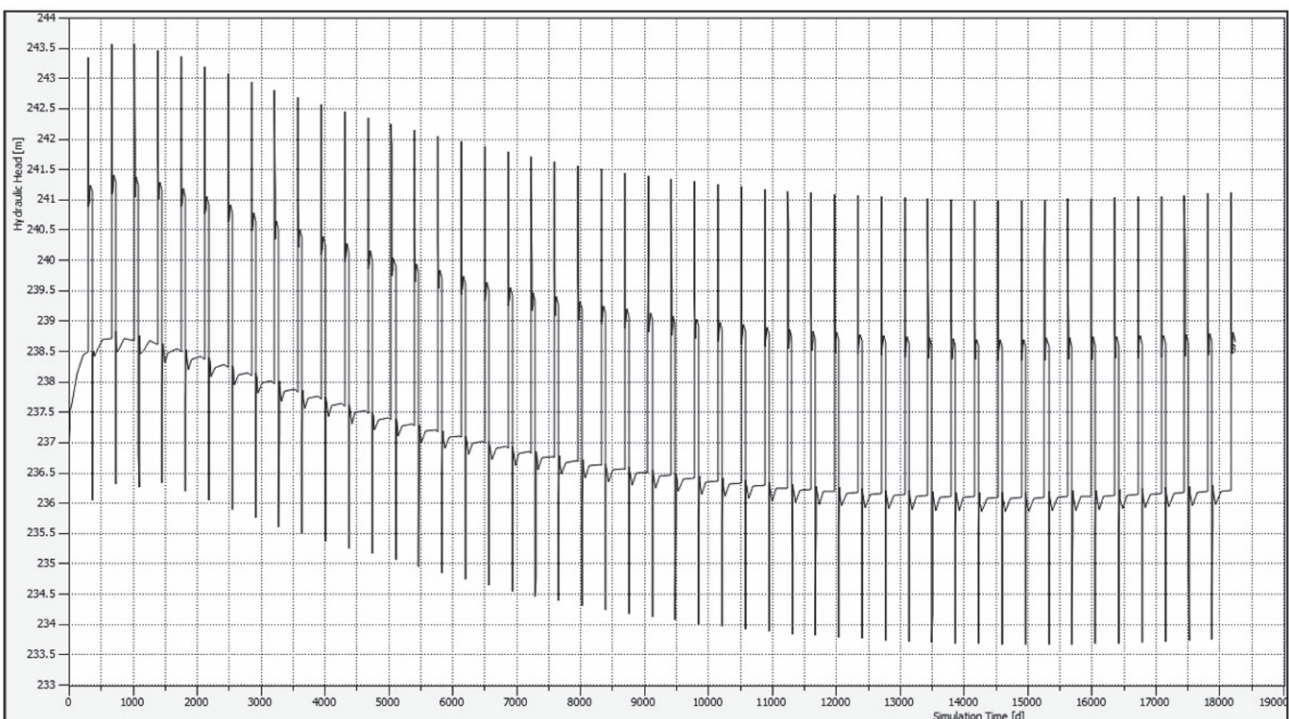
Feltételezhető, hogy ha időben tovább termeltetnénk, akkor egy maximum után újra hűlési trend következne be, majd egy kisebb mértékű újabb melegedést követné megint egy hűlési szakasz. Alakilag megközelítőleg egy lecsengő amplitúdójú $\sin x/x$ (sinus cardinalis) függvény szerinti változás várható, és idővel valószínűleg a periódusok hossza is növekszik.

A tároló időbeli hőmérsékleti regenerálódását szemlélteti a 7. ábra.

Mint az látható, a rezervoár visszamelegedése csak kb. 50%-ban történik meg, erre viszont nem kalibráltuk és nem is kalibrálhatjuk a modellt gyakorlati tapasztalatok híján.

Az utánpótlás általunk feltételezett természete az áramvonalképen is követhető (8. ábra, az időbeliséget a színképezés reprezentálja, 2000 naponként változik a színkategória). Míg a két kút között az áramvonalak futási ideje 2000 napon belül marad, a háttérből lényegesen hosszabb idő alatt jut a termelőkútba.

A kirajzolt áramvonalképet 100 csomópontból indítottuk a termelőkút környezetéből viszonylag nagy rádiusszal



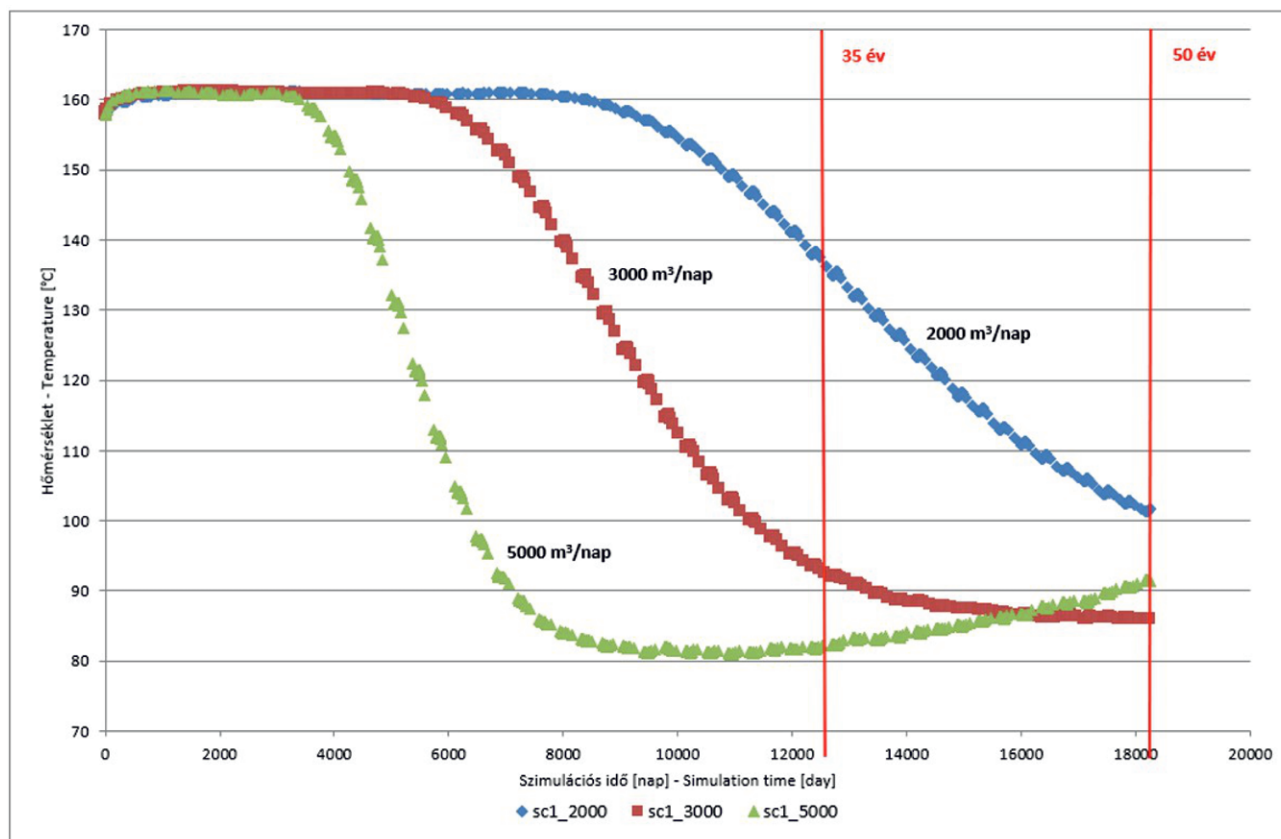
5. ábra. Modellezett hidraulikus emelkedési magasság [mBf] a termelőkúttól 200 m-re található csomópontban (1. forgatókönyv; x-tengely szimulációs idő [nap], y-tengely modellezett vízszint [mBf])

