

Nem lehet mindenhol mindent, de mindenhol lehet valamit – A geotermikus energia hasznosításának lehetőségei a hazai ellátás diverzifikálása érdekében

Mádlné Szőnyi Judit* , Markó Ábel , Tóthi Tamara 

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

*Levelező szerző; e-mail: judit.szonyi@ttk.elte.hu

Beérkezett: Beérkezett: 2023. december 4.; elfogadva: 2024. január 30.; Online megjelent: 2024. március 25.

Összefoglalás

Magyarországon az energiaválság kapcsán előtérbe került a kedvező geotermikus adottságok kihasználásának szükségessége. A cikkben az európai geotermikus viszonyokból kiindulva mutatjuk be a hazai adottságokat, alkalmazható technológiákat. Az adottságok villamosáram-termelésre csak sporadikusan, magas kockázatok és technológiai fejlesztések mellett alkalmazhatók. Ugyanakkor az ország szinte teljes területén van lehetőség sekély geotermikus és hidrotermás készletek, valamint a hulladékhő további hasznosítására. A jövőben a termálvizek települési szintű, kaszkád rendszerű teljes körű hasznosítása lenne kívánatos. A fenntarthatóság kulcsa a lefűtött termálvizek nagyarányú visszasajtolása. A felszín alatti térrész, a különböző fluidumok és a bennük rejlő nyersanyagok hasznosítása kutatást és új, komplex szemléletet igényel.

Kulcsszavak: termálvíz, geotermikus energia, fenntarthatóság, termálvíz visszasajtolás, sekélygeotermia

Not everything anywhere, but something everywhere – geothermal to diversify the domestic energy supply

Judit Mádl-Szőnyi, Ábel Markó, Tamara Tóthi

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

Summary

The need to exploit the favourable geothermal potential has emerged in Hungary due to the war-induced energy crisis. In this paper, we present the geothermal conditions of Hungary with a European comparison. The elevated heat flux of the Pannonian Basin, thanks to the thinned lithosphere, provides beneficial conditions along with the thermal-bearing aquifers primarily for medium enthalpy resources. We detail the potential technologies applicable to exploit the various types of resources and the risks related to their utilisation. Although not all of the technologies can be applied everywhere in the country, our results show that shallow geothermal or hydrothermal utilisation is possible in the entire country, as well as the utilisation of waste heat from used water or natural springs. Assessing geological risks is a decision criterion in the project preparation phase: supporting the investment with lower geological risk leads to more successful projects and, simultaneously, helps to gain more knowledge about the geological formation. With high risks, Hungarian geothermal resources can only be used sporadically for electricity generation. Experience of ongoing international projects in enhanced geothermal systems should be gathered for the future use of deep basement resources. The main unconsidered potential in Hungary lies in the cascaded use of thermal water

at the municipal level, which can be a key in constructing low-carbon district and space heating systems combined with agricultural use. The unsolved research-intensive issue of sustainable exploitation is the extensive reinjection of cooled thermal waters, which prevents the overuse of slowly renewable resources. Developing this sector in Hungary regarding conventional and combined innovative exploitation of the subsurface space requires research and new complex approaches.

Keywords: thermal water, geothermal energy, sustainability, thermal water reinjection, shallow geothermal

Bevezetés, célkitűzések

Magyarország területe méltán híres termálvízlelőhelyeiről, melyek balneológiai célú felhasználása a történelmi időkre nyúlik vissza. Szanyi et al. (2021) a magyar geotermia történetében három korszakot különít el. A termálvizekben rejlő hőpotenciál kiaknázása a mélyfúrási technológia elterjedésével került előtérbe. A geotermikus energiára vonatkozó ismeretekben és a kiaknázásban az első jelentős mélyfúráások lemélyítésétől (1870-es évek) felemelkedést láthatunk egészen az 1990-es évekig. Ekkorra a gyógyfürdők és alkalmi épületfűtési rendszerek kialakítása mellett kiépült a termálvizek mezőgazdasági célú hasznosítása, a legnagyobb ezek közül a szentesi rendszer. Ebben a fejlődésben nagy szerepet játszott a szénhidrogén-feltárás, a meddő szénhidrogén-kutak termálvízkká történő átalakítása és energetikai célú hasznosítása révén. A következő korszakot sokkal inkább a gyógyfürdőfejlesztések inspirálták a rendszer-váltást követően. De ezekkel párhuzamosan fejlődött a geotermikus energia távhőrendszerekben történő hasznosítása is. 1994-től működik 18 MW_{th} kapacitással a hódmezővásárhelyi rendszer, de több kisebb rendszer is létesült a porózus pannóniai víztartó képződmények vizében rejlő hőpotenciál kiaknázására. A 2010-es éveket követően az alaphegységi víztározók geotermikus hőtermelési célú kihasználása is megkezdődött. Erre az időszakra tehető a visszasajtolás témakörének előtérbe kerülése a Magyar Tudományos Akadémia bevonásával, melyet élénk társadalmi-szakmai vita övezett (Mádlné Szőnyi et al. 2008). 2012-től bevezették a 2500 m-nél mélyebb geotermikus projektekre a koncessziós rendszert. A koncessziós pályázatok már részben kapcsolt hő- és villamosenergia-termelésre irányultak. E korszak eredménye az első hazai kis méretű ORC erőmű üzembe helyezése (Szanyi et al. 2021). A napjainkban üzemelő több mint 900 termálkút közül, jelentős hányad (>250) balneológiai és gyógyászati célokat szolgál. Kiemelkedő a mezőgazdasági célú hasznosítás is. A földhővel fűtött városok száma a 2019-es 23-ról folyamatosan növekedik, de az egyedi, főleg fürdők mellett üzemelő geotermikus fűtési rendszerek száma is meghaladja a 40-et (Tóth 2020).

A hosszú fejlődés ellenére a geotermikus energia az elsődleges megújuló energiahordozók termelésében és felhasználásában 6938 TJ értékkel még mindig csak 5%-ot (MEKH, 2023a) s az országos hőenergia-terme-

lésben mindössze 6,5%-ot tesz ki a 2022-re vonatkozó becsült adatok alapján (MEKH 2023b).

A geotermikus energia erőteljesebb bevonása az energiamixbe az Európai Bizottság 'Tiszta Energia mindenkinek' (2016) kezdeményezése nyomán létrejövő új Energiastratégia és a Nemzeti Energia és Klímaterv (NEKT 2020) célkitűzése szempontjából is fontossá vált. A geotermikus hő intenzívebb használata segíti az energiaszuverenitást és energiabiztonság megerősítését, valamint a dekarbonizációt, ezáltal Magyarország klímacéljainak megvalósítását. A földhő jól illeszkedik a megújuló energiaforrásokra alapozott fűtési és hűtési megoldások alkalmazásához, kiemelten a Zöld Távhő Program megvalósulásához, továbbá a közintézményi, ipari és mezőgazdasági, de egyéni családi házas igények kielégítéséhez is. Ezeket a tendenciákat gyakorlatilag szükségletté emelte a 2022-ben az ukrán háború miatt kialakult energiaválság, mely révén a geotermikus energia ismét a döntéshozók és a társadalmi érdeklődés középpontjába került.

A mai megnövekedett figyelmet tükrözi a Kormány 1509/2022. (X. 21.) Korm. határozata a geotermikus energiahasznosítással kapcsolatos intézkedésekről, ami egyrészt rendelkezik az engedélyezés és felügyelet egységes bányafelügyeleti hatáskörbe helyezéséről, az eljárás egyszerűsítéséről, a beruházások gyorsabb és szakmailag megalapozott előkészítéséről. Ehhez kapcsolódnak a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága elnöke közreműködésével elindított jogszabályi módosítások és a beruházások ösztönzését célzó törekvések.

A mára kialakult helyzet megkívánja, hogy a politikai döntéshozók, a befektetők és a végfelhasználók reális képet alkossanak a geotermikus energia és különböző technológiáinak magyarországi alkalmazási lehetőségeiről, azok földrajzi-földtani különbségeiről, a hozzájuk kapcsolódó feltárás, valamint a hasznosítás (áramtermelés vagy fűtés) lehetőségeiről és kockázatairól. Amikor geotermikus potenciálról beszélünk, fontos azt is definiálni, hogy milyen geotermikus potenciál kategóriáról van szó: elméleti, technikai, gazdasági, fenntartható vagy fejleszthető (Rybach 2010). De látnunk kell a kiaknázatlan lehetőségeket, a sekély mélységben rendelkezésre álló, továbbá a felszínre kerülő vízzel használatlanul elfolyó hőben rejlő potenciált. Végül, de nem utolsó sorban fel kell ismernünk a geotermikus energia kaskád rendszerű hasznosításával elérhető gazdaságos és fenntartható hőpotenciált.

Ezek az ismeretek nem csak kormányzati szinten fontosak, de elengedhetetlenek a települési önkormányzatok számára az energiaválság miatt kritikussá váló ellátásbiztonság és a költségtakarékosság szempontjából, hiszen az önkormányzatok számára elemi érdek, hogy a geotermikus energia beépülhessen a település-fejlesztési terveikbe.

