

Termálvíz-visszasajtolás és fenntarthatóság – a visszasajtolási potenciál előrejelzési lehetőségei homokkő rezervoárok esetén

Markó Ábel^{1,2*} , Tóth Marianna², Mádlné Szőnyi Judit¹ 

¹ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Földrajz- és Földtudományi Intézet,
Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra, Budapest, Magyarország

²MOL Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt., Budapest, Magyarország

*Levelező szerző, e-mail: marab@student.elte.hu

Beérkezett: 2023. december 7.; elfogadva: 2024. január 9.; online megjelent: 2024. október 3.

Absztrakt

A termálvizek visszasajtolása az országos és települési szintű hosszú távú energiabiztonság szempontjából kulcsfontosságú: hozzájárul az energiaforrás fenntartható felhasználásához, megnövelve a beruházások élettartamát. Bár számos potenciális nehézség merül fel, ez nem jelenthet mentséget a visszasajtolás hiányára. A kidolgozott eljárással, a problémák előrejelzésével a visszasajtolási lehetőségek értékelhetők, és – a geotermikus potenciálbecslés részeként – kijelölhetők az arra legalkalmasabb területek. A kutatásban eddig a Zalai-medence mintaterületén regionális hidraulikai, formáció és rezervoártest léptékű értékelést végeztük el: a zalai pannon képződményeknél a nyomásviszonyok nem okoznak problémát, míg a rezervoárlépték jelentős heterogenitást mutat, ami befolyásolja a visszasajtolás hatékonyságát.

Kulcsszavak: termálvíz, visszasajtolás, energiabiztonság, potenciálbecslés, homokkő rezervoár

Thermal water reinjection and sustainability – predicting the reinjection potential for sandstone aquifers

Ábel Markó^{1,2*}, Marianna Tóth², Judit Mádl-Szőnyi¹

¹ELTE Eötvös Loránd University, Institute of Geography and Earth Sciences,
Department of Geology, József and Erzsébet Tóth Hydrogeology Chair, Budapest, Hungary

²MOL Hungarian Oil and Gas Company, Budapest, Hungary

Summary

This paper addresses one of the main challenges of thermal water utilization, the issue of thermal water reinjection, by summarizing the related difficulties, presenting a comprehensive approaches for prediction, and presenting results of a specific study area.

To ensure sustainable use, it is essential to return extracted thermal water into the tapped aquifer, thus avoiding a drop in water level and pressure. This is key to long-term energy security at national and municipal level, as it helps to ensure that the energy resource is used in a sustainable way, extending the lifetime of the investment.

However, the reinjection of cooled thermal water into the reservoir often faces challenges especially in siliciclastic aquifers that have been experienced in numerous projects. Injection related issues originate from the initial geological and hydrogeological conditions or the disturbed physico-chemical equilibrium. However, the problems can not be an excuse for the lacking reinjection. By predicting the problems and estimating their risks, the potential for reinjection can be assessed in a given region and the most suitable areas can be identified as part of the geothermal potential assessment. As part of the Cooperative Doctoral Programme research, the comprehensive approach was tested and regional hydraulic, formation-scale reservoir and reservoir body-scale assessments have been carried out in the Zala Basin study area so far: the results show that the Pannonian formations in Zala have quasi-hydrostatic pressure conditions, while the reservoir scale shows significant heterogeneity, which can have a strong influence on the efficiency of the reinjection.

Keywords: thermal water, reinjection, energy security, potential estimation, sandstone reservoir

Előszó a téma tudományos jelentőségéhez

A homokkőbe történő termálvíz-visszasajtolás tudományosan ma is számos nehézséggel terhelt, de a nehézségek nem jelentik azt, hogy mellőzhető lenne. Itt két helyzetet érdemes elkülöníteni. A közel hidrosztatikus nyomásállapotú rezervoárok arra utalnak, hogy a kőzetvázban lehetséges a fluidum közlekedése és az utánpótlás a csapadékból elvben megvalósulhat. Azonban a gazdaságos energiatermeléshez szükséges hozamok általában meghaladják az utánpótlás mértékét, ezért a környezeti és gazdasági szempontból fenntartható használat csak visszasajtolás mellett biztosítható. A túlnyomásos rezervoárok, mivel eleve nem utánpótolódnak, így termelésük csak visszasajtolás mellett lehetséges, egyébként a kutak és a rezervoár kimerülése a tervezett élettartamnál előbb bekövetkezik, ami a beruházás gazdasági fenntarthatóságát is kockáztatja.

A kutatás a visszasajtolás kérdését nem egy-egy kiragadott aspektusból vizsgálja, hanem munkafolyamatot dolgozott ki a szakirodalmi tapasztalatok alapján a felmerülő problémák komplex és többféle léptékben történő értékeléséhez. E komplex módszertant teszteli a munka a Zalai-medence pannon homokkőveinek példáján, mely terület az intenzív termálvízhasználat, valamint a szénhidrogénipar rendelkezésre álló használaton kívüli kútjai miatt geotermikus szempontból perspektivikus.

A bemutatott eredmények regionális és rezervoár léptékben ígéretesek és a szénhidrogénipari gyakorlatban fejlesztett korszerű módszerek adaptálása révén rendkívül újszerűek. A tudományosan átfogó és a MOL által támogatott kutatás hazai és nemzetközi gyakorlatban nagy érdeklődésre tarthat számot és közvetlenül hozzájárul a probléma kockázati szempontú értékeléséhez.

Mádlné Szőnyi Judit

ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem,
Természettudományi Kar, Földrajz- és Földtudományi
Intézet, Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék,
Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra

Előszó a téma ipari oldali megközelítéséhez

A termálvíz fizikai és kémiai tulajdonságai összhangban vannak a tároló rezervoár tulajdonságaival, és azzal természetes egyensúlyi rendszert alkotnak. Ebben a rendszerben a termelő és besajtoló kutak a rendszer szerves elemeként mesterségesen válnak a fluidum kiemelésének és besajtolásának eszközeivé.

A kutatások ipari alkalmazhatóságának alapkérdése a gazdaságosság. A termálvíz visszasajtolási potenciáljának előrejelzése kifejezetten műszaki-gazdaságossági kérdéseket feszeget. (Annál is inkább, mivel a Vízkertirányelv fenntarthatósági előírásai szerint 2027-től kötelező a kitermelt termálvíz visszasajtolása.) A kockázatok és a visszasajtolási műszaki problémák (pl. kútintegritás,

fedőkőzet-repesztés) prognosztizálása markáns módon befolyásolhatja a gazdaságosságot és költségérzékenységet, ezzel együtt végső soron a projekt sikerességét.

Mélyfúrással korábban is megszereztünk és jelenleg is keletkeznek különböző földtani és műszaki adatok, amelyek rendszerszemléletű összegyűjtése és feldolgozása nélkülözhetetlen. Ez a tevékenység jelenleg nem része a folyamatban lévő projekteknek Magyarországon. Ez a dolgozat első körben rávilágít ennek szükségességére is.

Ezt követően a tároló modellszintű leképezését mutatja meg. Az így felépített modell képes lesz a kitermelés és visszasajtolás műszaki-gazdaságossági kockázatainak előrevetítésére kút és akár telep szinten is. Ha a gazdaságosságra ható kockázati tényezőket jól definiáljuk, akkor a sikerességet is növeljük. Mindezek miatt ez a kutatás hiánypótló.

Tóth Marianna

MOL Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt.

Bevezetés

Energiabiztonság a hazai termálvíz-hasznosítás tükrében

Az Európai Unióhoz hasonlóan, hazánk energiafogyasztásának felét teszi ki a fűtési-hűtési célú energiafelhasználás (*Heatroadmap 2018; European Commission 2021*). Tekintve, hogy Magyarország energiaigénye kielégítése több mint 60%-ban importra szorul, az energiabiztonság szempontjából létfontosságú, hogy ezt az energiaszükségletet hazai, rövid és hosszú távon megbízható energiaforrásokból tudjuk kielégíteni, csökkentve a kitettséget az import energia felé. Fosszilis energiahordozókban relatíve szegény országgént fontos szerep juthat az alternatív és megújuló energiaforrásoknak. Míg ezek tekintetében, például a napenergia terén az utóbbi években jelentős előrelépést ért el hazánk, az alapterhelést biztosító megújulók használata messze elmarad a meglévő potenciáltól.

A Föld belső hőjéből származó geotermikus energia időjárástól és napszaktól függetlenül használható, megbízható alaphozamot biztosít. A helyi adottságoktól függően települési szinten kinyerhető. Feltételekkel, de megújuló energiaforrás, valamint alacsony szén-dioxid-kibocsátás mellett használható a hazai energiafelhasználás dekarbonizációjában is. A sekély és mélygeotermikus készletek, a megfelelő technológia megválasztásával széleskörűen, hűtési és fűtési célokra egyaránt használhatók.

A hazai geotermikusenergia-felhasználás és -termelés 2022-ben 6,7 PJ volt, ami csak 5%-át adja a teljes megújuló termelésnek és felhasználásnak, és 6,5%-át az összes hőenergia-termelésnek (*MEKH 2023*). A hazai háztartások 17%-a használ távhőt, melynek – a 2021-es adatok szerint – 11%-át adta geotermikus energia (*MEKH 2022*). A kedvező hazai geotermikus adottsá-

gok régóta ismertek. A Pannon-medencében a megemelkedett hőáram és a jó víztartó képződmények megléte lehetővé teszi az ország nagy területén termálvizek kitermelését, ezek pedig elsősorban a direkt hőhasznosításhoz kínálnak jó lehetőséget (Horváth 2015; Nádor-Kujbus-Tóth 2016). A hazai termálvízkészletek fenntartható használata tehát hosszú távon lehet alternatíva az import energiaforrásokkal szemben.