Figure 5. Hydraulic head [masl] at the mesh nodes of 200 meters from the production well (1. scenarion; x-axis simulation time [day], y-axis: modeled water-level [masl])

III. táblázat. A modellverziók hőtranszport eredményei a szcenárióként a termelőkutak szempontjából (Piros színnel a hőmérsékleti kritériumnak nem megfelelő verziók vannak feltüntetve $\Delta T > 25^\circ\text{C}$)

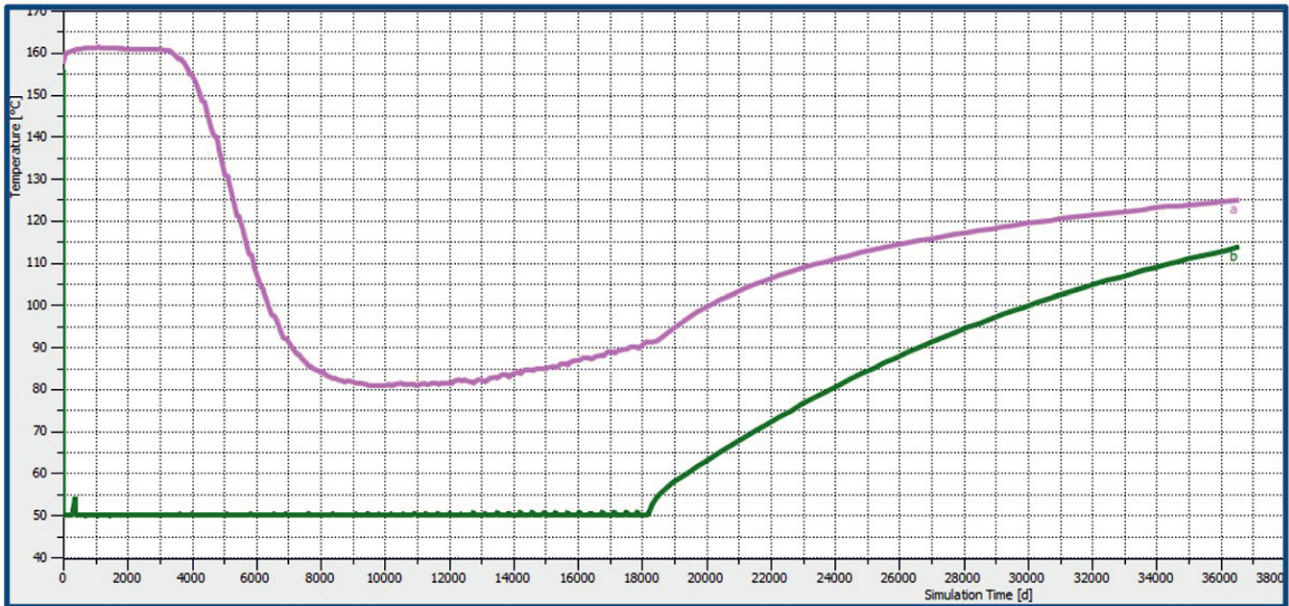
Table III. Heat transport results of the model versions per scenario from the point of view of the production wells (the coloured numbers are illustrating the value of temperature above $\Delta t > 25^\circ\text{C}$)

A termelési variánsok		Termelési variáns [m ³ /nap]	Kezdeti T [°C]	T _{15 év műha} [°C]	ΔT_{0_35} év [°C]	T _{50 év műha} [°C]	ΔT_{0_50} év [°C]
1. szcenárió	1.	2000	158	135	23	102	56
	2.	3000	158	92	66	86	72
	3.	5000	158	82	76	91	67
2. szcenárió	4.	2000	158	136	22	102	56
	5.	3000	158	92	65	86	72
	6.	5000	158	82	75	91	66
3. szcenárió	7.	2000	154	139	15	105	48
	8.	3000	154	95	58	84	70
	9.	5000	154	80	74	88	65
4. szcenárió	10.	2000	158	136	22	102	56
	11.	3000	158	111	47	89	69
	12.	5000	158	82	76	91	67
5. szcenárió	13.	2000	158	136	21	102	55
	14.	3000	158	93	65	86	72
	15.	5000	158	82	75	91	67
6. szcenárió	16.	2000	154	139	15	105	49
	17.	3000	154	95	59	84	70
	18.	5000	154	78	76	88	66
7. szcenárió	19.	2000	158	138	20	105	54
	20.	3000	158	95	63	87	71
	21.	5000	158	82	76	90	68
8. szcenárió	22.	2000	158	138	19	104	53
	23.	3000	158	94	64	87	71
	24.	5000	158	82	76	89	68
9. szcenárió	25.	2000	154	139	15	105	49
	26.	3000	154	95	59	84	70
	27.	5000	154	78	76	85	69