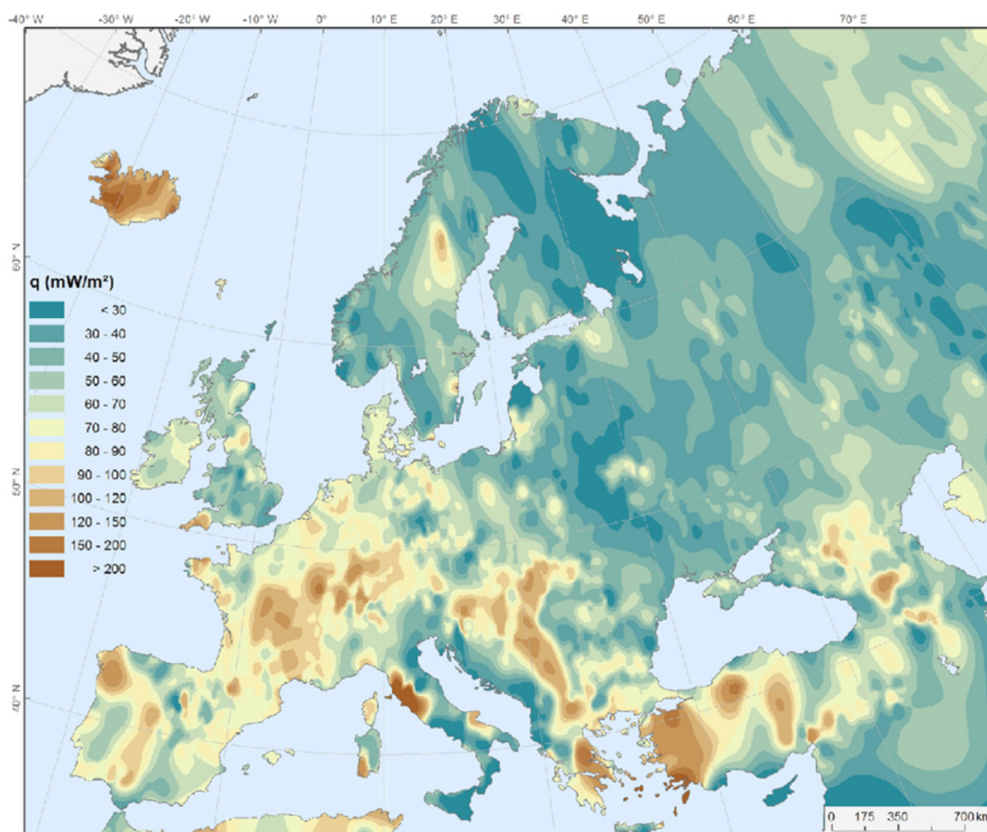
Nem elég ismerni a földtani és vízföldtani lehetőségeket és technológiákat, de számolni kell a feltárás kockázataival, hiszen ennek ismeretében lehet azok mérséklésén dolgozni. A hosszú távú fenntarthatóság, a vízben rejlő hőenergia 'körforgásos szemléletű' hasznosítása – azaz a visszasajtolás és a hőtartalom teljes körű kaszkád rendszerű kihasználása – is jelentős kérdés nemcsak környezeti, de az energiabiztonság, -takarékosság szempontjából és a hosszú távú kitermelés fenntartása érdekében.

A hazai legfrissebb kutatási és geotermikus fejlesztési eredményeket *Szanyi és munkatársai (2021)*, a hazai geotermikus projektek kezelhető kockázatait pedig *Tóth és munkatársai (2022)* tárgyalták egy-egy áttekintő tanulmányban. Ebben az összefoglaló munkában a hazai adottságok mellett az országon belüli, területileg eltérő technológiai lehetőségeket és a földtani kockázatok értékelési lehetőségét vázoljuk. Targyaljuk továbbá a fenntarthatóság és a 'körforgásos geotermikus hasznosítás' fontosságát, valamint a felszín alatti térrész komplex hasznosítását. A nemzetközi és hazai kutatási eredmé-

nyek mellett az értékelésbe bevonjuk az ELTE kutatóműhelyben született eredményeket. Végül összegezzük a tanulmány alapján levonható tanulságokat.

Magyarország geotermikus adottságai és a jellemző földhő hasznosítás európai összehasonlításban

Magyarország távol fekszik az intenzív magmás tevékenységgel jellemzett lemezhatároktól. Így az ország kedvező geotermikus viszonyai és az ebből fakadó lehetőségei sem hasonlíthatók össze például Izlandéval. Erre világít rá a geotermikus rendszerek ún. play szerinti besorolása (*Moock 2014*), mely a lemeztektonikai helyzetből indul ki. Ez ugyanis meghatározza a rendszerek genetikáját, a földtani viszonyokat: jellemző kőzettípusok, tektonikai rezsim, vetők és törések, hőáramsűrűség, vízföldtani jellemzők, fluidum áramlás és vízkémia. De egyúttal a lemeztektonikai környezet befolyásolja a kihasználás technológiai lehetőségeit is. A hasonló genetikájú geotermikus rendszerek működése hasonló kiaknázási módokat tesz lehetővé, míg az eltérők a kiaknázás tekintetében is különböznek (*1. ábra, 1. táblázat*). Európa felszíni hőáramsűrűség térképéből látható, hogy a kontinensen belül is nagy a változékonyság. A térképen bemutatott értékek $<30 \text{ mW/m}^2$ -től $> 200 \text{ mW/m}^2$ között változnak, a súlyozott átlag $55,1 \text{ mW/m}^2$ (*Chamorro et*



1. ábra | Európa felszíni hőfluxustérképe (forrás: *Chamorro et al, 2014*)

al. 2014). Európán belül Izland értékei kiemelkedőek, az átlagos hőfluxus 90–200 mW/m² (Chamorro et al. 2014). Az ország egy magmás-vulkáni geotermikus rendszer része a közép-óceáni hátság távolodó lemezei fölött. Itt a magastól az alacsonyabb hőmérsékletig többféle hidrotermás rendszer is megtalálható. Utóbbiak negyed, illetve harmadidőszaki képződményekben, előbbiek az aktív riftesedési zónában (Arnórsson–Axelsson–Semundsson 2008). A magas hőmérsékletű rendszerek 380 °C-nál nagyobb értéket is elérhetnek 2 km mélységben, míg az alacsony hőmérsékletű területeken is 175 °C-ot találunk ugyanebben a mélységben.

Magyarország egy széthúzásos vagy extenziós, üledékel kitöltött mély (5–7 km), úgynevezett ív mögötti medence, a Pannon-medence területére esik. Míg az előbb említett Izlandnál a magma a közvetlen hőforrás, addig hazánkban a késő-miocéntől elvékonyodott földkéreg (22–30 km, Horváth et al. 2006; Horváth et al. 2015), tehető felelőssé az átlagot meghaladó hőáram sűrűségért: 30–120 mW/m², átlagérték: 90 mW/m² (Lenkey–Mihályka–Paróczy 2021), szemben a kontinentális átlaggal, ami 65 mW/m² (Pollack–Hurter–Johnson 1993). Megállapítható, hogy a vázolt földtani körülmények mellett a hőmérsékletet nem csak a kőzetek hővezetése, hanem az áramló felszínalatti víz hőszállítása, a hőszigetelő képződmények jelenléte és a sűrűség különbségből adódó felhajtóerő is alakítja (Szijártó et al. 2021; Tóth–Galsa–Mádl–Szőnyi 2020).

Magyarország területén 500 m-en 40 °C, 1 km-en, 60 °C, 2 km-en 100 °C, 3 km-en 140 °C az átlaghőmérséklet. A modellezések a várható hőmérsékletet a mért értékeken túl a litoszféra aljáig is kiterjesztik (Békési et al. 2018; Lenkey–Mihályka–Paróczy 2021).

Ezzel szemben Finnország, a hőfluxus térképéből is láthatóan egyáltalán nem rendelkezik kedvező geotermikus adottságokkal. Ennek oka, hogy a Balti-pajzs területén fekszik, ahol a felszín közeli alaphegység paleozoós kőze-

tekből épül fel, melyet néhány méter vastagságban borítanak csak negyedidőszaki üledékek. Mivel az alaphegységi kőzetek porozitása és permeabilitása alacsony, a víztartalma is elenyésző, ez a földtani helyzet kizárja a geotermikus play kialakulását (Kukkonen, 2000). A hőfluxus mindössze 30–80 mW/m² (Chamorro et al. 2014). A hőmérséklet a felszín alatt 500 m-en is mindössze 8 és 14 °C közötti, és csak 1000 m mélyen éri el 14–22 °C-ot. A 40 °C-os hőmérsékletre pedig csak 1–1,5 km mélységben lehet számítani (Kukkonen, 2000). Ezek a kedvezőtlen adottságok a földhő hasznosítás ellen hatnak.

Az 1. táblázatból kiolvasható, hogy a körülmények különbözősége ellenére valamennyi országban zajlik geotermikus kiaknázás, bár eltérő mélységekből és technológiákkal. Míg Izland elektromos áramtermelésre is használhatja a földhőt a távhőhasznosítás mellett (Ragnarsson–Steingrímsson–Thorhallsson, 2020), addig Magyarországon az adottságok inkább a távhőrendszerben történő kaszkád, valamint a balneológiai hasznosítást támogatják (Szanyi–Nádor–Madarász 2021). A sekély-geotermikus földhőszivattyús kiaknázás hazánkban is lehetséges, de ma még alacsony szinten van. Ezzel szemben a finnek e tekintetben élen járnak, és intenzíven aknázzák ki a sekélygeotermia kínálta lehetőségeket (Lund–Toth 2021).