Visszasajtolás mint fenntarthatósági garancia

A geotermikus energia és a földkéreg hőtartalma emberi léptékben kifogyhatatlan, megújuló; azonban víztartó léptékben nem kimeríthetetlen. Túlhasználat esetén a rezervoár kimerül, a hőmérséklet és a nyomás csökken, a természetes visszatöltődés és a hőmérséklet-helyreállítás hosszú időt igényel (Gringarten 1978). Ezen túl, a kitermelt víz felszíni elhelyezése a felszíni vizek túlzott hő és oldott anyag terhelését, valamint az oldott gázok (pl. metán, kénhidrogén, szén-dioxid) további légkörbe bocsátását jelentené. A rezervoárba való víz visszajuttatása tehát két fő oldalról is indokolt: 1) a hőkimerült víz környezetbarát elhelyezésének szükségessége, valamint 2) a rezervoár újratöltődésének elősegítése miatt, mely ellensúlyozza a nyomás- és esetleges felszínsüllyedést (Gringarten 1978; Axelsson 2012). Visszasajtolás nélkül tehát a víztartóra jellemző potenciometrikus vízszint lecsökken. Erre jó – azaz negatív – hazai példa a Szentesi környéki termálvíz-kitermelés hatása: a 40 éves, utánpótlódást meghaladó termelés regionális léptékű depressziót okozott, központjában 25–40 m-es vízszintcsökkenéssel (Szanyi-Kovács 2010; Bálint-Szanyi 2015; Császár 2014). Ebben az esetben is igaz, hogy a nagy kiterjedésű vízáadó formációk hosszú ideig képesek elfedni a visszajuttatás hiányának hatását, ezáltal hozamcsökkenés nem szükségszerűen tapasztalható, a kút sem „szárad ki”. Viszont a potenciometrikus vízszint, és vele a rendelkezésre álló vízoszlop csökkenését lokálisan is észlelni lehet. Mi több – a szentesi példához hasonlóan – a hatás regionális léptékben is észlelhető. Azaz nemcsak az adott termelőkút szűk környezetében lesz hatása, hanem kiterjedten, több termelőkút esetén egymást erősítve nagy kiterjedésű depressziós tölcseért okoz. Ez pedig hosszú távon a termálvízkészletek kimerüléséhez vezet. Ez veszélyezteti a beruházások hosszú távú működését. De a következmények a termálvíz-hasznosításon túlmutató hatásokkal is járhatnak, a megváltoztatott hidraulikai viszonyok miatt a mély víztartók túltermelése a velük hidraulikai kapcsolatban felszínközeli hidegvíztartók állapotára is hatással lehet, csökkentve az azokra jellemző potenciometrikus szintet (Szanyi-Kovács 2010). Ezáltal mind az ivóvíztermelésre használt víztartók mennyiségi és minőségi romlását, mind a felszín alatti víztől függő ökoszisztémák károsodását okozhatja.

A fenti okok miatt még a csapadékból utánpótlódó készletek esetén is mindenképpen szükséges a visszajaj-

toló kutak alkalmazása és a kitermelt víz felszín alá visszajuttatása. Nem utánpótlódó, túlnyomásos készletek esetén még nagyobb jelentősége lehet a visszajuttatásnak. Ezek megállapítására viszont már figyelembe kell venni az abnormális nyomás milyenségét, azaz hogy alul vagy túlnyomásos a rendszer (Mádl-Szőnyi-Simon 2016; Mádlné Szőnyi 2019).

Habár a nagynyomású visszajuttatás alkalmazása a szénhidrogéniparban a szénhidrogén mellett kitermelt víz elhelyezése és a rezervoár nyomás fenntartása céljából több évtizedes múltra nyúlik vissza, ez a technológia termálvíz-hasznosító rendszerek esetén a magas nyomás és annak költségei miatt gazdaságilag nem fenntartható (Szanyi et al. 2014). Így a sikeres geotermikus visszajuttatás nem mindig egyértelmű, porózus (homokkő) rezervoárok esetén fizikai-kémiai és geológiai folyamatok miatt világszerte problémákat tapasztaltak, melyek erősen hátráltatják a besajtolást, csökkentve annak hatékonyságát (Stefansson 1997; Ungemach 2003).

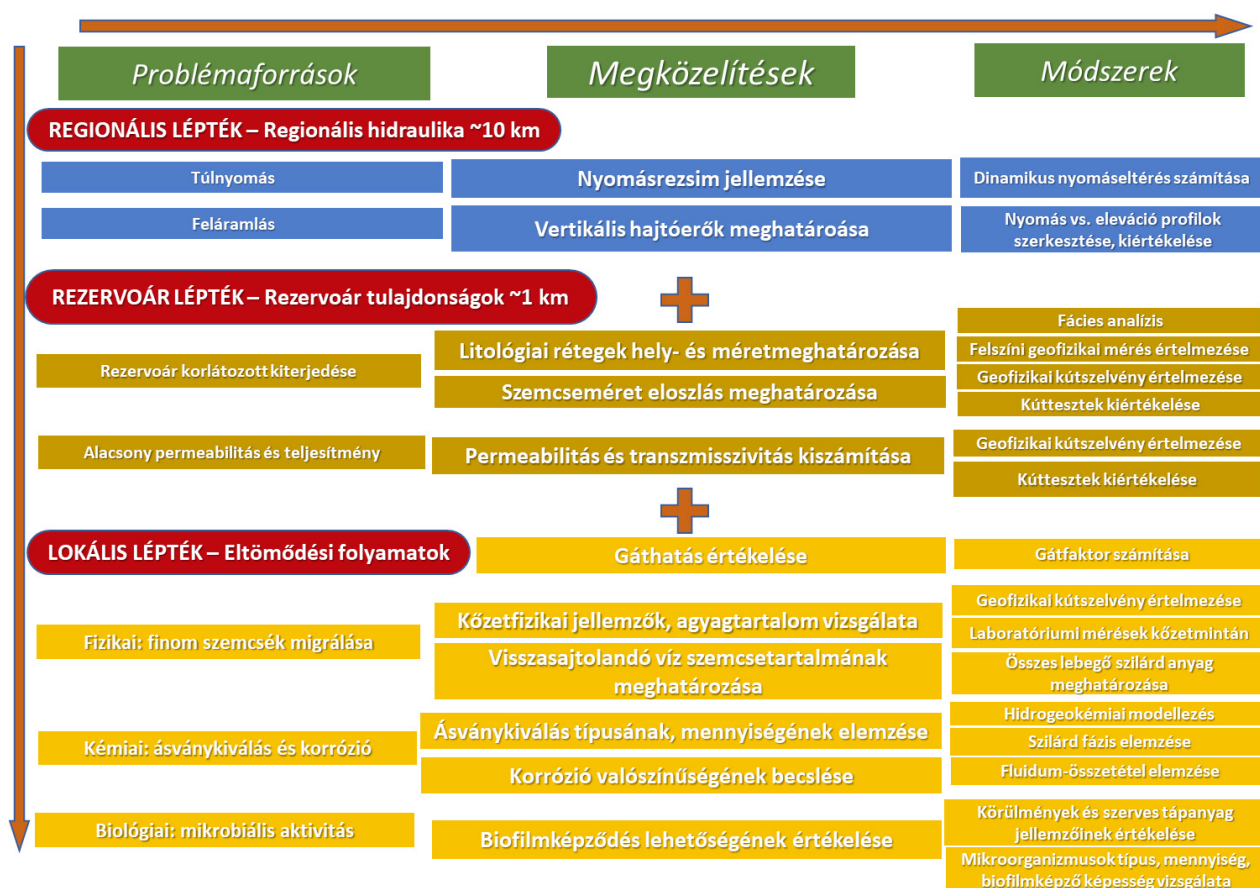
A fenntartható használatához szükséges a különböző léptékben potenciálisan felmerülő problémák megértése, ami nélkülözhetetlen megoldásukhoz, elkerülésükhöz. Emellett, az új régiók bevonása esetén a problémák előrejelzése a megelőzésükhöz járulhat hozzá (Markó-Mádl-Szőnyi-Brehme 2021).

Módszertan – Visszasajtolási potenciál előrejelzése a felmerülő problémák becslésével

A geotermikus hasznosítás során számos formában végeznek potenciálbecslést, értékelve többek között a hőmérsékleti és rezervoárviszonyokat, valamint a kitermelhető energia mennyiségét (Stefansson 2005; Rybach 2015; Nádor 2019). Ahogyan a geotermikus potenciál egy terület hasznosítása előtt értékelésre kerül, javasolt a visszajuttatás szempontját is hasonlóképp előzetesen értékelni (Markó et al. 2023). Hiszen a fentiek alapján csak abban az esetben tekinthető fenntarthatónak a termálvízhasználat, ha a víz utánpótlódását visszajuttatással biztosítani tudjuk.

E tanulmányban a visszajuttatást akadályozó, potenciálisan felmerülő problémákat, problémaforrásokat bekövetkezésük valószínűsége szerint értékeljük.