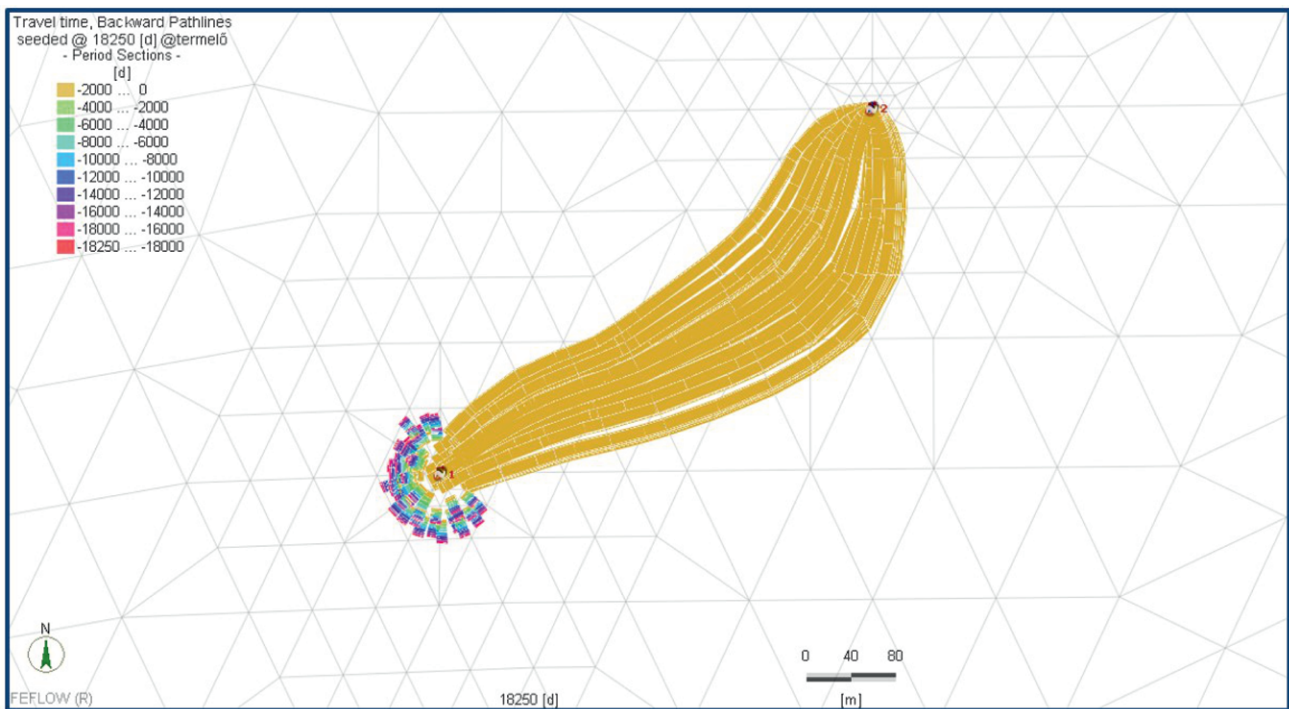


6. ábra. Az 1. szcenárió hőmérséklet-üzemelési idő diagramja mindhárom hozamvariáns feltüntetésével

Figure 6. Temperature simulation time diagram in scenario 1 with all three production variants



7. ábra. Az 1. szcenárió hőmérséklet-üzemelési idő diagramja (50 év szakaszos termelés és az azt követő 50 év felhagyás) a: termelőkút, b: visszasajtoló kút
 Figure 7. Temperature-time diagram in scenario 1 (50 years of intermittent production followed by 50 years of abandonment) a: production well, b: injection well



8. ábra. Az 1. szcenárió 5000 m³/nap hozamrátaival kialakított modellváltozat visszafelé indított áramvonalképe [nap], (1: termelő, 2: visszasajtoló kút)
 Figure 8. Backward pathline of the production rate 5000 m³/day in scenario 1 [d]

(45 m). Az okkersárga szín a 2000 napnál kisebb idejű pályákat mutatja be, és látható, hogy a rosszabb szivárgási tényezőjű háttérterület felől is érkezik utánpótlás jelentős időbeni késleltetéssel.

A vizsgálat sorozat eredeti célja a megvalósítható hőtermelés szimulációja, ezért kihasználva a FEFLOW® szoftver numerikus kiértékelési funkcióját kiszámítottuk a termelő kút által kitermelt hőmennyiséget 35 és 50 évre (IV. táblázat és 9. ábra).

Ahogy korábban jeleztük, szimulációinkat teljes körű visszasajtolással futtattuk, 50 °C-on. A kivett hőmennyiség meghatározása során nem vettük figyelembe a feláramló fluidum kútban történő, hozamfüggő lehülését, ami akár 10–15 °C-ot is elérhet a talpi hőmérsékletéhez képest! Kiszámoltuk azt is, hogy 35 év alatt mekkora részét vettük ki az 50 év alatt kivehető hőmennyiségnek. Ha ez az érték 0,7-nél nagyobb, akkor a rezervoár elkezdett lehűlni, azaz bekövetkezett a termális áttörés. Azt is meghatározhatjuk, hogyan

IV. táblázat. Szenáriónként számított hőmennyiségértékek 35 és 50 évre [Joule]

Table IV. Temperature values per scenario for 35 and 50 years [Joule]

	Szenáriók	Q_Termelő 35 év [J]	Q_Termelő 50 év [J]	Hőmennyiség arány [35 év/50 év]
1.	sc1_2000	5,9796E+15	8,3608E+15	0,72
2.	sc1_3000	7,2291E+15	8,5174E+15	0,85
3.	sc1_5000	1,1260E+16	1,2653E+16	0,89
4.	sc2_2000	5,7275E+15	7,2223E+15	0,79
5.	sc2_3000	7,2317E+15	8,5180E+15	0,85
6.	sc2_5000	8,7428E+15	1,0845E+16	0,81
7.	sc3_2000	5,5749E+15	7,1620E+15	0,78
8.	sc3_3000	7,2222E+15	8,4715E+15	0,85
9.	sc3_5000	8,6479E+15	1,0593E+16	0,82
10.	sc4_2000	5,7502E+15	7,2507E+15	0,79
11.	sc4_3000	7,2638E+15	8,5671E+15	0,85
12.	sc4_5000	8,7773E+15	1,0875E+16	0,81
13.	sc5_2000	5,7383E+15	7,2421E+15	0,79
14.	sc5_3000	7,2544E+15	8,5517E+15	0,85
15.	sc5_5000	8,7683E+15	1,0871E+16	0,81
16.	sc6_2000	5,5774E+15	7,1579E+15	0,78
17.	sc6_3000	7,2170E+15	8,4603E+15	0,85
18.	sc6_5000	8,5987E+15	1,0484E+16	0,82
19.	sc7_2000	5,7697E+15	7,3279E+15	0,79
20.	sc7_3000	7,3541E+15	8,6944E+15	0,85
21.	sc7_5000	8,8999E+15	1,0960E+16	0,81
22.	sc8_2000	5,7591E+15	7,3162E+15	0,79
23.	sc8_3000	7,3396E+15	8,6719E+15	0,85
24.	sc8_5000	8,8966E+15	1,0961E+16	0,81
25.	sc9_2000	5,5805E+15	7,1618E+15	0,78
26.	sc9_3000	7,2079E+15	8,4562E+15	0,85
27.	sc9_5000	8,5905E+15	1,0388E+16	0,83

változik egy ilyen erőmű teljesítménye. 5000 m³/nap (57 l/s) hozammal számolva, a fluidumot 50 °C-ig hasznosítva.

Ezekkel a feltételekkel induláskor 26 MW_{th} hőteljesítménnyel számolhatunk, amit elektromos árammá alakítva – 20 %-os hatásfokot feltételezve – 5,2 MW_e elektromos teljesítményt kapunk. (Megjegyzendő, hogy a hőmérséklet időbeli csökkenése következtében a hatásfok csökken, tehát a 20%-os hatásfok a fluidumból termelhető elektromos áram felső becslését adja). Ez az érték 35 év alatt a rezervoár hőmérsékletének csökkenése miatt, 5000 m³-en rögzített hozamánál (IV. táblázat: sc1_5000 Szenárió), már csak 2,0 MW_e átlagos teljesítménynek, míg 50 évre számolva, a további hűlés következtében alig 1,6 MW_e átlagos teljesítménynek felel meg. Ez azt is jelenti, hogy az utolsó 15 évben az erőmű elektromos teljesítménye 0,6 MW_e körüli értékre csökken, ami a kezdeti érték tizedét is alig éri el.