A különbségek arra is rámutatnak, hogy például az izlandi tapasztalatok – ahogyan sokan gondolnák – a geotermikus rendszerek működési eltérései miatt közvetlenül mégsem alkalmazhatók hazánk területén. A hazai geotermikus rendszer működésének és sajátosságainak megértése, a hasonló üledékes medencékről rendelkezésre álló nemzetközi tapasztalatok alapozhatják meg a hazai fejlesztési terveket és a rendelkezésre álló és megismert készletek fenntartható kiaknázását.

1. táblázat | Izland, Magyarország és Finnország geotermikus jellemzőinek és a fő hasznosítási módok összehasonlítása

Jellemzők	Izland	Magyarország	Finnország
Felszíni hőfluxus	90–200 mW/m ² (Chamorro et al. 2014)	30–120 mW/m ² (Lenkey–Mihályka–Paróczy 2021)	30–80 mW/m ² (Chamorro et al. 2014)
Átlagos geotermikus gradiens	0,05–0,15 °C/m (Flóvenz–Saemundsson 1993)	0,045–0,05 °C/m (Szanyi–Nádor–Madarász 2021)	0,01–0,015 °C/m (Arola 2019)
Fő hasznosítási módok	elektromos áram termelése, távhőrendszerek (Ragnarsson–Steingrímsson–Thorhallsson, 2020)	sekély geotermia, távhőrendszerek, balneológia (Szanyi, Nádor, Madarász, 2021)	sekély geotermia (Lund–Toth 2021)
Meglévő áramtermelési kapacitás (MW) (Sanner et al. 2022)	755	2,3	–
Direkt hőhasznosítás (MWth) (Sanner et al. 2022)	2470	1014	1
A sekély földhőrendszerek száma, 2021 EGC országjelentés (Sanner et al. 2022)	–	~8 000	~180 000

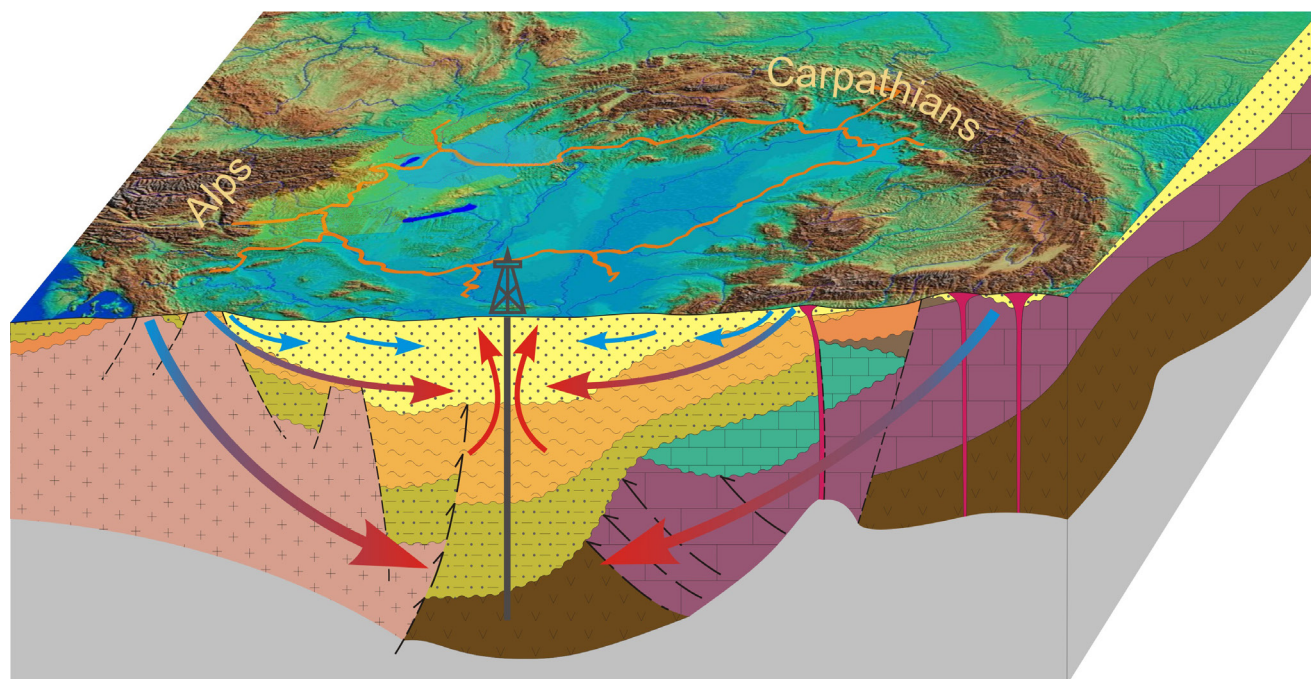
Magyarország sekély és mély geotermikus adottságainak áttekintése, a jellemzők területi különbségei az alkalmazható geotermikus technológiák szerint

A geotermikus jellemzők európai összehasonlításából látszik, hogy hazánk kiemelkedő adottságokkal rendelkezik a Pannon-medence területén belül. A földtani helyzetből adódó sajátosságok egyik fontos eleme, hogy Magyarország egy mély üledékes medencében fekszik, ami összetett földtani és szerkezeti felépítéssel jellemezhető (Horváth et al. 2015). A fluidumtároló geotermikus rezervoárok rendelkezésre állnak az ország területén a neogén porózus (homokkő) vízadókban és az idősebb, mezozoos karbonátos (dolomit, mészkő) medencealjzati képződményekben. A porózus medencebeli víztartókat kevésbé vízvezető agyagkővek tagolják és az aljzati magmás és metamorf kőzetek sem tekinthetők rezervoárnak. Mégis nagyon fontos sajátosság, hogy a hazánk területe alatt található vízvezető (rezervoár) kőzetek nem elszigeteltek egymástól, hanem a vízfogókon és szerkezeti elemeken keresztül a felszíntől több kilométer mélységig hidraulikailag összefüggő, ámde eltérő hőmérsékletű (a hidegtől a forróig terjedő) fluidumot tárolnak (Tóth–Almási 2001) (2. ábra).

A rendszerben a víz nagy része a csapadékból ered. A természetesen beszívargó víz mélyre áramlik, ott felmelegszik. A vízrendszer felső zónájában néhány száz, illetve más helyeken akár egy-két ezer méterig a fluidumot a vízszintek magasságkülönbségei mozgatják közel

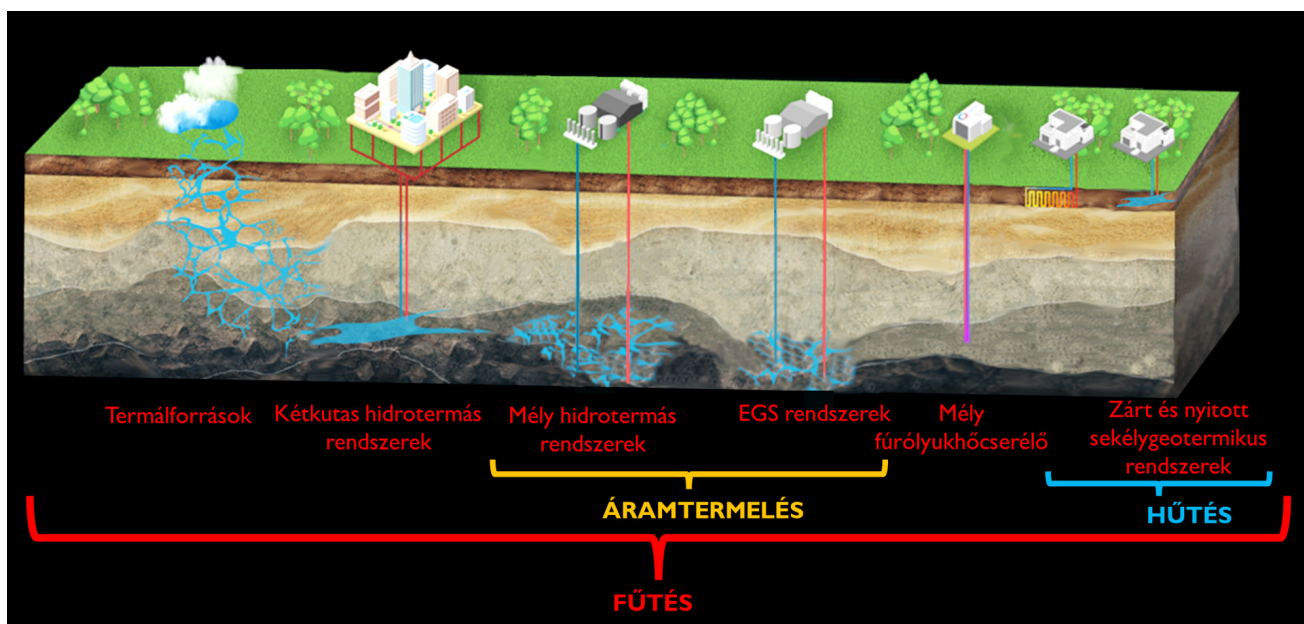
hidrosztatikus nyomásviszonyok mellett, míg mélyebben a regionálisan összefüggő vízfogó képződmények alatt többnyire erősen túlnyomásos rezervoárok találhatók (Alföld) (Czauner–Mádl–Szőnyi 2011; Czauner–Mádl–Szőnyi 2013; Czauner 2012; Horváth et al. 2015; Vass et al. 2018). A Pannon-medencében kevésbé jellemző, de alulnyomásos tározók (Paleogén-medence) is előfordulnak (Mádl–Szőnyi et al. 2019). Alföldjeink alatt a túlnyomás feláramlást generál a sekélyebb helyzetű víztartó-vízfogó rendszer irányába. A túlnyomás révén felszabaduló víz hozzáadódik a közel hidrosztatikus rendszer vizeihez, és természetes úton ezekkel együtt csapolódik meg párolgás útján vagy a felszínen, tavakban és folyókban (Mádl–Szőnyi–Tóth 2009). A karsztos hegységeink peremén fakadó termálforrások vize a kiemelt hegységekben utánpótlódik, és felmelegedve a termálforrásokban természetes úton jut felszínre (Mádl–Szőnyi et al. 2022).