A módszertan a problémaforrások többléptékű vizsgálatát kiemelő szemléleten alapszik (lásd (Markó-Mádl-Szőnyi-Brehme 2021)). A visszajuttatási problémák minél teljesebb megértése érdekében a javasolt munkafolyamat a lehetséges okokat, és vizsgálati megközelítéseiket három léptékben tárgyalja: i) regionális léptékű hidraulika hatásai, ii) rezervoár léptékű tulajdonságok, valamint iii) a lokális, eltömődésekhez vezető fizikai, kémiai és biológiai folyamatok (1. ábra). A felmerülő problémák területi értékelésével az adott terület visszajuttatási kockázatai, és összesítve a visszajuttatási potenciál értékelhető.



1. ábra

Visszasajtolás problémaforrásainak értékelésére javasolt munkafolyamat és megközelítések példa módszerekkel

Forrás: Markó–Mádl–Szőnyi–Brehme 2021 alapján saját szerkesztés

Regionális hidraulika – nyomásviszonyok vizsgálata

A hidraulikai viszonyok jelentősen befolyásolják a besajtolás hatékonyságát, normál és abnormális közötti átmeneti nyomás tartományban a vártnál magasabb nyomás nehezíti, illetve ellehetetleníti a kisnyomású besajtolást (Mádl–Szőnyi–Simon 2016; Mádlné Szőnyi 2019). A túlnyomásos viszonyok többek között tektonikai kompresszió, illetve gyors üledékképződés miatt jönnek létre. Megőrződésükhöz gyenge hidraulikus vezetőképességű vízfogó képződmények jelenléte szükséges (Almási 2003; Czauner–Mádl–Szőnyi 2013). A visszasajtolási nehézségek regionális léptékű vizsgálatának alapja a felszín alatti térrészben a hidrosztatikus és a túlnyomásos tartományok elkülönítése. Ezt a nyomásrezsim jellemzésével, valamint a vertikális hajtóerők irányának meghatározásával tehetjük meg. A vízkutak és szénhidrogén-kutató fúrások eredeti kútdokumentációban rögzített, létesítéskor mért vízszintet, illetve pórusnyomás adatait vesszük figyelembe. Ezek tükrözik a „kvázi természetes”, azaz fluidum termelés előtti állapotot, azaz a stacioner áramlási viszonyokat, és tájékoztatnak a természetes nyomásviszonyokról (Markó–Mádl–Szőnyi–Brehme 2021; Markó et al. 2021).

A kutakban mért hidraulikus emelkedési magasság és nyomásértékek vertikális eloszlása alapján jellemezhető a felszín alatti nyomásrezsim, amely lehet túlnyomásos (szuperhidrosztatikus), hidrosztatikus vagy alulnyomásos (szubhidrosztatikus). Ennek meghatározásához ismerni kell a topográfia felszín alatti vízszintre gyakorolt hatását, ami meghatározza a vizsgált területre jellemző „természetes” hidrosztatikus állapotát, és annak a domborzat által hajtott vízmozgással jellemezhető tartományát (Mádlné Szőnyi 2020). Amennyiben a kútban mért nyomás értéke valamelyik irányban meghaladja ezen intervallumok határait, abnormális alul- vagy abnormális túlnyomásról beszélhetünk. Ennek a (pozitív vagy negatív) eltérésnek mértéke a dinamikus nyomásváltozással fejezhető ki, ami az adott tengerszint feletti magasságon várható nominális vagy statikus nyomás (p_{nom}) és a dinamikus vagy valós (mért) nyomás (p_{val}) különbsége (Tóth 2009).

Alulnyomásos esetben a nyomásértékek számottevően alacsonyabbak a hidrosztatikus nyomás alapján várható értékeknél, ezért a fedett víztartó nyelőként funkcionál, vizet fogad be környezetéből (Mádlné Szőnyi 2019). Azaz injektálásra alkalmas, a folyadék elnyelése hidraulikai értelemben ezekbe a rétegekbe energiabefektetés

nélkül lehetséges. A kutak termelése szempontjából hátrányos helyzet a visszasajtolási potenciált növeli.

Tényleges túlnyomás esetén a kisnyomású besajtolás azért nem használható, mert alkalmatlan a fennálló természetes nyomásviszonyok meghaladására. Ezen helyzetekben nagynyomású, jóval költségesebb visszasajtolásra van szükség. A visszasajtolási nyomás tervezéséhez a dinamikus nyomástartást meghaladó besajtoló nyomással kell számolni.

Rezervoár tulajdonságok elemzése – Rezervoár kiterjedése és teljesítménye

A magas nyelőképesség miatt a (repedezett) mészkőbe való besajtolás legtöbbször sikeres, homokkő formációkban azonban jóval kevesebb gazdaságosan működő rendszer létezik. Sikeres besajtoláshoz, sziliciklasztosporózus rezervoár esetén vastag, nagy porozitású (azaz jól osztályozott) homokkövek előnyösek, melyek elsődleges porüstere és szerkezete kevés utólagos diagenetikus változáson (kompaktálódás, cementálódás) ment keresztül (Rockel–Hoth–Seibt 1997). A konkrét kőzetfizikai előfeltételek helyszíntől függőek, alapvető paraméterek az effektív porozitás, permeabilitás, valamint a rezervoár kiterjedése (Seibt–Kellner 2003).

Ezen túl, a rezervoár szerkezete és a faciesek heterogenitása (főképp folyóvízi és delta rezervoár rendszerek esetén) befolyásolja a kétutas rendszerek, ezáltal a visszasajtolás hatékonyságát (Crooijmans et al. 2016). Utóbbiak meghatározzák a rezervoár homokkő testek konnektivitását, valamint a homokkő testek kiterjedését. A konnektivitás minőségére az N/G (net to gross) arány, azaz a nettó, használható (jó permeabilitású) rezervoár kiterjedése és a rezervoár teljes kiterjedés arányából következtethetünk (Hovadik–Larue 2007). A rezervoár homokkő testek gyenge összeköttetése csökkentheti a használható rezervoár térfogatot, ami ismét a visszasajtolás rossz hatékonyságához vezethet (Willems et al. 2017). A rezervoár tulajdonságok vizsgálatának keretében a rezervoár kiterjedését, illetve a rezervoár permeabilitását, a kút teljesítményét szükséges értékelni. A rezervoár kis vertikális kiterjedése (vastagsága) alacsony transzmisszivitáshoz, ezáltal csökkent injektivitáshoz vezet. Korlátozott horizontális kiterjedés esetén magasabb besajtolási nyomás szükséges, amennyiben a besajtoló kútból elinduló nyomáshullám eléri a rezervoár horizontális határait (Renard–Glenz–Mejias 2009).

A rezervoár rétegek vertikális és horizontális kiterjedés értékelésében első lépés a facies analízis és az üledékképződési környezet rekonstruálása. Különös jelentősége lehet folyóvízi vagy delta képződmények (lásd például pannóniai homokkövek) által alkotott rezervoárok esetén (Willems et al. 2017; Willems–Westaway–Burnside 2019). A rezervoár formáció kiterjedésének megállapításához, valamint a formációt tagoló szerkezeti elemek, vetők észleléséhez a felszíni geofizikai (pl. szeizmikus) mérések kiértékelése nyújt információt. A 3D szeizmikus mérések

esetén a szeizmikus attribútumok felhasználása további elemzést tesz lehetővé. Emellett a fúrásokban végzett geofizikai szelvényeinek értelmezése alapján a formáción belüli alkalmas (nagyobb szemcseméretű, jobb porozitású) rétegek elhelyezkedése, mérete és geometriája határozható meg, önmagában, vagy kombinálva felszíni geofizikai módszerekkel.

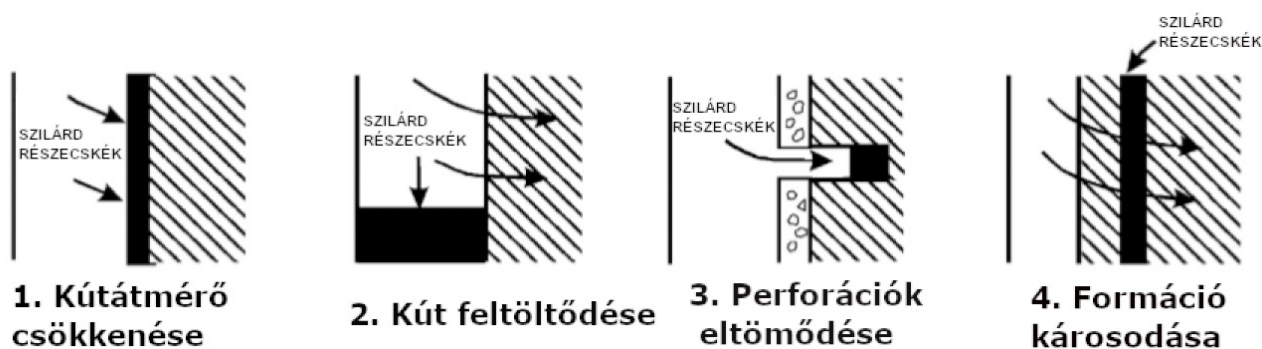
A sziliciklasztos víztartó homok szakasza a formáció teljes hosszához viszonyítva (N/G aránya) szintén a kútszelvényezésből (pl. természetes gamma szelvény) állapítható meg. Értelemszerűen az arány minél magasabb értéke, azaz minél nagyobb rezervoár térfogat meglete előnyös. A rezervoár minőségének vizsgálata során a rezervoár permeabilitása (k [m^2]) és transzmisszivitása (T [m^2/s]) számítására, valamint a nyitott szakaszok aktivitásának értékelésére kerül. A produktivitási (termelhetőségi) index és az injektivitási (elnyelési) index még közvetlenebb indikátorai a rezervoár teljesítményének. A produktivitás a termelési hozam (Q [m^3/d]) és az általa létrehozott leszívás (hidraulikus emelkedési magasságban) vagy a termelés okozta nyomás [Pa] csökkenése; míg az injektivitás a besajtolási folyadékáram (Q [m^3/d]) és az általa okozott emelkedési magasság növekmény („felboltozódás”) vagy a nyomás [Pa] növekmény a visszasajtoló kútban mérve.