A kivehető hőmennyiség fuzzy becslése

Jelen számításokban a mátrix és a köztes zóna szivárgási tényezőjét, valamint a kút vízhozamát változtattuk, sem a vizsgált térfogatot, sem annak hatékony porozitását nem módosítottuk. Így 9 különböző szivárgási tényező kombinációt kaptunk, kombinációként 3–3 hozamaddal, azaz 27 modellt futtatunk és határoztuk meg a kivehető hőmennyiségeket.

Ha az adott változatokat fuzzy háromszögben akarjuk megadni, akkor a két szélsőérték (0 tagságértékű pont) a legnagyobb kitermelhető hőmennyiség és a legkisebb kitermelhető hőmennyiséghez tartozó érték. A legnagyobb értéket akkor kapjuk, ha a szivárgási tényező értéke a legnagyobbak és a hozam is a legnagyobb, ez az első forgatókönyv 5000 m³/napos hozamához tartozik (IV. táblázat: 3. sor). A legkisebb értékkel már bajban vagyunk, mert a legrosszabb forgatókönyv mellett legkisebbnek vett 2000 m³/napos hozam esetén a még elfogadhatónak választott 200 m-es depresszió több mint duplája adódik (II. táblázat: 25. sor). Ezért egy új futtatást végeztünk, hogy megtaláljuk azt a maximális hozamot, ami mellett a depresszió nem haladja meg a 200 m-t. A kívánt hozamot próbálgatással (*trial and error*) határoztuk meg, ami 850 m³/napnak adódott. Az ezekkel a paraméterekkel futtatott modellben a 35 év alatt kivehető hőmennyiségre 2,40E+15 J-t, míg 50 év esetén 3,43E+15 J értéket kaptunk.

A legvalószínűbb érték (1 tagságértékű pont) az 5. forgatókönyv 3000 m³/nap-os hozamához tartozik (IV. táblázat: 14. sor). Ez alapján megrajzolhatjuk a 35 év, illetve 50 év alatt kivehető hőmennyiség fuzzy háromszögeit. Ha egy konkrét értéket (crisp value) akarunk a kivehető hőmennyiségre meghatározni (defuzzification), akkor azt a háromszög súlypontjának x koordinátájával adhatjuk meg (10. ábra).

Mindezek alapján a fuzzy háromszög csúcsait tekintjük a kitermelhető hőmennyiség P90, P50, P10 valószínűségű szintű értékének, melyek a 35 évre elvégzett modellből számolva az alábbiak:

P90: 2,40E+15
P50: 7,25E+15
P10: 1,126E+16

A kivehető hőmennyiség statikus becslése

Egyik fő célkitűzésünk volt, hogy bizonyítsuk a dinamikus készletbecslés előnyeit a statikus eljárással szemben, ezért meghatároztuk a kivehető energia mennyiségét a UNFC-2009 módszerhez készült segédanyagban lefektetett statikus készletszámítási módszerrel. Az alábbi módszer a kutatás első szakaszában alkalmazható, általában annak eldöntése érdekében, hogy érdemes-e elkötelezni magunkat a tervezett projekt megvalósítására. A kivehető hőmennyiség (Q) a kitermelési tényezővel (recovery factor=R) veszők figyelembe az alábbi összefüggés szerint, (utóbbi értéket a UNFC-2009 kód számításához kiadott példa dokumentumok maximális értékével vettük számításba [UNECE 2016b]):

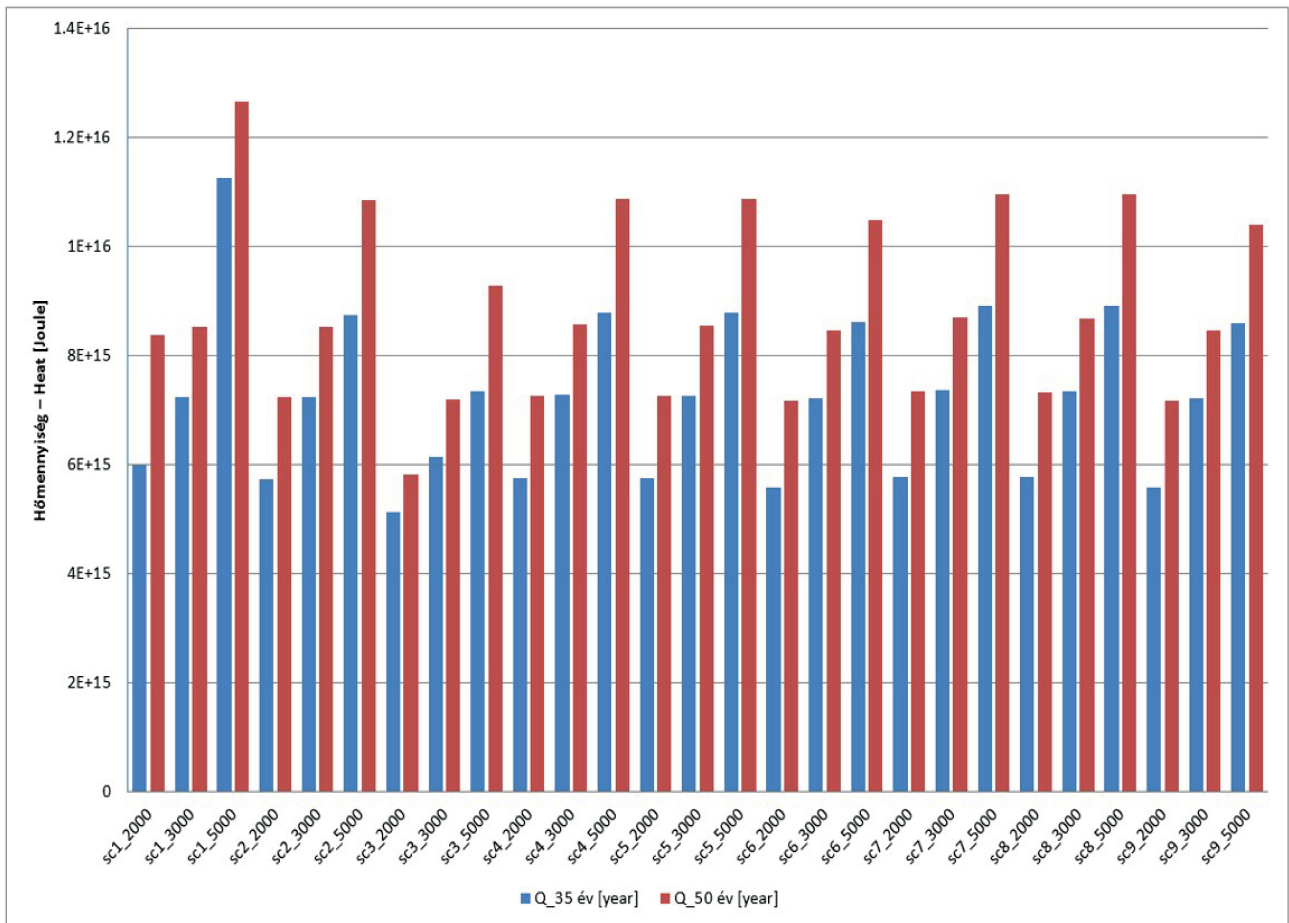
$$Q=R \int [(1-\varphi) \rho_c c_r \Delta T + \varphi \rho_w c_w \Delta T] dV$$

dV: terület x vastagság: (158391,65 m² x 200 m) (rezervoár (zseb + köztes zóna) térfogata)