Az utóbbi évek kutatásai alapján tudjuk, hogy a regionális vízfogó kőzetek felett a porózus homokkövekben és a fedetlen és részben a fedett alaphegységi karbonátos víztartókban a víz a csapadékból meg tud újulni, erre utalnak az izotóphidrológiai bizonyítékok (Varsányi–Kovács–Bálint 2015 etc.) mellett a közel hidrosztatikus nyomásviszonyok. A megújulás mértékének és pontos tartományának hidraulikai megértése azonban további kutatásokat igényel (Czauner et al. 2023). Ezzel szemben a mélyebb túlnyomásos tározókba a csapadékvíz semmiképpen nem tud természetes úton bejutni, így azokról feltételezhetjük, hogy nem megújuló vizet tartalmaznak (Mádl–Szőnyi–Simon 2016; Mádlné Szőnyi,



2. ábra

A Pannon-medence regionális határokon átnyúló termálvíz viszonyainak elvi vázlata: különböző medencebeli rezervoárok és vízfogók (sárga színárnyalatú), alaphegységi karbonátos víztartók (lila, zöld) és vízfogó képződmények (rózsaszín, barna); továbbá a felszíntől az aljzati összefüggő víz-áramlások (kék hideg, piros meleg) (Nádor 2019)



3. ábra | Alkalmazható geotermikus technológiák (módosítva: Magyarország geotermikus stratégiája 2023. január 31. közzétett ábra nyomán)

2019). Ezen rendszerek megértése kulcsfontosságú a termálvízkészletek a jelenleginél intenzívebb, ámde fenntartható hasznosítás érdekében.

A hazai termálvízrendszer a medence sajátosságaiból adódóan határon átnyúló víztesteket formál, így a szomszédos országokra érdemes odafigyelni a geotermikus tapasztalatok terén. Magyarország helyzete a Pannon-medencében egyúttal azt is meghatározza, hogy a határon átnyúló termálvízkészletek kiaknázása összehangolt kutatást és hasznosítást igényel az érintett országok között (Rotár-Szalkai et al. 2017; Rman et al. 2020; Szőcs et al. 2018).

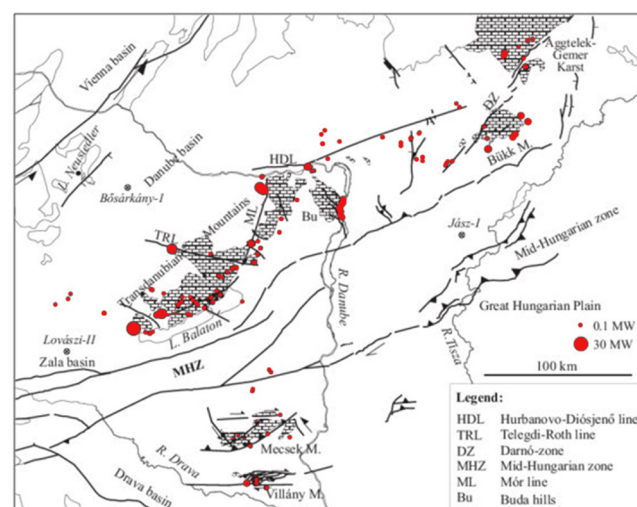
A hazánk területén alkalmazandó földhő technológiák igen széleskörűek, és a földfelszíntől több ezer méter mélyéig befolyásolják a régió gazdasági geotermikus potenciálját (Rybach 2010). A 3. ábra egyszerűsítve mutatja be a technológiákat a felhasználási lehetőségekkel (fűtés, hűtés, áramtermelés) együtt. A következőkben a felszín felől a mély régiók felé haladva a technológiák mentén mutatjuk be, hogy az ország mely régiója alkalmas az adott technológia használatára. Közben vázoljuk a lehetőségeket és a felmerülő és enyhítendő kockázatokat.

A felszíni és felszínközeli vizekben rejlő hőpotenciál

Ritkán említjük, hogy Magyarország termál- és langyos forrásai közvetlen természetes hozzáférést biztosítanak a felszín alatti térrész hőtartalmához (3. ábra). A térképen (4. ábra) piros körökkel jelzett pontokon láthatjuk a kihasználatlan potenciált a $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál (átlaghőmérséklet) melegebb források helyén. Ennek mértéke a Dunántúli-középhegység területén a legnagyobb ($3140\text{ MW}_{\text{th}}$), míg

a Mecsek-Villány (17 MW_{th}) és a Bükk (26 MW_{th}) pereménél alacsonyabb (Lenkey et al. 2002). Meg kell jegyezni, hogy Magyarországon csak a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál magasabb hőmérsékletű vizeket tekintjük termálvíznek. A termálforrások főleg a hegylábaknál találhatók a fedett és fedetlen karbonátos területek peremén, szerkezeti mozgások által befolyásolt zónákban (Mádl-Szőnyi-Tóth 2015). Ez a technikai potenciál csak helyben használható fel, amennyiben közeli hőpiac igényt tart rá. A hőtartalom hőszivattyú segítségével kinyerhető.

Az analógia alapján itt említhetjük a gyógyfürdők elfolyó termálvizének hőtartalmát. A fürdésre használt és elengedett termálvízből szintén jelentős hőmennyiség lenne kinyerhető. Erőss-Zsemle-Pulay (2015) számításai



4. ábra

Természetes, $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál melegebb források Magyarországon (Izápy 1997), karbonátos kőzetkibukkanások és vetők helyével. A piros színű körök a kifolyó vizek hőpotenciáljával arányosak (Lenkey et al. 2002)

alapján négy budapesti termálfürdő elfolyó vizét 5 °C-ra lehűtve 0,11 és 9,04 MW_{th} közötti hő nyerhető. A budapesti elfolyó források (ma már nem források, hanem kutak vizét használják a fürdők) és a termálfürdők medencevizeiben rejlő együttes elméleti hőpotenciált a szerző 25 MW-ra becsülte. Ez az a vízmennyiség, amely hőtartalmának kinyerése nem igényel további termálvíz kivételt, ami fenntarthatósági szempontból kedvező. Ugyanakkor a hőforrás helyhez kötöttsége csak lokális hasznosítást tesz lehetővé. De láthatunk erre jó példát, hiszen megindult a Széchenyi Gyógyfürdő elfolyó vizének hőtartalmának állatkerti hasznosítása fűtési és használati melegvíz előállítására céljából. Ezt az eddig kiaknázatlan lehetőséget országos szinten szisztematikusan is érdemes megvizsgálni, és ahol lehet, alkalmazni. Az analógiát tovább folytatva a háztartási szennyvizek és ipari folyamatok szennyvizei is jelentős, eddig még nem kellőképpen kihasználható hőpotenciált jelentenek a környező felhasználóknak.

A nyitott hőszivattyús rendszerek is ebbe a körbe tartoznak, melyek a tavak, folyók vizének hőtartalmát hasznosítják. Itt lényegében a napenergia által felmelegített víztestek hőtartalmát aknázzuk ki. Hazánkban is lehetőség van vízkutas hőszivattyús rendszerek telepítésére, melyekkel a sekély felszín alatti víz (< 30 °C) hőtartalmát aknázzuk ki. Ezek a víztestek már napenergia és földhőt is raktározhatnak. Ezeknél az energia a kutakon keresztüli vízkinyerés útján hasznosul, majd ezt követően szintén kutakon juttatjuk vissza a lehűlt vizet a felszín alá. A létesítés feltétele a jó vízvezető (lehetőleg kavics) réteg felszínközeli jelenléte megfelelő kiterjedésben és vastagságban. E rendszerek előnye, hogy a kinyert energia nemcsak a hővezetésből származik, hanem a víz hőszállításiából is, ezáltal hatékonyabb energianyerést tesznek lehetővé. A technológia alkalmazásának a felszínközeli kavicsüledékek elterjedése szab gátat. Ugyanakkor a vízkitermelés miatt ezeknek a rendszereknek nagyobb a környezeti kockázatuk, mint a zárt rendszereké.

Zárt rendszerű sekély földhőhasznosítás

A sekély felszín alatti térrész (100–200 m mélység) hőtartalmát zárt rendszerben, vízkitermelés nélkül is kiaknázzuk egy másodlagos munkafolyadék keringetésével, talajkollektoros rendszerek vagy földhőszondák segítségével és földhőszivattyúk bevonásával. A talajkollektorok a talaj felső rétegeiben (1,5–2 m mély) tárolt napenergiát (részben földhő) hasznosítják vízszintesen fektetett – nagy felületen elhelyezett – kollektorok segítségével. Mivel ezen rendszerek alacsony hőmérsékletű felszínközeli készleteket használnak fel, telepítésüket kevésbé befolyásolja a geotermikus adottságok, sőt geotermikus szempontból kedvezőtlen területeken is létesíthetők. Amennyiben csak egy irányban, például fűtésre használjuk azokat, vagy tervezésük nem szakszerű, akkor előidézhetik a talaj felső rétegeinek túlzott lehűtését.