Lokális eltömődések vizsgálata: fizikai, kémiai, biológiai folyamatok

Az alacsony injektivitás, illetve annak csökkenése gyakran eltömődési folyamatok következménye. Az angol 'clogging' fogalma számos különböző mechanizmust fed le, melyek hozzájárulnak az áramlási pályák elzáródásához. Az eltömődések létrejöttének alapvető oka az, hogy a termelés és visszasajtolás során, a korábban – kútlétesítés és rendszerműködtetés előtt – fennálló hidrodinamikai és vízkémiai egyensúlyban változás áll be (Szanyi et al. 2014). A meghatározó paraméterek, melyekben visszasajtolás során változás történik: a hőmérséklet, nyomás, áramlási sebesség, sótartalom, redox potenciál és pH. Ezek a változások a részecskék mobilizációjához, mikrobiológiai aktivitás erősödéséhez, biofilm, valamint ásványkiválások, korróziós termékek képződéséhez járulhatnak hozzá.

A kút környezetében bekövetkező változások a kútra és a formációra is negatív hatással lehetnek: hozzájárulhatnak a kútátmérő beszűküléséhez, a kút feltöltődését okozhatják. Emellett eltömíthetik a szűrőváz perforációt, valamint a fúróluktól távolabb lerakódva a formáció pórusait is (2. ábra) (Barkman–Davidson 1972).

Ennek következtében a fúrólukban, valamint a kút és a formáció határán az áramlási pályák elzáródhatnak, ami pozitív gáthatáshoz (skin effect), azaz a fúróluk környékének áramlással szembeni megnövekedett ellenálláshoz vezetnek. Ennek számszerűsítése a gát tényező (skin factor) kiszámításával lehetséges (Agarwal–Al-Hussainy–Ramey 1970). Ezenfelül, finomszemcsés sziliciklasztos



2. ábra

Szilárd részecskék (finom szemcsék, mikrobiális termékek, korróziós termékek, ásványkiválások) okozta elváltozások

Forrás: Barkman–Davidson 1972 alapján saját szerkesztés

tos rezervoárok (azaz homok, homokkő rezervoárok aleuritos és agyagos közbetelepülésekkel) esetén a formáció károsodása is bekövetkezhet a porustorkok eltömődésével, ami a permeabilitás csökkenésével jár (Seibt–Kellner 2003; Ungemach 2003). Hasonlóképpen, a vízben csapdázott gázbuborékok is közrejátszhatnak a porustorkok elzáródásában (Boisdet et al. 1989). Az eltömődés mechanizmusainak megértéséhez és előrejelzéséhez szükséges a fizikai, kémiai és biológiai folyamatok vizsgálata és megértése (Brehme et al. 2018).

Fizikai folyamatok alatt elsősorban a finomszemcsék migrálását érthetjük. Ezek a finom közetszemcséket (*formation fines*) foglalják magukba: finomszemű homok, aleurit, agyag. A rezervoárból származó szemcsék az egyensúlyi állapot megbomlása miatt mobilizálódhatnak, majd újra lerakódva az áramlási pályákat elzárva csökkentik a rezervoár permeabilitását (Sharma–Yortsos 1987; Ochi–Vernoux 1998). A finomszemcséket jellemző paraméterek a formációból vett magminták, furadékminták és szemcseméretjelző geofizikai szelvényeken keresztül jelezhetők előre. Már meglévő rendszerek esetén a fluidum folyamatos monitorozásával mérhető a víz teljes szállított szemcse-tartalma és azok mérete, valamint az áramlás turbiditása. A szállított szemcsék vizsgálata mennyiségüket és méretüket számszerűsíti.

A termelés és visszasajtolás közben bekövetkező termodinamikai és vízkémiai változások ásványi kiválásokat, lerakódásokat (*scaling*) indukálnak, és számos termálvíz-hasznosító projekt során okoznak nehézséget: mind a felszíni (cső)rendszerben, mind a rezervoár formációban akadályozzák a fluidumáramlást (Corsi 1986; Ungemach 2003). A kémiai folyamatok előrejelzése, becslése és számszerűsítése a termelési és visszasajtolási folyamatot szimuláló hidro-geokémiai modellezéssel (például a PH-REEQC szoftver) lehetséges (Rockel–Hoth–Seibt 1997). Ezen modellek alkalmazásához a vizsgált terület kútjaiból származó fluidum pontos vízkémiai elemzése szükséges. A magas oldottanyag-tartalom mellett a geotermikus fluidumok számos korrózív anyagot szállítanak, melyek roncsoló hatása révén keletkező korróziós termékek szintén tovább szállíthatnak, így végül hozzájárul-

nak az eltömődési folyamatokhoz (Brehme et al. 2018; Boch et al. 2017; Tonkó–Páczay 2012). A korrózió potenciális súlyát becsülendő, szükséges a következő fluidumösszetevők vizsgálata: oldottanyag-tartalom (klorid, szulfát, szilikát, kalcium-hidrogénkarbonát tartalom), oldottgáz-tartalom (különösen veszélyes a magas [>50 ppb] oxigéntartalom, kénhidrogén- és ammóniatartalom) és összetétel, korrózív mikroorganizmusok (vasbaktériumok, szulfátredukáló baktériumok) mennyisége (Tonkó–Páczay 2012; Sand 2003).

A termálvizekben gyakran előforduló mikrobiális komponensek (mezofil baktériumok) kedvezőtlen viszonyok (magas hőmérséklet és sótartalom) között ellenálló spórákkal vannak jelen, probléma okozása nélkül (Taylor–Vaisman 2010; Szanyi et al. 2015). Azonban a felhasználás során lehűlt, visszasajtolandó termálvízben ideális körülmények között elkezdene szaporodni és jelentős részük képez biofilmet, azaz jól rendezett, felületekhez rögzülő élő és élettelen sejtekből álló struktúrát (Sand 2003; Czinkota et al. 2015; Szanyi et al. 2015). A biofilmek gátolják a fluidumáramlást, működési és visszasajtolási nehézségeket okozva (például szűrők gyakori cseréje, magasabb besajtolási nyomás szükségessége) rontják a rendszerek hatékonyságát (Osvold et al. 2017). A mikrobiális aktivitás erősen függ a külső viszonyoktól, mint a hőmérséklet és a pH, ezzel párhuzamosan a termálvíz szervesanyag-tartalma és egyéb tápanyagforrások (pl. nitrogén- és foszforvegyületek) meghatározzák a mikrobiális flóra összetételét (Sand 2003; Osvold et al. 2017). Így ezen paraméterek, a termálvíz szervesvegyület-tartalmának összetételének vizsgálata előre jelezheti a várhatóan megjelenő mikrobiális életközösséget, minőségét, mennyiségét. Továbbá a terület kútjaiból származó termálvíz, valamint – pl. szűrőkben visszamaradt vagy kútban leülepedett – szilárd minta mikrobiális összetételének elemzése szintén információt szolgál a működtetés során várhatóan megjelenő csoportokról, és azok aktivitásáról, biofilmképző képességükről.

Mindezen folyamatok következménye az injektivitás csökkenése, mely csökkenti a visszasajtolási potenciált.

Vizsgálati terület és adatok

A Zalai-medence (3. ábra) területén a geotermikus hőáram $84\text{--}109\text{ mW/m}^2$ között, míg a geotermikus gradiens értéke $45\text{--}52\text{ }^\circ\text{C/km}$ között jellemző (Dövényi et al. 1983), azaz a hazai viszonyok között is kedvezőbb területek közé tartozik (Tóth 2017). Zala vármegyében 68 termálvízkút szerepel a termálkút-kataszterben, ezek többsége balneológiai célokra hasznosított (például a leghíresebb hévízi gyógyfürdő kútjai), $30\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$ -os kifolyó vízhőmérséklettel (Tóth 2017). Ugyanakkor a térségben alig van működő visszasajtolás, amire a rendszerek fenntarthatósága érdekében nagy szükség lenne. A területen a működő termálvízkutak többségét meglévő szénhidrogén-kutató fúrásokból alakították át. A meddő és a felhagyott szénhidrogénkutak további potenciált jelenthetnek a geotermikus hasznosításra, különösen a visszasajtolásra (Markó et al. 2022).