φ : porozitás: 0,04

ρ : sűrűség, w(víz): 1000 kg/m³; r (kőzet): 2700 kg/m³

c: fajhő, w(víz): 4,2E+3 kJ/m³×K, r (kőzet): 0,8E+3 kJ/m³×K



9. ábra. Az egyes modellverziókban kétkutas rendszerrel kinyerhető hőmennyiség [Joule] 35 év és 50 után

Figure 9. The quantity of heat amount [Joule] in each model scenario available from the two-well system after 35 years and 50 years

$\Delta T: \sim 160\text{ }^{\circ}\text{C} - 50\text{ }^{\circ}\text{C} = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$

$R = 0,2$ (kitermelési tényező / recovery factor)

A fenti adatokat alapul véve Monte Carlo-szimulációt futtattunk az alábbi paraméterekkel:

Terület: eredeti terület (m²): 158 391,65 + -5% (egyenletes eloszlás),

Vastagság (m): 100–300 (egyenletes eloszlás),

Hézagterefogat (%): 0,01–0,07 (egyenletes eloszlás),

Delta T (°C): 100–120 (egyenletes eloszlás),

Kitermelési tényező (Recovery factor): 0,1–0,3 (egyenletes eloszlás)

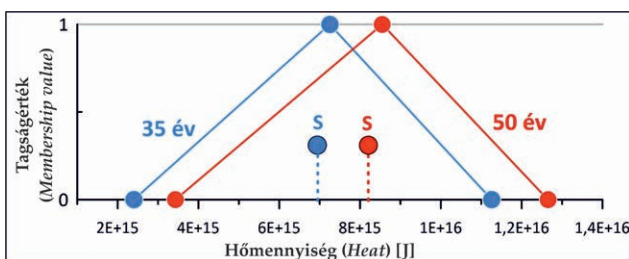
A számolás alapján a teljes kőzettérfogatból kitermelhető hőmennyiség (11. ábra):

P90: 7,82E+14

P50: 1,45E+15

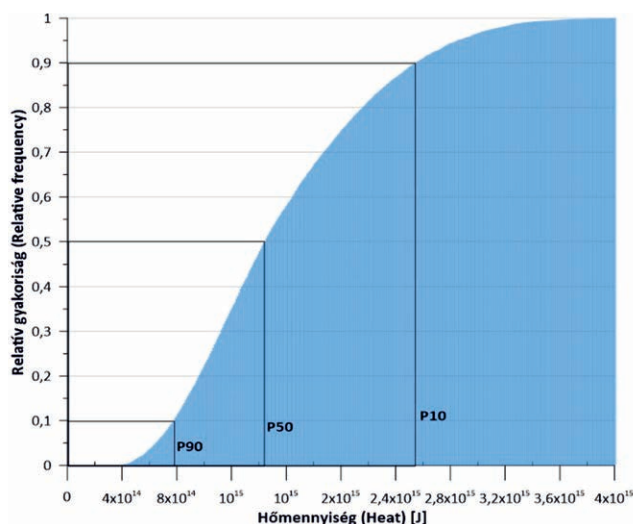
P10: 2,55E+15

Ez a teljes kőzettérfogatból kitermelhető hőmennyiség, és mint korábban láthattuk a modellezés során, ennél hozzávetőleg fél nagyságrenddel nagyobb értékek jöttek ki. Ennek magyarázata, 2000 m³/nap termelésnél kb. 80 km² terület hőáramával egyenlő hőmennyiséget veszünk ki, azaz a zseb területén bejövőnek majdnem az 500-szorosát, ezért a hőáram első közelítésben elhanyagolható, lényegében a tárolt hőt aknázzuk ki. Statikus számítás szerint a 158 391,65 m² × 200 m térfogat teljes hőmennyisége 0,2 kitermelési hatásfok esetén 22 év alatt 50 °C-ra kellene hűlnie, ha nem lenne a térfogaton kívülről utánpótlás. De mivel van kívülről is vízutánpótlódás, ez a vízmennyiség viszont a mélységnek megfelelő hőmérsékletű, ami jelentősen lassítja a a rezervoár lehűlését, valamint lényegesen kisebb mértékben a konduktív hővezetés is szerepet játszik. A vizsgált térfogaton kívüli utánpótlást igazolja, igaz alárendelt mértékben, az 1. szcenárió áramvonalképe is (8. ábra).



10. ábra. A 35 év, illetve 50 év alatt kivehető hőmennyiség fuzzy háromszögei, a defuzzifikált értékek (S) feltüntetésével

Figure 10. Fuzzy triangles of the amount of heat that can be produced in 35 years and 50 years, respectively with crisp values (S)



11. ábra. A teljes köztérfogatból kitermelhető hőmennyiség Monte Carlo szimulációjának diagramja

Figure 11. Diagram of a Monte Carlo simulation of the heat amount extracted from the total volume

UNFC-2009 kód szerinti készletszámítás

A módszertani fejezetben leírtak alapján a UNFC-2009 kód definíciója szerint egy adott geotermikus projekt háromjegyű kóddal jellemezhető (E, F, G kategóriák).

Olyan projektek esetén, melyek előkészítési fázisban vannak, és az adott rezervoárban még egyetlen projekt sem valósult meg, csak E3 kategóriájú lehet. Mivel a Battonya–Pusztaföldvári-hát térségében a geotermikus energiatermelés gazdasági életképessége még nem állapítható meg, bár a geotermikus energiatermelésre már készült tanulmány, az elégtelen információk miatt az E3.2 kategóriába sorolandó.

A vizsgált térségben a kitermelés megvalósíthatósága a korlátozott műszaki adatok miatt nem értékelhető, mivel az adott célképződményt még nem próbálták feltárni, ezért az F tengelyen a 3. kategóriába tartozik. A kutatási területen regionális geológiai vizsgálatok kedvező geotermikus adottságokat mutatnak, de nincs konkrét helyre vonatkozó vizsgálat, így a végső besorolás az F3.3 kategóriát adja.