A másik típust a földhőszonda rendszerek képviselik. Ezeknél a hőcserélő csövet függőleges furatokba helyezük bele, melyek zárt rendszerben, konduktív módon vesznek át a környező kőzetek és víz energiáját. A furatok az ország csaknem minden, eltérő földtani felépítésű területén kialakíthatók. A hőkinyerés a környező kőzet hővezető képességétől, nedvességtartalmától és a felszín alatti vízáramlás többlet hőszállításának mértékétől, valamint a szonda paramétereitől függ. A mélység korlát fennállása esetén a hőteljesítmény a szondaszám növelésével fokozható.

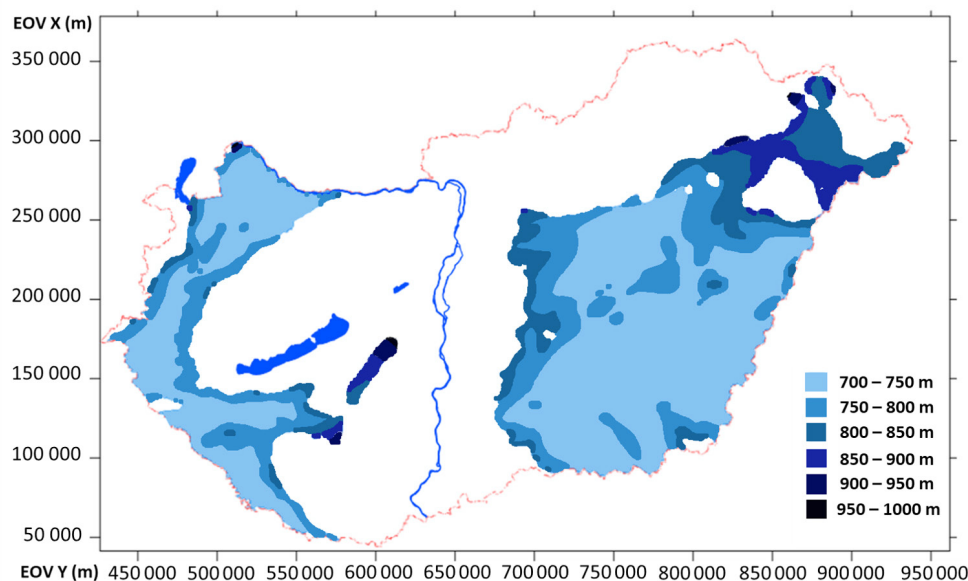
Mivel a földhőszondáknál nincs vízkitermelés, a kapcsolódó létesítési és földtani kockázat alacsony. E rendszerek előnye, hogy nemcsak fűtésre, hanem hűtésre is alkalmasak, amely révén kvázi hőátvitelt és hideg tárolást valósítunk meg, ez pedig garantálhatja a hosszú távú fenntarthatóságot. A városok hőszigetelése növelheti a hatékonyságot (Menberg et al. 2013; Bayer et al. 2019; Buday et al. 2019). A legújabb szakirodalmi adatok alapján a földhőszondák jól alkalmazhatók az 5. generációs távfűtésben és -hűtésben, melyek nagy méretű hőszivattyús rendszerként kezelhetők, szezonális felszín alatti hőtárolással, alacsony rendszerhőmérséklettel (Lund et al. 2021).

A sekélygeotermikus készletek fenntartható kiaknázása is csak a készletek eloszlásának pontos megértésén alapulhat, melyet a sekélygeotermikus potenciálbecslés tesz lehetővé. Ennek segítségével becsülni lehet a fenntartható módon kinyerhető hőmennyiséget. Korhonen és munkatársai (2023) egy új „végtelen fűrólyuk hőcserélő” modellt alkalmazva a fűrólyuk hőcserélők egymásra hatását is figyelembe véve egy budapesti mintaterületet vizsgáltak a technikai potenciál (Rybach 2010) meghatározására. A végeselemes numerikus szimuláció segítségével a termogeológiai paraméterek alapján megadható volt a tervezés és méretezés fázisa előtt a fenntartható módon kitermelhető hőenergia értéke úgy, hogy a fűrólyuk fala ne hűljön fagypontra alá. Ez a módszertan egy egészen más földtani felépítésű területen is bizonyította alkalmazhatóságát – a Duna–Tisza közti Kerekegyháza – a sekélygeotermikus potenciál megállapításához (Stieber 2023).

Hidrotermás rendszerek porózus rezervoárookban

Hazánkban a legjelentősebb fejleszthető potenciált a termálvízalapú, hidrotermás geotermikus rendszerek jelentik. A legkönnyebben hozzáférhető hidrotermás készlet porózus kőzetekben, néhány száztól több ezer méter vastagságig terjedő pannóniai korú homokkővekben található (Nádor et al. 2019). A potenciális rezervoárok lehatárolására módszert is kidolgoztak (Rotár-Szalkai et al. 2018). E rendszerek fenntartható kiaknázása termelő és lehetőség szerint (balneológiai hasznosítást kivéve) visszajuttató kutak működtetésén alapulhat.

A hegyvidéki régiókban teljes mértékben hiányoznak az ilyen típusú permeábilis sziliklasztos képződmények.



5. ábra | A porózus, termálvizet tároló képződmények tető mélysége 50–75 °C-os hőmérséklet elérése mellett (saját szerkesztés, adatok forrása: OGRE)

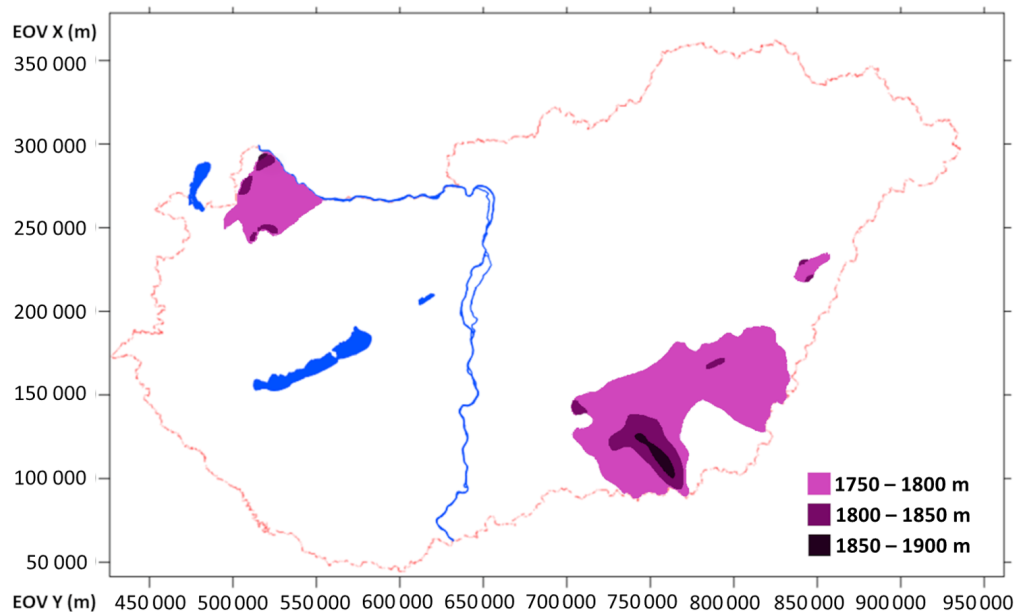
A másik korlátozó szempont, hogy ahol rendelkezésre állnak a porózus rezervoárok, ott is csak az ország egy részén éri el a belőlük kitermelhető víz a közvetlen hőhasznosításhoz elégséges hőmérsékletet. A világoskék árnyalatokkal jelölt területeken már 700–750 m mélységben elérjük ezt az 50–75 °C-os hőmérsékleti tartományt (5. ábra). A porózus hidrotermás készletek előnye, hogy földtanilag ezek a leginkább ismertek és fűréssal a legkisebb költség mellett elérhetők. A hazai múltbéli termálvíz-kihasználás is jelentős részben ezekre épült.

A magasabb becsült hőmérséklet (100–125 °C) a mélyebb pannóniai porózus víztartó képződményekben már

csak korlátozott területeken, 1800 m alatt a lilával jelölt zónákban érhető el (6. ábra).

A hódmezővásárhelyi geotermikus rendszer egy része 600–650 m mélységből 30–32 °C-os vizet használ (Szanyi–Kovács 2010). De ugyanitt 1000–1500 m mélységből 45–66 °C-os, míg 1800–2500 m mélységből 75–90 °C-ot termálvizet termelnek kis nyomású visszajuttatás mellett. A rendszer működése hozzájárul a város lakásainak és középületeinek fűtéséhez és a kommunális melegvíz ellátásához a földgáz kiváltásával.

A tradicionális hazai termálvíz-hasznosítás fő központja az 1950-es évek vége óta Szentes és környéke.