A Kooperatív Doktori Program keretében a pályázatban is ipari partner (MOL) adatai képezték a felhasználható adatbázis jelentős részét. A kőolaj- és földgázkutatás révén a vállalat által végzett mérések révén a szénhidrogéntartó – főként mélyvízi pannóniai – képződmények mellett az előbbi fölött elhelyezkedő termálvíztartó – sekélyvízi pannóniai homokkő – formációkról is nagy mennyiségű felhasználható adat keletkezik. Ezek között a pontszerű fűrés adatok és az ezek kiterjesztésére használható 3D szeizmikus mérések eredményei a legfontosabbak. Ennek köszönhetően a zalai régió 3000 m mélységig jól megkutatott. További – vízszint – adatokat a terület víz és termálkútjaiból vontunk be az értékelésbe.

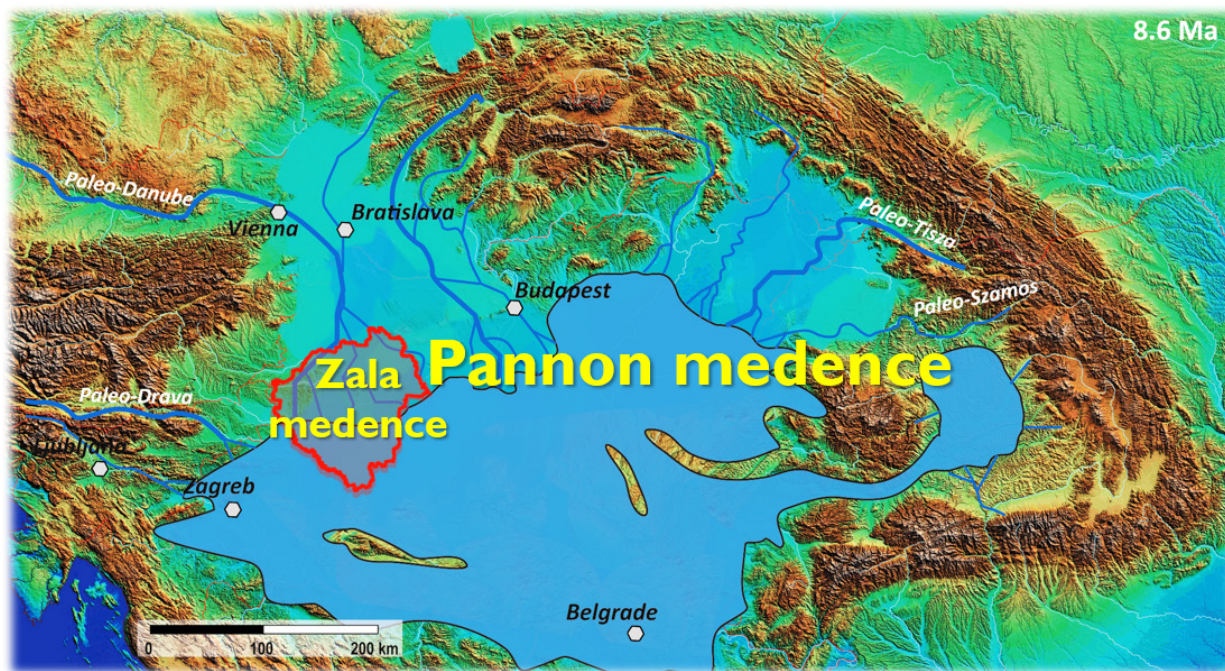
Zalai-medence vizsgálati terület regionális és rezervoárléptékű eredményei

A KDP-kutatás zalai vizsgálatai közül e tanulmányban az eddig megszületett regionális és rezervoárléptékű eredményeket közöljük.

Regionális hidraulikai viszonyok

A víz- és termálvízkutaknál a kútkiképzés után mért, a szűrőközepre vonatkoztatott nyugalmi vízszint összesen 900 adatpontot eredményezett a vizsgált területre vonatkozóan. A hidraulikai és nyomásviszonyok leírásához a hidraulikus emelkedési magasságok (mBf) felhasználásával folyadék-potenciáltérképeket készítettünk különböző eleváció intervallumokra (mBf) (részletes elemzés: Markó et al. 2022). A nyomásértékekből kiszámítottuk a hidrosztatikus értéktől való eltérésüket (azaz a dinamikus nyomáseltéréseket).

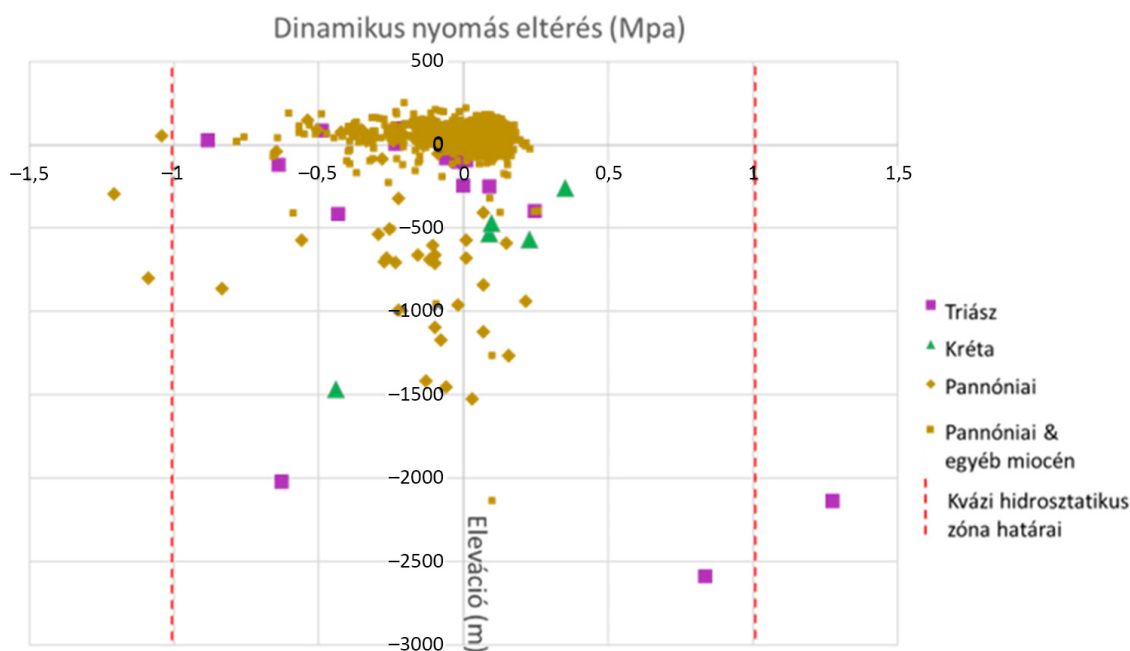
A normál hidrosztatikai nyomásértékek tartományát az adatpontok magasságának és a vizsgált területre vonatkozó 10 m-es átlagos vízmélység felhasználásával számoltuk ki (Mádlné Szőnyi 2019; Markó–Mádl–Szőnyi–Brehme 2021; Markó et al. 2021). Így a kvázi hidrosztatikus zóna határai $\pm 1\text{ Mpa}$ (piros szaggatott vonal – m (4. ábra) voltak. A dinamikus nyomáseltérés profil (4. ábra) azt mutatja, hogy a pannóniai képződmények adatpontjai a normál hidrosztatikus rezsimben találhatók. (A sekély vízkutak negatív eltérése a szomszédos fúrások hosszú távú termelésének következménye,



3. ábra

Zalai-medence vizsgálati területe a Pannon-medence tágabb környezetében, az üledékképződési környezetet adó Pannon-tó 8,6 millió évvel ezelőtti kiterjedésével

Forrás: Sztanó–Magyar–Katona 2020 alapján saját szerkesztés



4. ábra | Dinamikus nyomásejtérés – eleváció (tengerszint feletti magasság) profil a vizsgálati területről

Forrás: Markó et al. 2022 alapján saját szerkesztés

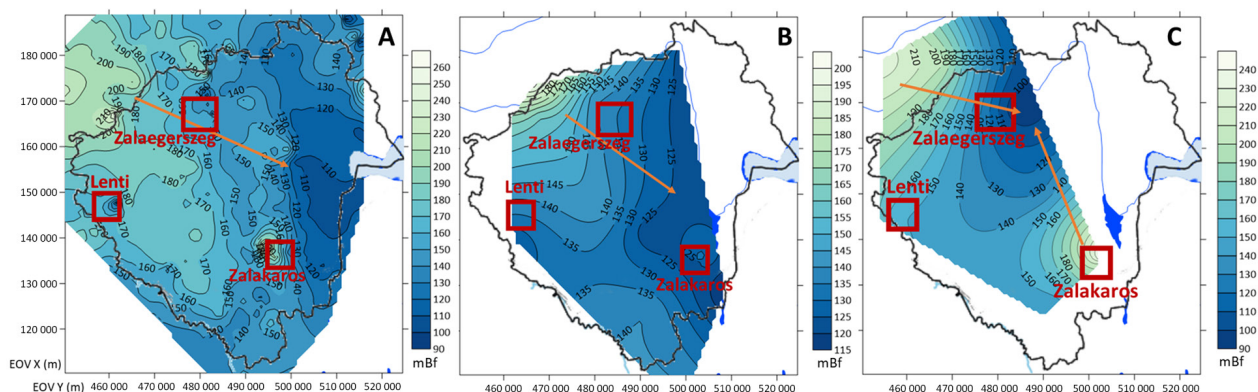
így nem tekinthető anomálisnak.) Hasonlóképpen a kréta karbonátokból származó adatpontok is a hidrosztatikus tartományba illeszkednek. A mélyebb régiókban a triász kőzetekben egy túlnyomásos adatpont található (4. ábra).