A G tengely meghatározása során figyelembe kell venni, hogy csak néhány fúrás érte el a gránitos aljzatot, és azok is csak néhány 10 m-es vastagságban (pl. Tótkomlós-I fúrás), de termelés azokból sem történt. A projekt helyszínén a célképződmény pontos mélysége nem ismert, tehát elsősorban közvetett bizonyítékon alapul a kitermelhető geotermikus energia mennyiségének meghatározása, így a számított készletek csak G4 kategóriájúak lehetnek.

A továbbiakban a G4.1, G4.2, G4.3 szerinti hőmennyiségeket a 6.3 fejezetben megadott fuzzy háromszögszám adatai alapján adjuk meg. Mivel az 50 éves üzemidő alatt a modellszámítások a tárolótér jelentős lehűlését valószínűsítik, így a 35 év üzemidőre számított értékeket tartjuk mérvadónak, melyek a következők:

$$G4.1=2,4E+15 \text{ J}$$

$$G4.2=4,85E+15 \text{ J}$$

$$G4.3=4,01 E+15 \text{ J}$$

Mind ezek alapján a vizsgált projekt UNFC-2009 osztályozás szerinti besorolása: 3.2, 3.3, 4, ami a kutatási (re-ménybeli) projekt kategóriát jelenti.

A modellvizsgálat-sorozat eredményei, konklúziók

A hozamvariációkat hőmérséklet-diagramokon bemutattva látható (9. ábra), – és ez ennek a vizsgálat-sorozatnak a fő tanulsága – hogy a vizsgált aljzati kiemelkedés még kedvező és kvázi optimális feltételek mellett is csak korlátozott időtartományban (ideális konfigurációban kb. 30–35 év) alkalmas geotermikus hasznosításra. Bár a 35 év időtartam az 50 évnek 70%-a, mégis az esetek döntő többségében 80% fölé emelkedik a 35 év alatt kitermelhető hőmennyiségek aránya az 50 év alatt kitermelhető hőmennyiségekhez képest (IV. táblázat). Tehát kijelenthető, hogy az ilyen típusú geotermikus rendszerek optimális üzemelési ideje nem éri el az 50 évet.

Mivel a battonyai gránitból sem magvizsgálat, sem szivattyútest nem állt rendelkezésre, a képződmény repedés-rendszerének értékelésénél legfontosabb hazai analógiaként a Mórággyi-rög vizsgálatát vettük alapul, ahol a Bábaapáti kutatás keretében a legszélesebb méretskálán történtek vizsgálatok (ZILÁHI-SEBESS et al. 2007). A mórággyi gránit esetében a mechanikai paraméterek a repedéssűrűséggel korrelálnak, azonban ez nem feltétlenül jelent nagyobb permeabilitást is. Bábaapáti kőzetminták és karotázsmérések összevetése alapján megállapítást nyert, hogy a kőzetek mechanikai jellemzői in situ állapotban jóval szilárdabbnak mutatkoznak, mint a magméréseknél. Ennek legfőbb oka, hogy azok a repedések, amelyek magon áteresztőképesség bizonyultak, in situ körülmények közt nagyobb nyomáson összezáródnak. Ebből következik, hogy mindazok a paraméterek, amelyek mechanikai bontottsághoz kapcsolódnak, hasonlóan viselkednek. A nagyobb nyomás jobban összezáródó repedéseket és ezzel nagyobb tortuozitást és emiatt kisebb permeabilitást és emiatt rosszabb konvektív hővezető képességet jelent. Ezt semmiképpen nem ellensúlyozza a konduktív hővezetőképeség rendkívül kismértékű javulása. A mállási zóna alatti, ép gránit bár törésszónákkal tagolt, hidrogeológiai szempontból ezeknek a zónáknak a túlnyomó része mégis impermeábilisnak bizonyult. A törésszónák általában elagyagosodottak, a kevés számú vizet adó repedés a törésszónák szélé felé, a szinte teljesen ép kőzetben található.

Bábaapáti analógia alapján a mállási zónán túli alaphegységi kőzet repedéseinek nagy része zárt, impermeábilis. A Battonya–Pusztaföldvári-hát granitoid kőzetei 1000 m-nél nagyobb mélységben jóval nagyobb nyomásnak vannak kitéve, ezért a mikrorepedéseknek még inkább zártabbnak kell lenniük, mint a Mórággyi Gránit. Az alaphegységi kőzetből való hőtermelés sikeressége attól függ, mekkora felületen történik a hőcsere, és fontos, hogy mekkora az a térfogat, amelyet az összefüggő repedések feltárnak.

A lefuttatott modellverziók alapján megállapíthatjuk, ha a termelt zóna szivárgási tényezője nem éri el legalább az E-

05 (m/s) nagyságrendet, akkor a minimum 2000 m³/napos (23 l/s) termelés mellett is irreálisan magas depresszióértékeket kapunk (*I. és II. táblázat*), azaz a kútpár üzemeltetése nem fenntartható. Jelen tanulmányban egy hozzávetőleg 400×400×200 m-es repedezett térfogattal számoltunk, azaz 0,032 km³-rel, (ami megfelel 1000×1000×32 m kiterjedésű rezervoárnak).

Ezt gazdasági alapon is lehet értelmezni, vegyük a legjobb esetet a legnagyobb kivethető hőmennyiség szempontjából (1. scenárió, 5000 m³/nap hozam; *IV. táblázat* 3. sor). Számoljuk ki a 35 év, ill. 50 év alatt megtermelhető elektromos energia pénzügyi eredményét. Először számoljuk ki az elektromos áram előállításának elvi hatásfokát.

Nicolas Léonard Sadi CARNOT megállapította, hogy a melegebb helyről a hidegebb helyre átfolyó energiának csak egy része alakítható át mechanikai munkává (azaz elektromos árammá) mely folyamatot a következő képlettel lehet leírni:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

ahol:

η a hatásfok, vagyis a körfolyamatban keletkező elméleti mechanikai munka aránya az átfolyó hőenergiához képest, T_1 a melegebb hely abszolút hőmérséklete, T_2 a hidegebb hely abszolút hőmérséklete.

Jelen esetben 158 °C-os, azaz 431 K-es termálvizünk és a ciklus végén 50 °C-os, azaz 323 K hőmérsékletű fluidumunk van. Ezen adatok alapján a hatásfok 0,25-nek adódik. Mivel ez elvi hatásfok, és vannak rendszerveszteségek, továbbá a kezdeti fluidum-hőmérsékletünk az üzemelés alatt csökken, a továbbiakban 0,2 hatásfokkal számolunk. Ezen adatok alapján meghatározható a 35 és 50 év alatt előállítható elektromos áram mennyisége, amiből a jelenlegi 35 Ft/kWh áron számolva, megadható a geotermikus erőmű üzemideje alatt megtermelt elektromos áram értéke, mai áron számolva (*V. táblázat*).

Ha a kapott végösszegeket összevetjük, a mintegy 6 milliárd Ft létesítési költséggel (optimista becslés) és sem üzemeltetési, sem karbantartási költséggel nem kalkulálunk – az üzleti értékelésnél csak a CAPEX értékét vettük figyelembe, az OPEX értékével nem számoltunk – akkor ugyanezt a pénzügyi eredményt kapjuk 6 milliárd Ft 35 évre szóló 3,7%-os kamatra vagy 50 évig szóló 2,9%-os kamatra történő befektetésével. Annak ellenére, hogy mindenhol optimista becslést alkalmaztunk, ez nagyon szerény gazdasági eredmény a geotermikus áramtermelő erőműtől!