6. ábra | A porózus, termálvizet tároló képződmények tető mélysége 100–125 °C-os hőmérséklet elérése mellett (saját szerkesztés, adatok forrása: OGRE)

Részen 60 °C feletti, részben 90 °C-os vizet termelnek itt nagyszámú kúton keresztül. Ezt kezdetben kommunális fűtésre, használati melegvíz előállítására és balneológiai célokra használták, de azóta az agrárhasznosítás (üvegház, fóliasátras) került a középpontba (Szanyi *et al.* 2013). Az elsődleges mezőgazdasági hasznosítás mellett azonban továbbra is közintézményeket és lakásokat fűtenek kaskád rendszerben (Nagyfal 2011). A tradicionális hasznosítás fenntarthatósága azonban a visszasajtolás mellett lenne garantált. A termálvíz jelenlegi, felszíni elhelyezése tározó tavakban ökoturisztikailag támogatott, de termálvíz-készletgazdálkodási szempontból vitatható.

A porózus rezervoárokból történő jelenlegi geotermikus célú hasznosításokról sporadikus információkkal rendelkezünk, főleg Hódmezővásárhely, Szeged és Szentes vonatkozásában (Szanyi–Kovács 2010). De széles körben publikált adatok és tapasztalatok, melyek a termelési, visszasajtolási, víztermelési és hőhasznosítási adatokat és a környezeti hatásokat átfogóan és valamennyi hidrotermás porózus rendszerre kiterjedően országosan elemezték volna, nem készültek. Így ezekre a tapasztalatokra nem lehet építeni, amikor további fejlesztéseket tervezünk.

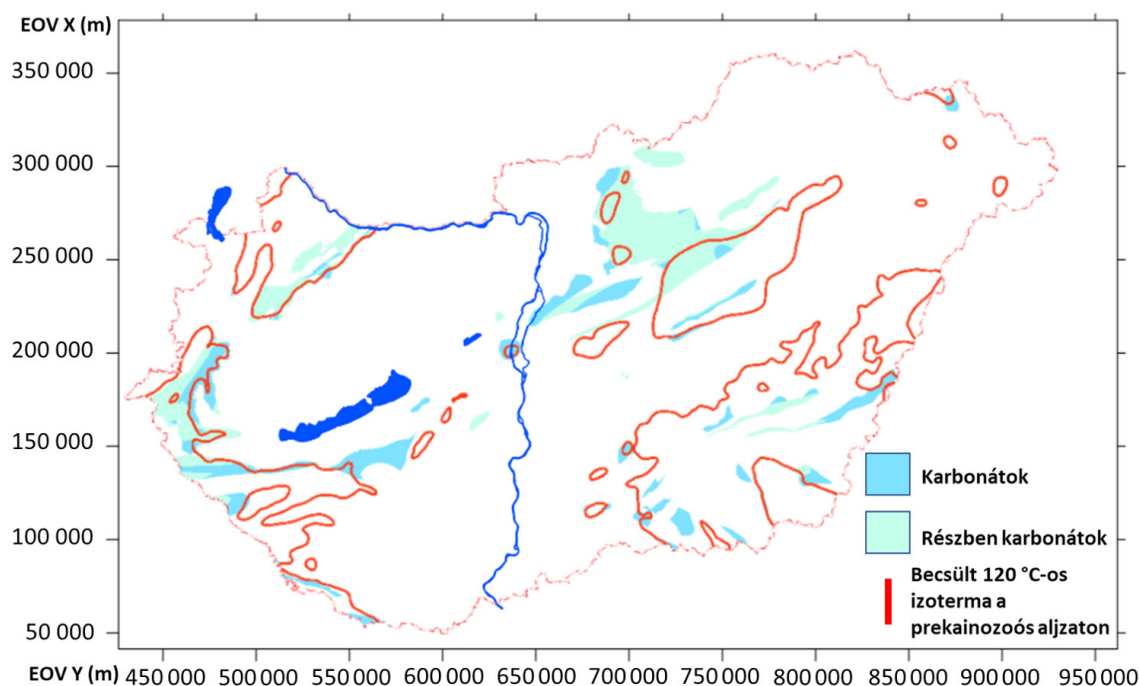
Ugyanakkor a lehetőségeket jelzi, és optimizmusra ad okot, hogy Szegeden 2023 májusában átadták Európa – Izlandon kívüli – legnagyobb geotermikus fűtési rendszerét a Szegedi Távfűtő Kft., a Geo Hőterm Kft. és a Nemzeti Fejlesztési Programiroda Kft. együttműködésében. Itt a pannóniai korú képződményekből 90 °C-os termálvizet termelnek 1700–2000 m között szűrőzött kutakból, melyek kilenc távfűtőrendszert látnak el 9 termelő és 18 visszasajtoló kút üzemeltetésével. A rendszer

mára a 27 kútból, 16 fűtőműből és 250 km-es elosztó hálózattal áll. 28 000 lakóházat és 400 középületet látnak el földhővel (European Commission, Regional Policy, Newsroom 25 May 2023).

Hidrotermás rendszerek alaphegységi karbonátos rezervoárokból

A másik lehetőség, hogy alaphegységi karbonátos képződményekben (rezervoárok) hozunk létre mély kútpárokat. A karbonátos kőzetek területi elterjedése az alaphegységben azonban korlátozott. Az áramtermeléshez szükséges 120 °C-os hőmérséklet (piros: izoterma) elérése ezekben a karbonátokban (kék: karbonát, zöld: részben karbonát) szintén csak korlátozott területeken lehetséges (7. ábra). Emellett kihívást jelent az is, hogy megfelelő törésrendszereket találjunk a kőzetben a kútkiképzéshez, valamint, hogy az abnormális nyomásviszonyokat (túlnyomás vagy alulnyomás) megfelelően kezeljük, illetve elkerüljük.

Hazánkban Miskolcon (kapacitás: 55 MW_{th}) és Győrben (kapacitás: 52 MW_{th}) karbonátos alaphegységi kőzetek hőtartalmát használják ki geotermikus kútpárok segítségével, de nem áramtermelésre, hanem távfűtési célból (Szanyi–Nádor–Madarász 2021). Az országban működő egyetlen áramtermelő geotermikus egység Túrán szintén karbonátos alaphegységből nyeri ki a 125 °C hőmérsékletű forró vizet, melyet ORC (Organic Rankine Cycle) technológiával hasznosít. A rendszer beépített teljesítménye 2,7 MW_e, de ebből 0,4–0,8 MW_e önfogyasztás (Hernecky 2022; Nádor *et al.* 2019).



7. ábra | Karbonátos aljzat képződmények 2500 m-nél mélyebben a becsült 120 °C-os izotermával (saját szerkesztés, adatok forrása: OGRE)

Petrotermás rendszerek: EGS

Ahogy láttuk, Magyarországon bőven rendelkezésre állnak természetes hidrotermás rezervoárok, de kiváló adottságaink vannak petrotermás, azaz kis permeabilitású, forró kőzetek energiataartalmának kiaknázására is (Chamorro et al. 2014) (8. ábra). Az EGS (Enhanced Geothermal System), azaz mesterségesen feljavított geotermikus rendszereket kis permeabilitású kőzetekben (gránit, gneisz) hozzák létre technológiailag többféle változatban (Patel 2023). Az EGS alkalmazása során az alaphegység 4–6 km-es mélységében, ahol az áramtermeléshez szükséges magas hőmérséklet (150–200 °C) már elérhető, kúton át nagy nyomáson vizet sajtolnak be, melynek köszönhetően a rezervoárokat mesterségesen fejlesztik tovább. A rendszer működtetése során a felszínről a kútba bejuttatott hideg víz a környezet hőmérsékletének felvétele után egy másik kúton termelhető ki, és áram- és kapcsolt hőtermelés céljaira felhasználható.

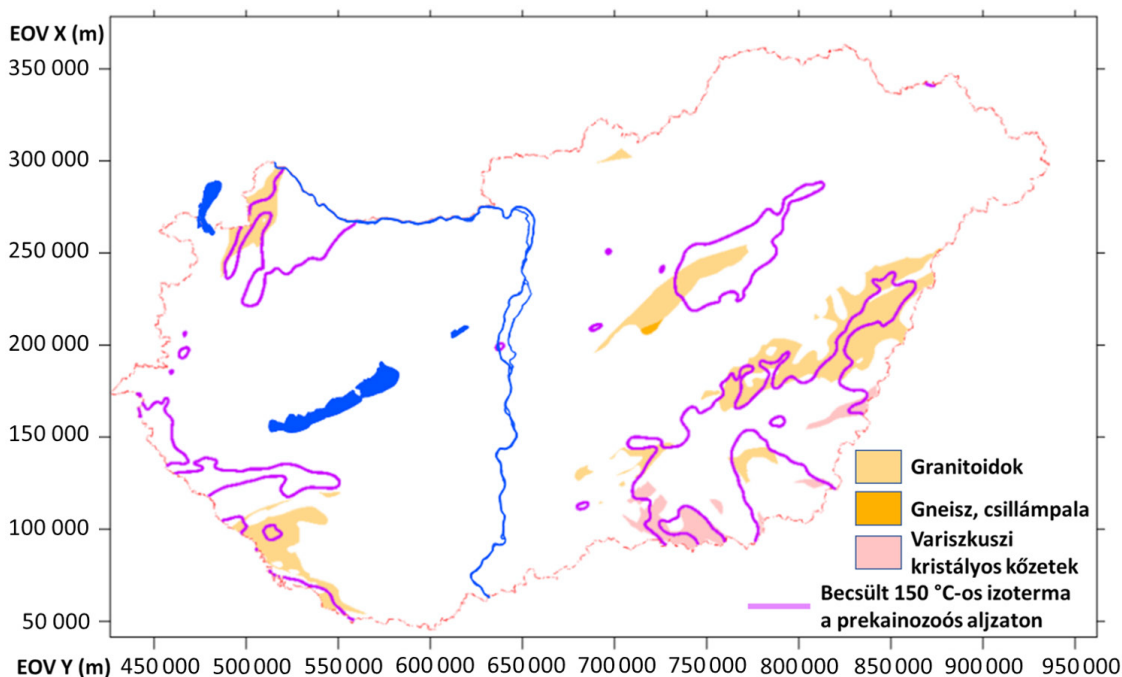
A mérnöki eszközökkel – hidraulikus, továbbá termális és kémiai stimuláció révén – feljavított geotermikus rendszerek tehát lehetővé tehetik az áramtermelést. Ugyanakkor kiemelten kockázatosak, ahogyan ezt az ígéretesen induló, ámde időközben ellehetetlenült 9,8 MW_e kapacitással tervezett mezőkovácsházi projekt is mutatja (Garrison et al. 2016). Problémát okozhat, hogy a rezervoár kialakításához nagy nyomáson besajtolt fluidum megbonthatja a kőzetmechanikai egyensúlyt a felszín alatt és földrendések kipattanásához vezethet. A leg híresebb – egyben a legnagyobb erősségű, és legtöbb felszíni kárt okozó –, geotermiához köthető földrendések – Bázeli Svájc 2006: 3,4 magnitúdó (Mignan et al. 2015) és Pohang, Dél-Korea 2017: 5,5 magnitúdó