A folyadékpotenciál-térképeket három különböző eleváció közre szerkesztettük Golden Software Surfer programmal és krigeléses interpoláció módszerével. Az eleváció közök a következők voltak: (300 m) – (–500 m) tengerszint feletti magasság; (–500 m) – (–1000 m) tengerszint feletti magasság; (–1000 m) – (–2700 m). A fluid-potenciál-térképek alapján (5. ábra) a hidraulikus emelkedési magasságok általában nagyobbak a nyugati régióban, ami a magasabb domborzatnak megfelelő és délkelet felé irányuló vízszintes hajtóerőt eredményez.

Összefoglalva, a hidraulikai elemzés kvazi hidrosztatikus viszonyokat mutatott ki a pannon sziliciklasztos tározókban, amelyekben a topográfia által vezérelt hajtóerők dominálnak. A hidraulikai elemzés tehát nem jelez előre a túlnyomásból eredő visszasajtolási problémákat a pannóniai víztartókban a zalai térségben.

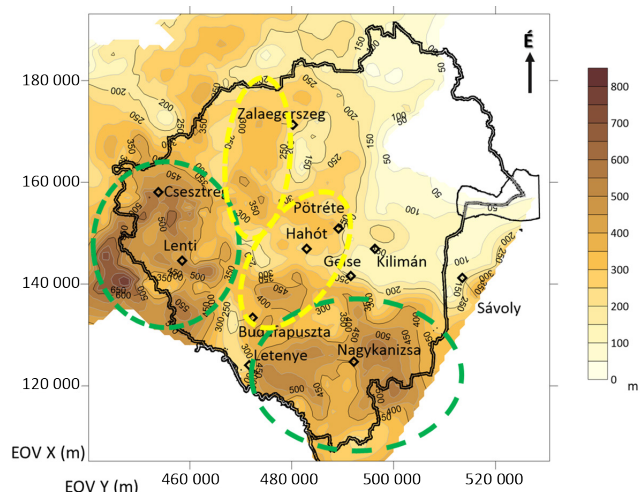
Formációlépték – Tározókőzetek elterjedése

A rezervoárvizonyokat tekintve, első lépésben regionálisan, formáció léptékben értékeltük azok kiterjedését. A porózus víztartó kiterjedéséhez a T-JAM projekt (Fodor et al. 2011) adatait használtuk fel, ezek alapján az Újfalu-formáció mélységét és vastagságát határoztuk meg.



5. ábra | Fluidpotenciál-térképek a vizsgálati területen A: (300 m) – (–500 m) mBf; B: (–500 m) – (–1000 m) mBf; C: (–1000 m) – (–2700 m) mBf

Forrás: Markó et al. 2022 alapján saját szerkesztés



6. ábra Újfalu formáció képződmény vastagsága a zalai kutatási területen (zöld: legjobb kiterjedésű, sárga: elfogadható kiterjedésű)
Forrás: Markó et al. 2022 alapján saját szerkesztés

E legjobb porózus rezervoár formáció tetőmélysége északkeletre közelíti a felszínt, és keleti, valamint déli irányba mélyül. Ezekben a régiókban a tető mélysége eléri az 1600 m-t a felszín alatt. A formáció vastagsága hasonló mintázatot mutat (6. ábra), így a nyugati és déli részekben 500–600 m vertikális kiterjedést ér el (zöld szaggatott vonallal jelölt területeken), a Zalai-medence szlovéniai része felé vastagodva. Ezekben a régiókban a porózus tározó képződmény a 100 °C-os izotermával egybeesik, azaz fűtési célra felhasználható termálvizet adhat (Markó et al. 2022). A vizsgálati terület középső, előbbtől keletre és északra elhelyezkedő (sárga szaggatottal) jelölt részén a formáció kissé sekélyebben, 300–400 méteres vastagsággal bír, mely megfelelő kategóriaként értékelhető.

A formációléptékű elemzés alapján tehát a legjobb rezervoárviszonyok a vizsgált terület déli és nyugati részén találhatók. A képződmény vertikális kiterjedése elegendő, a Pannon-medence más régióihoz képest jelentős.

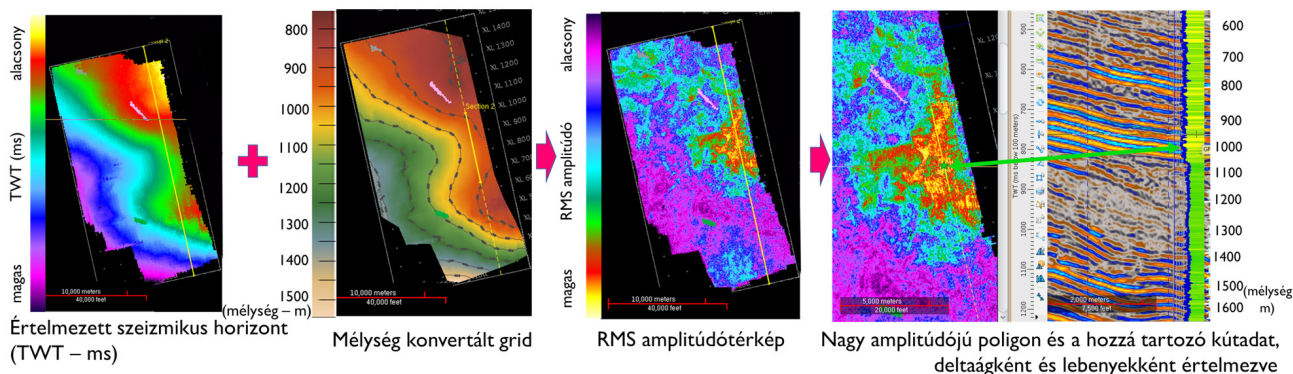
Ez a formáción belüli delta tározó és benne a homokkő testek megfelelő kiterjedését vetíti előre, azaz első lépésként feltételezhető, hogy ezeken a területeken jó minőségű a homokkő tározó.

Rezervoárléptékű vizsgálatok

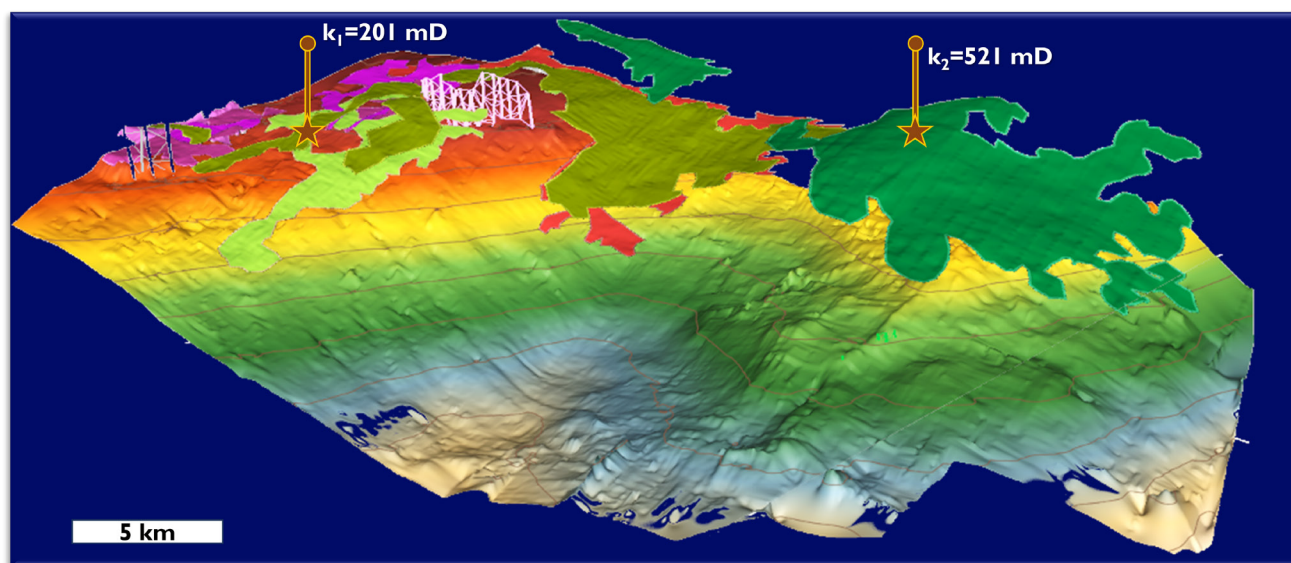
A rezervoárléptékű vizsgálatokhoz a formáción belüli heterogenitásokat térképeztük fel, szeizmikus értelmezést alkalmazva, a 6. ábrán sárga szaggatott vonallal lehatárolt (formációléptékben megfelelő vastagságúnak minősített rezervoárral rendelkező) terület egyikén elhelyezkedő 3D szeizmikus blokkon.