A számítási eredményekből következik, hogy egy leha-

tárolt térfogattal leírható mező még egy pár termelő-visszasajtoló kúttal is hamar kimerülhet a termelő és visszasajtoló kút távolságának függvényében, ha nem tud rácsatlakozni egy nagyobb, folyamatos hőszállítást biztosító rendszerre (nagyobb rezervoár, vetőrendszer), mint amilyenek neotektonikai mozgásokkal fel-fel nyíló mélységi vetőrendszerek vagy az ezekkel kapcsolatos vulkanikus övezetek. Nem véletlen, hogy az ismert áramtermelő geotermikus hőhasznosítások vulkanikus területeken, illetve lemezszegélyek mentén találhatók.

Ennek szemléltetésére további futtatást végeztünk. A legkedvezőbb hidrodinamikai eset (sc1 – 5000 m³/nap, 50 év termelés – 50 év regenerálódás) mintáján demonstráljuk a megnövelt (négyeszeres) térrész és a csökkentett izoláció pozitív hatását. Változatlan rétegvastagság mellett a rezervoár felületi oldalait a kétszeresére, a két kút távolságát pedig $\sqrt[3]{4}$ -szeresére növeltük. Összehasonlítva a megnövelt rezervoár termelőkútjának hőmérsékleti diagramját a korábban vizsgált kisebb és izolált típusúval (*12. ábra*), jól szemrevételezhető a lényegesen kedvezőbb hőmérsékleti kondíció (és méginkább ennek időbeli lefutása).

A magyarországi alaphegységi kőzetekből való geotermikus hőtermeléssel kapcsolatos beruházások nagy gazdasági kockázatot hordoznak, ha nincs közvetett ismeretünk egy természetes permeabilitással rendelkező repedésrendszerről, melyre a tervezett rendszer rácsatlakozhat. Esetünkben egy természetes repedésrendszerrel rendelkező, hidrotermális (a hőtermeléshez elegendő fluidummal rendelkező) rendszert modelleztünk, mely eléggé izolált. Ha az ilyen izolált zsebeket mesterségesen össze lehet kötni (pl. mechanikai stimulációval), vagy az aljzat felületéhez közel, a báziskonglomerátummal, esetleg jól vezető karbonátos képződménnyel hidraulikai kapcsolatba hozni, akkor a kivethető hőmennyiségre a számítottnál lényegesen jobb értéket kaphatunk, ahogy az előbbi példa is szemlélteti. Ugyanakkor ha a kezdeti hőmérsékleti érték kellően magas, és az itt bemutatott 0,03 km³-nél legalább egy nagyságrenddel nagyobb térfogatot tudunk hatékonyan stimulálni, akkor petrotermális esetben is (jelentős fluidumpótlással üzemelő rendszer) lehet esély fenntartható geotermikus energiahasznosításra (RYBACH 2021).

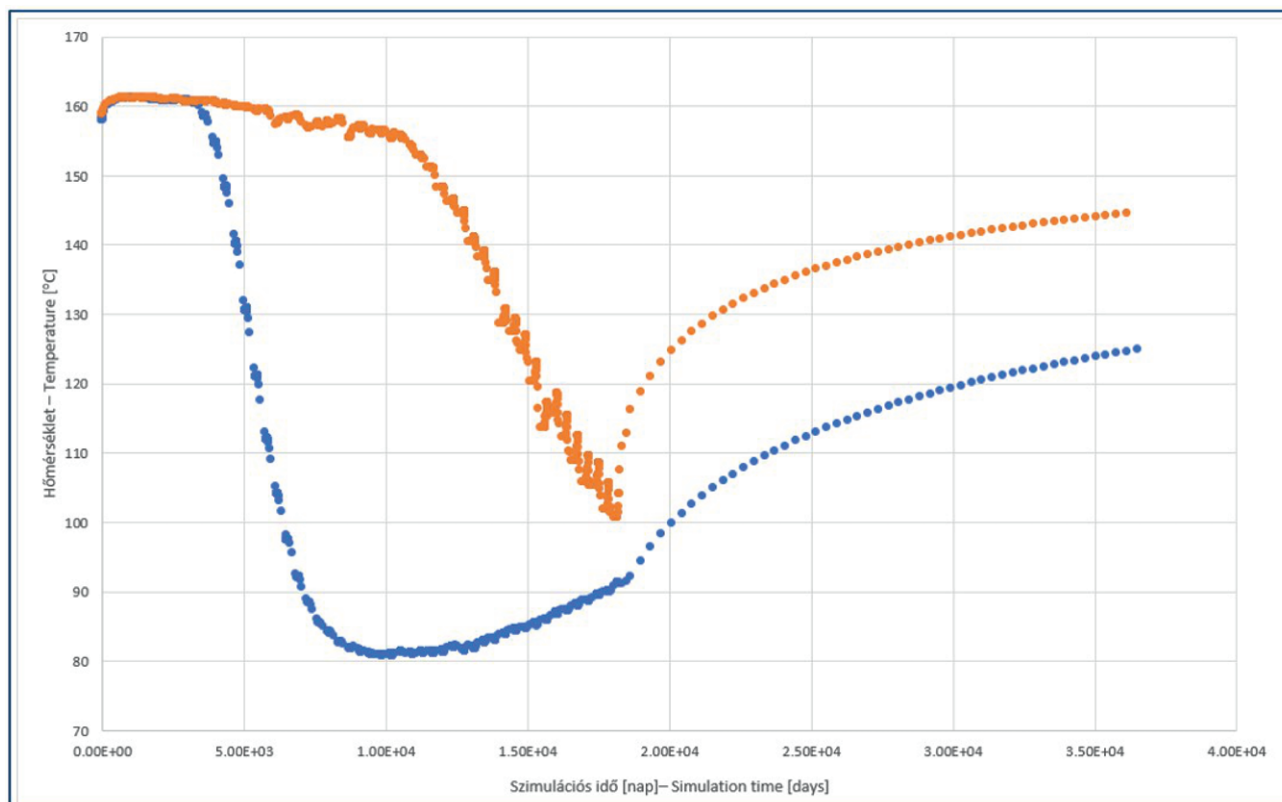
A kérdés megválaszolása komplex, a geológiai adottságokon túl a megtérülést, a társadalmi elfogadottságot (szocioökonómiai tényezők) és a műszaki lehetőségek összességét együtt kell számba venni, azaz a UNFC-2009 osztályozás 3 pillérét!