(Kwang-Il Kim et al. 2018) – is EGS rendszerek létrehozásakor pattantak ki. A ma még ipari kísérlet szintjén működő EGS technológia tehát geológiai és környezeti kockázatai miatt ma még nem piacérett (Szanyi-Nádor-Madarász 2021).

A koncepciót nemzetközi szinten továbbra is kutatják, a közelmúltban is születtek ígéretes új eredmények, így a nevadai Fervo Energy projektje a „hagyományos komplex repedéshálózat” létrehozásának koncepciója helyett egy kútpár horizontális szakaszán több zónás stimulációval hozott létre sikeresen összeköttetést a termelő és besajtoló kutak között (Norbeck-Latimer, 2023). De már létezik az AGS (Advanced Geothermal Systems) továbbfejlesztett technológia, ahol mesterségesen kialakított zárt hőcserélőkben keringetett munkafolyadékot használnak, vagy a Hybrid Geothermal Systems, ami kombinálja az EGS-t és az AGS-t (Patel 2023).

Petrotermás rendszerek: mély fűrólyuk hőcserélők

Egy másik petrotermás megoldás a mély fűrólyuk hőcserélők alkalmazása, melyeknél szintén egy – a fűrólyukban keringetett munkafolyadék – felelős a furat környezetéből felvett hő felszínre hozásáért, a felszín alatti fluidumokkal való érintkezés nélkül (Piipponen et al. 2022). Ezek kisebb kapacitásúak, mint hidrotermális társaik, de kisebb kockázat kíséri telepítésüket és működésüket a termálvíz-hasznosító kutakhoz képest. Ezért ígéretesek lehetnek a „száraz”, nem megfelelő hozamot biztosító fűrólyukokban történő kialakítással az egyébként felmerülő veszteségek csökkentésére (Keiser-Butti 2015). E megoldás használható a vízkitermelésre kimagaslóan



8. ábra | Magmás és metamorf kőzetek 2500 méternél mélyebben, a becslített 150 °C-os izotermával ábrázolva (saját szerkesztés, adatok forrása: OGRE)

érzékeny, de jó geotermikus adottságokkal bíró területeken (Kalmár–Medgyes–Szanyi 2020). Ezzel a technológiával a felhagyott vagy szénhidrogénre meddő kutak is hasznosíthatók hőtermelésre, melyre kísérletet tett a WeHeat Projekt (Szekszárdi et al. 2022).

Felszín alatti hőtárolás

A geotermikus energia hasznosításához szorosan kapcsolódik a felszín alatti hőtárolás lehetősége is, melynek egyik lehetséges módja az ATES (Aquifer Thermal Energy Storage), azaz a hőenergia-tárolás víztartó rétegben (Bloemendal–Jaxa–Roženc–Olsthoorna 2018). Az ATES a szezonális hőenergia-tárolás (Xu–Wang–Li 2014) egyik típusa, mely évszaktól függő energiatárolást, a „hőtöbblet” vagy a „hőhiány” több hónapig tartó tárolását jelenti. Jelentőségét az adja, hogy a hőenergia összegyűjtésének és felhasználásának ideje időben elkülönülhet. Ennek Magyarországon azért lehet a jövőben nagy jelentősége, mert a mérsékelt éghajlaton létesített épületek általában hőtöbbletet mutatnak nyáron, télen pedig hőhiányt. Ahol megfelelő kapacitású víztározók, víztartó rétegek találhatók a felszín alatt, ez az eltérés kihasználható a szezonális nyári pozitív hőmennyiség és a téli negatív hőmennyiség felszín alatti tárolásával és visszanyerésével. Ez a technológia várhatóan Magyarországon is sok helyen alkalmazható lesz a jövőben, első sorban az alföldi területeken.

Geológiai kockázatok, a visszasajtolás és fenntarthatóság problémaköre

A lehetőségek és a hazánkban alkalmazható technológiák bemutatása után tárgyalni szükséges a földtani kockázat kérdését és a visszasajtolás problémakörét.

Földtani és technológiai kockázatok

A kockázatok azonosítása, értékelése és kezelése az erőforrások kiaknázása során minden esetben fontos. Szükséges a kockázatok nyomon követése és ellenőrzése a kedvezőtlen események valószínűségének csökkentése érdekében (Tester et al. 2016). Az ENSZ keretrendszer alkotta a különböző típusú energia- és ásványi nyersanyagok osztályozására (UNFC) a fenntartható fejlődési célokkal (Sustainable Development Goals SDGs) összhangban, beleértve a geotermikus energiát is (UNFC-IGA 2022). Ez a megközelítés a tervezett projektek összes gazdasági, társadalmi, technológiai és kockázati szempontjait holisztikus módon kezeli.

A geotermia a földtani kockázatok tekintetében is támaszkodhat a fosszilis energiahordozók, ezen belül is a szénhidrogénipari tapasztalatokra. A szénhidrogén-kutatásban létezik általános elv a geológiai kockázatok és a geológiai valószínűség értékelésére, elemzésére, melyet a

gyakorlatban már jó ideje alkalmaznak (Ruffo et al. 2006). Ennek mintájára született meg az az elképzelés, miszerint a geotermikus kockázatok elemzésére is használni lehet hasonló módszereket (Witter–Trainor–Guitton–Siler, 2019; Maury et al. 2022). A szénhidrogénipari kockázatelemzést értelemszerűen át kell alakítani úgy, hogy azt a geotermikus rezervoárok által kívánt koncepcióhoz igazítsuk.

Magyarországon Szilágyi (2023) vezetett be ilyen módszert. A földtani kockázatot a kedvezőtlen földtani viszonyok (nem technikai) bekövetkezéseként definiálja, amit a kedvezőtlen kimenetű sztochasztikus geológiai esemény valószínűségeként értelmez. A geológiai valószínűség vagy a siker valószínűsége (probability of success – POS) a szénhidrogénipar gyakorlatából adaptálva a projekt sikerének geológiai esélye. Az 1-es POS geológiai kockázat érték a sikertelen kút fúrásának esélyét fejezi ki, ami a befektetési költségek elvesztését jelenti. A feladat a POS kvantifikálása és értékelése a geotermikus létesítmény (termelő, visszasajtoló kút) létesítése előtt a vizsgált geotermikus rendszeren belül.

Az értékelés folyamata szerint a geológiai kockázatok egymástól független valószínűségekre bonthatjuk úgy, hogy egyes meghatározó elemekre, paraméterekre valószínűségi eloszlást adunk. Ilyenek a hidrotermális rendszerek esetében: a rezervoár (tározó) létezése, a rezervoár minősége, a rezervoárban tározott víz kémiai minősége, hőmérséklete, illetve a visszasajtolás feltételeinek megvalósulása. Ezekből az eloszlásokból pedig megbecsülhető, hogy mekkora valószínűséggel érik el az egymástól független paraméterek a kívánt valószínűségi értékeket. A független valószínűségek összeszorozásával kaphatjuk meg a végső valószínűséget, mely kvalitatív osztályozás alapján (nagyon valószínűtől a nagyon valószínűtlenig történő besorolás) már előre jelzi a projekt sikerességének valószínűségét (Szilágyi 2023).

A cél, hogy egy egységes számítási módszer eredményeként kvantitatív alapon tudjunk rangsorolni különböző lehetséges geotermikus területeket vagy projekteket. A nagyobb valószínűséggel sikeres projektek így előrébb rangsorolódnak, a kisebb valószínűséggel sikeres projektek viszont hátrébb kerülnek a rangsorban. Ez a megközelítés abban segít, hogy amennyiben korlátozott a támogatható projektek száma, vagy az összberuházás pénzbeni értéke, akkor célszerű a rangsorban elől szereplő projektek kiválasztása.