A választott 3D szeizmikus blokkon belül 8 horizontot értelmeztünk a Decisionspace Geosciences Landmark szoftver felhasználásával (7. ábra). A horizontok mentén RMS (root mean square – négyzetesközép) amplitúdó értéket generáltunk ± 20 ms-os ablakokban, ami megközelítőleg 40 m-es vastagságnak felel meg. A nagy amplitúdójú régiók vastag homoktestek erős reflexiójaként interpretálhatók, míg az alacsony értékek kevés homoktartalmú agyagos rétegeként. A nagy amplitúdójú területeken az eredményeket a rendelkezésre álló fúrásokban mért kútszelvényekkel korreláltuk: a természetes gamma szelvényen homokként azonosított régiók és a nagy amplitúdójú területek egységét (mederkitöltő vagy torkolati zátony) homokkő testként azonosítottuk (ennek folyamata látható a 7. ábrán).

A szeizmikus értelmezés segítségével az egyes időpontokban jellemző paleo-lejtő kitérképezése is megtörtént. A 8. ábrán a legkorábbi (egyben legmélyebb) paleo-lejtő és a térképezett homokkő testek láthatók. A különböző amplitúdó térképeken értelmezett poligonokat különböző színek (zöld, sárga, barna, piros, rózsaszín) jelölik. Az eredmények alapján 100 méteres nagyságrendű litológiai heterogenitást sikerült kimutatni a vizsgált 800–1200 méteres mélységintervallumban (8. ábra). A szűk vizsgálati területen belül található két termálkút adataival összevetve, a homoktestek jó permeabilitással bírnak ($k_1 = 201$ mD és $k_2 = 521$ mD).



7. ábra 3D szeizmikus blokkon belül egy példa horizonton egy delta lebeny értelmezése és térképezése
Forrás: Markó et al. 2023 alapján saját szerkesztés



8. ábra | Szeizmikus értelmezéssel térképezett homoktestek (zöld, barna, piros, rózsaszín poligonok: a színek az azonos horizonton és amplitúdótérképen értelmezett testeket jelölik) egy értelmezett paleo-lejtővel, két meglévő termálkút helyével (csillag) és kútszét során mért permeabilitás értékével
Forrás: saját szerkesztés

Az eredmények segítségével:

1) értékelhető az adott terület és mélységintervallum rezervoárléptékű visszasajtolási potenciálja, az alapján, hogy milyen sűrűn, mekkora kiterjedéssel, hány darab homoktest található benne;

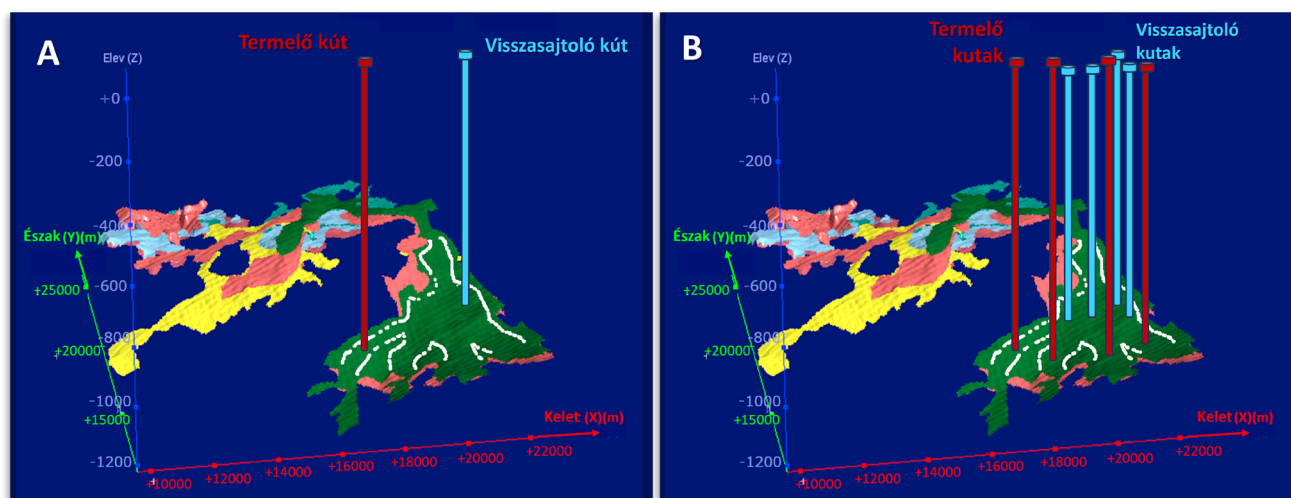
2) javasolható az optimális kútpár elhelyezése.

A vizsgált alterület középső homoktestjének példája alapján egy kútpár elhelyezése a következőképpen javasolt. A termelőkút a mélyebb (azaz magasabb hőmérsékletű) részen helyezkedik el, míg a visszasajtoló kút 2–4 km-re keletre, a sekélyebb részen. Mindkét kút ugyanazon homokkő egység nagy kiterjedésű, jó összeköttetéssel rendelkező részén található (9. ábra A). A paleoáramlás (üledékszállítás) irányával párhuzamos

elhelyezés támogatja a hatékony felhasználást a szivattyú energiavesztésének csökkentésével (vö. *Willems et al. 2017*). Kútpár helyett mezőben gondolkodva, hasonló elhelyezéssel a terület mélyebb részein termelő, kissé sekélyebb részein visszasajtoló kutak elhelyezése lehetséges (9. ábra B).

Következtetések, összefoglalás

Tanulmányunk a termálvízalapú geotermikus hasznosítás egyik fő kihívását, a termálvíz-visszasajtolás kérdését járja körül a felmerülő nehézségek összegzésével, az előrejelzéshez használható megközelítések bemutatásával, és egy vizsgált mintaterület eddig elért eredményeivel.



9. ábra | Termelő és visszasajtoló kutak javasolt elhelyezése a detektált homokkőtestek területén kútpárral (A) és sokkutas mezővel (B)
Forrás: saját szerkesztés

A fenntartható termálvízhasználathoz elengedhetetlen, hogy a kivett termálvizet a víztartóba visszajuttassuk, ezáltal elkerülve a vízszint- és a nyomáscsökkenést. A bemutatott módszertan alkalmazása, a potenciálisan felmerülő különböző léptékű problémák megértése és előrejelzése segít megtalálni a visszasajtolásra leginkább alkalmas kőzettesteket, valamint lehetővé teszi akár megálló kutak visszasajtolási potenciáljának értékelését is.

A zalai mintaterület hidraulikai eredményei szerint a sekélyvízi pannóniai képződmények hidrosztatikus-közei nyomásállapotukkal nem jeleznek előre visszasajtolási nehézségeket. A rezervoárléptékű vizsgálatok által feltárt heterogenitás ugyanakkor jelentősen befolyásolhatja a visszasajtolás hatékonyságát. A kutatás eredményeképpen kiterképezett homokkőtestek meghatározzák a termelő- és visszasajtoló kutak optimális elhelyezését, melyre javaslatot is tettünk.

A potenciálértékelés mellett a problémák időben történő felismerése lehetővé teszi azok mérséklését. Habár minden probléma teljes mértékű elkerülése ritkán lehetséges, megfelelő tervezéssel és kivitelezéssel, a (hidro)geológiai adottságok figyelembevételével és megfelelő műszaki megoldások választásával sikeres visszasajtoló projektek hozhatók létre.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium a KDP-2021 Kooperatív Doktor Program doktori hallgatói ösztöndíj programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. Támogatási szerződés száma: KDP 2021_ELTE_C 1789026. A kutatás az Éghajlatváltozás Nemzeti Multidiszciplináris Laboratórium RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú projekt keretében valósult meg.



Felhasznált irodalom

Agarwal, R. G., Al-Hussainy, R., & Ramey, H. J. (1970) An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow: I. Analytical treatment. Society of Petroleum Engineers Journal, Vol. 10. No. 3. pp. 279–290.

Almási, I. (2003) Evaluation of the possible mechanisms able to generate and maintain the overpressured regime in the Pannonian Basin, Eastern Hungary. Journal of Geochemical Exploration, Vol. 78–79. pp. 139–142.

Axelsson, G. (2012) Role and management of geothermal reinjection. Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells. Santa Tecla

Bálint, A., & Szanyi, J. (2015) A half century of reservoir property changes in the Szentes geothermal field, Hungary. Central European Geology, Vol. 58. No. 1–2. pp. 28–49.

Barkman, J. H., & Davidson, D. H. (1972) Measuring water quality and predicting well impairment. Journal of Petroleum Technology, Vol. 24. No. 7. pp. 865–873.

Boch, R., Leis, A., Haslinger, E., Goldbrunner, J. E., Mittermayr, F., Fröschl, H., & Hippler, D. D. (2017) Scale-fragment formation impairing geothermal energy production: interacting H₂S corrosion and CaCO₃ crystal growth. Geothermal Energy, Vol. 5. No. 4.

Boisdet, A., Cautru, J., Czernichowski-Lauriol, I., Foucher, J., Fouillac, C. H., & Martin, J. (1989) Experiments on Reinjection of Geothermal Brines in Deep Triassic Sandstones. Paper presented at the International Seminar European Geothermal Update, European Union Commission, Florence, Italy, 27–30 September 1989. Conference Proceedings, pp. 419–428.

Brehme, M., Regenspurg, S., Leary, P., Bulut, F., Milsch, H., Petruskas, S., Valickas, R. & Blöcher, G. (2018). Injection-triggered occlusion of flow pathways in geothermal operations. Geofluids, 2018(1), 4694829.

Corsi, R. (1986) Scaling and corrosion in geothermal equipment: problems and preventive measures. Geothermics, Vol. 15. No. 5–6. pp. 839–856.