A UNFC-2009 kód szerint a modellezett projekt nagy kockázatú kísérleti projektnek minősül. Modellünkkel első sorban azt kívántuk bizonyítani, hogy a statikus készletbecs-

V. táblázat. Kivett hőmennyiségből előállítható elektromos áram és annak értéke, ha 1 kWh=35 Ft 35 és 50 évre

Table V. Electricity can be produced from the amount of heat extracted and its value if 1 kWh = 35 HUF for 35 and 50 years

Idő-tartam	Kivett hőmennyiség [GJ]	Előállítható elektromos áram [GJ]	Előállítható elektromos áram [kWh]	Elektromos áram értéke [Ft] (1 kWh=35 Ft)
35 év	1,126E+7	2,252E+6	6,256E+8	21 900 000 000
50 év	1,265E+7	2,53E+6	7,028E+8	24 600 000 000



12. ábra. Az 1. szcenárió hőmérséklet - üzemelési idő diagramja (5000 m³/nap 50 év termelés és 50 év leállítás; eredeti [kék] és megnövelt „zseb”[narancssárga] esetében)

Figure 12. Temperature-time diagram in scenario 1 (5000 m³/day for 50 years production and 50 years shutdown; original [blue] and increased “pocket”[orange])

léshez képest a numerikus szimuláción alapuló hőmennyiség-számítás jelentősen segíti, illetve kiegészíti a korai tervezési szakaszt.

Bár a modell eredménye a bemutatott paraméter tartományok esetén nem kecsegtet üzleti haszonnal, továbbra is azt gondoljuk, helye van a Battonya–Pusztaföldvári-háton egy kísérleti geotermikus projektnek, ami verifikálhatja a hidrodinamikai feltételrendszert. Reméljük, tanulmányunk segíti a kristályos aljzat geotermikus hasznosításában rejlt

földtani kockázatok pontosabb meghatározását, az optimális megoldások keresését.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket fejezzük ki RYBACH László, HAAS János és LENKEY László lektoroknak, valamint SZTANÓ Orsolya főszerkesztőnek értékes tanácsaikért és segítségükért.

Irodalom – References

- BÁRDOSY Gy., FODOR J., MOLNÁR P. & TUNGLI Gy. 2000: A bizonytalanság értékelése a földtudományokban. – *Földtani Közlöny* **130/2**, 291–323.
- BREEDER, K., DZEBISASHVILI, K., LIU, X. & FALCONE, G. 2013: A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future. – *Geothermal Energy* **1**, 4. <https://doi.org/10.1186/2195-9706-1-4>
- FANG, J. H. & CHEN, H. C. 1990: Uncertainties are better handled by fuzzy arithmetic. – *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists* **74**, 1228–1233. <https://doi.org/10.1306/0c9b246b-1710-11d7-8645000102c1865d>
- HAAS J., BUDAI T., CSONTOS L., FODOR L. & KONRÁD Gy. 2010: *Magyarország prekainozoos aljzattérképe, 1:500 000*. – A Magyar Állami Földtani Intézet kiadványa, Budapest.
- KUN É., ZILÁHI-SEBESS L. & SZANYI J. 2022: A Battonya–Pusztaföldvári-hát térségének nagy entalpiájú geotermikusenergia-vagyona (I. rész): hidrodinamikai és hőtranszportmodell. – *Földtani Közlöny* **152/1**, 53–76. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2022.152.1.53>
- MÁDLNÉ SZŐNYI J. 2006: *A geotermikus energia – Készletek, kutatás, hasznosítás*. – Grafon Kiadó, Nagykövácsi, pp. 144
- MUFFLER, L. J. P. & CATALDI, R. 1978: Methods for Regional Assessment of Geothermal Resources. – *Geothermics* **7**, 53–89. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(78\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0375-6505(78)90002-0)

- NÁDOR A. 2016: A geotermikus energiavagyon nemzetközi osztályozási és jelentési rendszerei, harmonizációs lehetőségek és a hazai adaptáció első lépései. – *Földtani Közlöny* **146/2**, 123–134.
- NÁDOR, A. & ZILÁHI-SEBESS, L. 2016: Entering geothermal energy into the UNFC-2009 classification system: case studies of direct-use projects from Hungary. – *European Geothermal Congress, Strasbourg, France, 19–24 Sept. 2016 (extended abstract)*. 8 p.
- NÁDOR, A., ZILÁHI-SEBESS, L., ROTÁR-SZALKAI, Á., GULYÁS, Á. & MARKOVIĆ, T. 2019: New methods of geothermal potential assessment in the Pannonian basin. – *Geologie en Mijnbouw* **98**, <https://doi.org/10.1017/njg.2019.7>
- REN21 2019: Renewables 2019 Global Status Report. – Paris: REN21 Secretariat, p. 336. I https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf
- REZESSY G., SZANYI J. & HÁMOR T. 2005: Jelentés a geotermikus energiavagyon állami nyilvántartásának előkészítéséről. – *Kézirat*, Magyar Állami Földtani, Geofizikai és Bányászati Adattár, 85 p.
- RYBACH, L. 2021: Geothermal Sustainability or Heat Mining? – *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics* **4/1**, 15–25. <https://doi.org/10.31214/ijthfa.v4i1.61>
- SZANYI J. 2019: Geotermikus energia komplex hasznosítása – *Habilitációs dolgozat*, SZTE, Szeged, 20 p.
- TÓTH, J. & ALMÁSI, I. 2001: Interpretation of observed fluid potential patterns in a deep sedimentary basin under tectonic compression: Hungarian Great Plain, Pannonian Basin. – *Geofluids* **1/1**, 11–36.
- T. KOVÁCS G. 1965: A battonyai terület mélyföldtani felépítése. – *Földtani Közlöny* **95/2**, 183–189. http://epa.oszk.hu/01600/01635/00174/pdf/EPA01635_foldtani_kozlony_1965_095_2_183-189.pdf
- UNECE 2016a: <https://unece.org/2016-23>; Discussing the application of Resource Classification to renewable energy sources: <https://unece.org/sustainable-energy/news/discussing-application-resource-classification-renewable-energy-sources>
- UNECE 2016b: Draft document prepared by the Geothermal Working Group: https://unece.org/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC2009_publcom.geoth.2016/Geothermal.Specs_for.public.comment.pdf
- VON NEUMANN, J. 1951: Various Techniques Used in Connection with Random Digits. National Bureau of Standards symposium. – *NBS, Applied Mathematics Series* **12**, 36–38,
- ZADEH, L. 1965: Fuzzy sets. – *Information and Control* **8**, 338–353.
- ZILÁHI-SEBESS L. 2016: Geotermikus potenciálbecslés Monte-Carlo módszerrel. – *A Magyarhoni Földtani Társulat Földtudományi Vándorgyűlése és kiállítása, Természeti erőforrásaink az Észak-magyarországi térségben 2016. augusztus 24–27., absztrakt*, 102–103.
- ZILÁHI-SEBESS L., FANCSIK T., TÖRÖK I. & KOVÁCS A. Cs. 2007: Szivárgási tényező becslés lehetőségei geofizikai mérések alapján. – *Magyar Geofizika* **48/3**, 99–111.
- Kézirat beérkezett: 2021. 04. 23.