Crooijmans, R. A., Willems, C. J., Nick, H. M., & Bruhn, D. F. (2016) The influence of facies heterogeneity on the doublet performance in low-enthalpy geothermal sedimentary reservoirs. Geothermics, Vol. 64. pp. 209–219.

Czauner, B., & Mádl-Szőnyi, J. (2013) Regional hydraulic behavior of structural zones and sedimentological heterogeneities in an overpressured sedimentary basin. Marine and Petroleum Geology, Vol. 48. pp. 260–274.

Czinkota, I., Osvald, M., Szanyi, J., Medgyes, T., Kobor, B., & Bálint, A. (2015) Analysis of chemical and biological processes in geothermal systems—a case study. In Proceedings of the World Geothermal Congress.

Csiszár E. (2014) Termálvíz visszasajtolás megvalósításának lehetőségei Szentes térségében. Diplomamunka. Miskolci Egyetem, p. 120.

Dövényi, P., Horváth, F., Liebe, P., Gálfi, J., & Erki, I. (1983) Geothermal conditions of Hungary. Geofizikai Közlemények, Vol. 29. No. 1. pp. 3–114.

European Commission (2021). Heating and cooling. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling_en (letöltés dátuma: 2023. 11. 26.)

Fodor, L., Uhrin, A., Palotás, K., Selmecezi, I., Tóthné, M. Á., Riznar, I., ... Lapanje, A. (2011) A Mura–Zala-medence vízföldtani elemzést szolgáló földtani-szerkezetföldtani modellje. A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése, 2011.

Gringarten, A. C. (1978) Reservoir lifetime and heat recovery factor in geothermal aquifers used for urban heating. Pure and Applied Geophysics, Vol. 117. No. 1–2. pp. 297–308.

Heatroadmap (2018) 2015 Final Heating & Cooling Demand in Hungary. https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2018/11/HRE4-Country_presentation-Hungary.pdf (letöltés dátuma: 2023. 11. 26.)

Horváth, F., Musitz, B., Balázs, A. V., Uhrin, A., Nádor, A., Koroknai, B., ... Wórum, G. (2015) Evolution of the Pannonian basin and its geothermal resources. Geothermics, Vol. 53. pp. 328–352.

Hovadik, J. M., & Larue, D. K. (2007) Static characterizations of reservoirs: refining the concepts of connectivity and continuity. Petroleum Geoscience, Vol. 13. No. 3. pp. 195–211.

Mádlné Szőnyi, J. (2019) Significance of regional pressure conditions in thermal water exploration and the rejuvenation of geothermal resources (In Hungarian: A regionális pórusnyomásviszonyok jelentősége a termálvíz feltárásban és a készletek megújulásában.) Magyar Tudomány, Vol. 180. No. 12. pp. 1796–1807.

- Mádlné Szőnyi J. (2020) Felszínalatti vízáramlások mintázata fedetlen és kapcsolódó fedett karbonátos víztartó rendszerekben a Budai-termálkarszt tágabb környezetének példáján. (Doktori disszertáció, Eötvös Loránd Tudományegyetem.)
- Mádl-Szőnyi, J., & Simon, S. (2016) Involvement of preliminary regional fluid pressure evaluation into the reconnaissance geothermal exploration—Example of an overpressured and gravity-driven basin. *Geothermics*, Vol. 60. pp. 156–174.
- Markó, Á., Galsa, A., Czauner, B., Brehme, M., & Mádl-Szőnyi, J. (2021) Geothermal Reinjection Problems from a Basin-scale Hydrogeological Perspective. *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1 Reykjavik, Iceland, April - October, 2021*, p. 11. Available online at: <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2020/15003.pdf?t=1627583965> (Accessed: 07.29.2021).
- Markó, Á., Mádl-Szőnyi, J., & Brehme, M. (2021) Injection related issues of a doublet system in a sandstone aquifer – A generalized concept to understand and avoid problem sources in geothermal systems. *Geothermics*, Vol. 97. 102234.
- Markó, Á., Tóth, M., Brehme, M., & Mádl-Szőnyi, J. (2022) Assessing reinjection potential of abandoned hydrocarbon wells in the Zala region (SW Hungary). *European Geothermal Congress 2022: EGC2022*
- Markó, Á., Tóth, M., Brehme, M., & Mádl-Szőnyi, J. (2023) Determining the “geothermal reinjection potential” into sedimentary formations using datasets of hydrocarbon exploration. *EGU General Assembly (No. EGU23-6992)*. Copernicus Meetings
- MEKH (2022) A magyar távhőszektor 2021. évi adatai. https://www.mekh.hu/download/0/13/31000/MEKH_statistikai_kiadvany_tavho_A4_03_web_FINAL.pdf (letöltés dátuma: 2023. 12. 04.)
- MEKH (2023) Elsődleges megújuló energiahordozók termelése és felhasználása; Hőenergia termelés. <https://www.mekh.hu/eves-adatok> (letöltés dátuma: 2023. 11. 25.)
- Nádor, A., Kujbus, A., & Tóth, A. N. (2016) Geothermal Energy Use, Country Update for Hungary. *Proceedings European Geothermal Congress, Strasbourg, France*.
- Nádor, A., Sebess-Zilahi, L., Rotár-Szalkai, Á., Gulyás, Á., & Markó, T. (2019) New methods of geothermal potential assessment in the Pannonian basin. *Netherlands Journal of Geosciences*, Vol. 98, e10.
- Ochi, J., & Vernoux, J. F. (1998) Permeability decrease in sandstone reservoirs by fluid injection: hydrodynamic and chemical effects. *Journal of Hydrology*, Vol. 208. No. 3–4. pp. 237–248.
- Osvald, M., Maróti, G., Pap, B., & Szanyi, J. (2017) Biofilm forming bacteria during thermal water reinjection. *Geofluids*, Vol. 3.
- Renard, P., Glenz, D., & Mejias, M. (2009) Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology Journal*, Vol. 17. No. 3. pp. 589–600.
- Rockel, W., Hoth, P., & Seibt, P. (1997) Charakteristik und Aufschluss hydrogeothermaler Speicher. *Geowissenschaften*, Vol. 15. No. 8. pp. 244–252.
- Rybach, L. (2015) Classification of geothermal resources by potential. *Geothermal Energy Science*, Vol. 3. No. 1. pp. 13–17.
- Sand, W. (2003) Microbial life in geothermal waters. *Geothermics*, Vol. 32. No. 4–6. pp. 655–667.
- Seibt, P., & Kellner, T. (2003) Practical experience in the reinjection of cooled thermal waters back into sandstone reservoirs. *Geothermics*, Vol. 32. No. 4–6. pp. 733–741.
- Sharma, M. M., & Yortsos, Y. C. (1987) Fines migration in porous media. *AIChE Journal*, Vol. 33. No. 10. pp. 1654–1662.
- Stefansson, V. (2005) World geothermal assessment. *Proceedings World Geothermal Congress*, Vol. 2005, pp. 24–29.
- Stefansson, V. (1997) Geothermal reinjection experience. *Geothermics*, Vol. 26. pp. 99–139.
- Szanyi, J., & Kovács, B. (2010) Utilization of geothermal systems in South-East Hungary. *Geothermics*, Vol. 39. No. 4. pp. 357–364.
- Szanyi, J., Medgyes, T., Kóbor, B., & Pál-Molnár, E. (2015) Technologies of injection into sandstone reservoirs: best practices, case studies. *Szeged: GeoLitera; Institute of Geosciences, University of Szeged*
- Szanyi, J., Medgyes, T., Kóbor, B., Tari, C., & Balint, A. (2014) Experiences with geothermal water injection into porous aquifers. *Technika Pozukiwań Geologicznych*, Vol. 53.
- Sztanó O., Magyar I., & Katona L. (2020) A Pannon-tó és a Balaton. In: Babinszki E., Horváth F. (szerk.) *A Balaton kutatása Lóczy Lajos nyomdokán*. Magyarhoni Földtani Társulat, pp. 107–126.
- Taylor, T. J., & Vaisman, I. I. (2010) Discrimination of thermophilic and mesophilic proteins. *BMC Structural Biology*, Vol. 10. No. S5.
- Tonkó C. M., & Pátzay G. (2012) A geotermális fluidumok energetikai hasznosítása során felmerülő problémák. *Ipari Ökológia*, pp. 5–20.
- Tóth A. N. (2017) Zala megye geotermikus viszonyai. *Műszaki Földtudományi Közlemények*, Vol. 86. No. 2. pp. 180–187.
- Tóth, J. (2009). *Gravitational systems of groundwater flow: theory, evaluation, utilization*. Cambridge University Press
- Ungemach, P. (2003) Reinjection of cooled geothermal brines into sandstone reservoirs. *Geothermics*, Vol. 32. No. 4–6. pp. 743–761.
- Willems, C. J., Vondrak, A., Munsterman, D. K., Donselaar, M. E., & Mijnlief, H. F. (2017) Regional geothermal aquifer architecture of the fluvial Lower Cretaceous Nieuwerkerk Formation—a palynological analysis. *Netherlands Journal of Geosciences*, Vol. 96. No. 4. pp. 319–330.
- Willems, C. J., Westaway, R., & Burnside, N. M. (2019) Hydraulic Connectivity in Pannonian Sandstones of the Mezőberény geothermal doublet. *European Geothermal Congress 2019*.