A hidrotermális rendszerekre vonatkozó geotermikus kockázatelemzés során figyelembe vett paraméterek közül az egyik legfontosabb szempont a hőmérséklet előrejelzése adott pontokra és mélységekben. Példaként megemlíthetjük, hogy porózus víztartókra ez jól előre jelezhető. Budapesten, egy mély karbonátos rezervoárban ugyanakkor a becslés valószínűségét csökkenti, hogy a hőterjedés dominánsan nem hővezetés útján történik, hanem meghatározó szerepe van a víz által szállított hő-

nek, sőt a sűrűségkülönbségből adódó felhajtóerő miatti szabad konvekciónak is (Szijártó et al. 2019; 2021). Mivel itt a hőmérséklet-closzlást összetett folyamatok szabályozzák, ezért a várható hőmérséklet előrejelzése a komplex hőtranszporttal jellemzett területeken kisebb valószínűséggel lehetséges.

A lehűlt termálvíz visszasajtolása és a fenntarthatóság

A kizárólag energetikai célból használt termálvíz visszajuttatása a termelt rétegbe a hosszú távú energiahasznosítás záloga, hiszen ennek hiányában a termelés nem minősül megújulóenergia-hasznosításnak. Hazánkban jelenleg 84 visszasajtoló kút működik (Nádor 2023), ami összehasonlítva a több mint 900 db üzemelő termálkúttal, országosan alacsony szám. A visszasajtolás hiányának már nemcsak lokális, hanem regionális léptékben is megnyilvánul a hatása, például Szentes térségében a potenciometrikus szint több tíz méteres csökkenésében (Kovács–Szanyi 2010; Bálint–Szanyi 2015). Mivel a termálfürdőkben használt fürdővíz nem sajtolható vissza, a kizárólag energetikai célú projektek tekintetében még nagyobb a szükség az utánpótlódás mennyiségi javítására. A Vízeretírányelv szerinti visszasajtolási kötelezettség alóli mentesség – melyet az elmúlt évtizedben többször meghosszabbítottak – 2027-ig tart, ezt követően csak egyedi mentesség lesz kérhető.

A porózus kőzetekbe történő visszasajtolás nehézségeinek geológiai és technológiai szempontjait számos hazai projekt vizsgálta és elemzi jelenleg is. A Szegedi Tudományegyetem az InnoGeo Kft.-vel és a Szegedi Távfűtő Kft.-vel közös kutatás-fejlesztési projektjei elméleti (visszasajtolási módszertan, részterületek részletes földtani-vízföldtani modellezése, kőzet-víz kölcsönhatás, kémiai és biológiai folyamatok) és kivitelezési-ipari gyakorlati tapasztalatokat (vízkezelési technológiák, kútkiképzés, felszíni rendszerek, szivattyúzási tesztek) ötvözik. A Pécsi Tudományegyetem Rotaqua, Kőmérő és Mecsekérc Zrt.-vel közös GINOP projektje a rétegtárolások vizsgálata mellett új kútkiképzési módszertant és a hidraulikus stimuláció speciális módját (Frac&Pack) dolgozta ki és alkalmazta szentesi mintaterületen (Nádor 2023; Koroncz et al. 2022). Mindemellett lényeges, hogy a problémákat megelőzendő, a földtani-vízföldtani kérdéseket a lokális mellett rezervoár léptékben és regionálisan is értékeljük (Markó–Mádl–Szőnyi–Brehme 2021), lehetővé téve a visszasajtolási potenciál előzetes értékelését (Markó et al. 2023).

A visszasajtolás mellett a geotermikus fluidumok kémiai összetétele is befolyásolja a hosszú távú fenntartható használatot. A REFLECT projekt ezt vizsgálja annak érdekében, hogy európai szinten kínáljon ajánlásokat a geotermikus rendszerek fenntartható használatára (Bregnard et al. 2023).

A felszín alatti térrész komplex hasznosítása: fenntarthatóság és 'körforgásos geotermikus hasznosítás'

A fenntarthatóság kérdését a termálvíz-kitermelés és -visszasajtolás vonatkozásában érintettük. A 21. században a klímaváltozás árnyékában a fenntarthatóságot gyakran a használat dekarbonizációjával, azaz az energiaforrás karbonsemlegességével egyenértékűnek kezeljük. Azonban a fenntarthatóság önmagában nem egyenlő a környezeti fenntarthatósággal, emellett a gazdasági és társadalmi fenntarthatóságot is el kell érünk. Amennyiben a geotermikus tevékenység finanszírozhatatlanná válik, nem tekinthető fenntarthatónak (Osvald 2021). A geotermikus rendszerek magas beruházásigénye vagy a gazdaságos működtetés hiánya akadályozza a fenntarthatóságot. Ebben nyújthat újat a geotermikus projektekhez egyre többször kapcsolt nyersanyagtermelés. Az oldott anyagok felszínalatti vizekben való dúsulása a termálvíz-hasznosítás esetén kihívást jelent, azaz a múltban inkább gátolta a hasznosítást. A kutakban és a szerelvényekben létrejövő ásványi kiválások, illetve a kitermelt nagy oldottanyag-tartalmú fluidum felszíni elhelyezése pedig környezeti kockázattal jár.

A fluidum magas oldottanyag-tartalmára új nézőpontból tekintve gazdasági előnyt jelenthet, ha fémek, illetve egyéb értékes elemek forrásként felhasználhatók (Bobok–Tóth 2005). A geotermikus és nyersanyag-termelési projektek összekapcsolásának előnye a költségek megosztásának lehetősége. A geotermikus hasznosítás során mindenképpen kitermelésre kerül a termálvíz, a hasznosítható anyagok kinyerése csak egy további vízkezelési fázisként épül be a projektbe, egyfajta kaszkád rendszerként (Bakane 2013). Továbbá, a geotermikus projektek által mozgatott víz nagy mennyiségének köszönhetően, viszonylag kis hasznos koncentrációval is értékelhető mennyiségű nyersanyag termelhető ki (Bourcier–Lin–Nix 2005). Hazánkban ezzel a szemlélettel indult el a CHPM2030 projekt, melynek célja kombinált hő, áram és fémkitermelés ultramély ércetekből (Hartai–Bodó–CHPM2030 Team 2017).

A kinyerhető nyersanyagok és fémek közül az elmúlt években a legfőbb figyelem a geotermikus lítiumra irányult. Európában is számos projekt indult, a teljesség igénye nélkül: a Felső-Rajna-völgyben (Németország, Franciaország), Cornwallban (Anglia) és Olaszországban. Az utóbbi években Magyarországon is egyre nagyobb figyelem irányult a felszín alatti fluidumok lítium és egyéb oldott elemeinek hasznosítási lehetőségeire. Így a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága archív vízelemzési adatok és új vízelemzések végrehajtásával mérte fel a mélységi vizek lítiumtartalmát (Falus 2023), emellett a MOL Kutatási és Termelési üzletága is a szénhidrogén-termelés melléktermékeként kitermelt vízből való lítiumkinyerésre fókuszál (Világgazdaság 2023).

Harmadik szempontként, a „társadalmi fenntarthatóságot” is fontos említenünk, melyet a társadalmi elfoga-

dottság határoz meg. Amennyiben a társadalom vagy egy kisebb közösség nem tartja elfogadhatónak a tervezett geotermikus projektet, annak elindulása vagy továbbhaladása meghiúsulhat. Habár a földhőhasznosítás számos előnye miatt általánosságban magas elfogadottsággal rendelkezik a geotermia hazánkban is – gondoljunk a termálfürdők turisztikai népszerűségére (*Toth-Sztermen-Fenerty 2015*) –, a létező vagy vélt kockázatok csökkenthetik azt. Ezek között az egyik a földrengéskockázat és annak minden technológiára kiterjedő általánosító hangsúlyozása. Természetszerűen a félelmek első sorban a negatív példákra alapulnak, és nehezíti az elfogadást a társadalmi megértés és ismeretek hiánya. Épp ezért a hazai geotermikus hasznosítás részarányának növelésének egyik kulcsa éppen itt van, melynek eszköze az edukáció, a felszín alatt zajló folyamatok megértése és megértetése.

Fontos szempont továbbá – bár messze túlmutat az előzőkön – a felszín alatti térrész fokozódó kihasználása. Míg az elmúlt fél évszázadban döntően felszín alatti víz, termálvíz és szénhidrogén termelése zajlott a földkéregből, mára ez a térrész egyre nagyobb figyelmet kap számos új igény bevonásával. Így a szén-dioxid geológiai tárolása (CCS) (*Szabó et al. 2016*), vagy a még gyerekcipőben járó felszín alatti hidrogéntárolás és a geotermikus technológiák sokféle célú térkihasználása, a fluidumokból történő nyersanyag-kitermelés és a felszíni vizek célzott felszín alatti elhelyezése (MAR – Managed Aquifer Recharge technológia). Ez a sokféle eltérő irányból érkező igény kielégítése a jövőben még intenzívebb összehangolást igényel. Ennek alapja a korábbi egyedi megközelítések (felszín alatti víz, szénhidrogén, geotermikus, nyersanyagrendszerek) összefüggéseinek feltárása és az összehangolt használatot segítő szabályozás kialakítása lehet, amire az ENERAG projekt eredményei mutattak rá (*Czauner et al. 2022*).

Következtetések, összefoglalás

Magyarország kedvező geotermikus potenciálját az európai viszonylatban is egyedülálló geotermikus adottságok kutatása és a legmegfelelőbb technológiák kiválasztása alapján lehet legjobban kiaknázni. Ahogyan láttuk, nem minden lehetséges technológia alkalmazható hazánk minden régiójában, de a geotermikus hasznosítás valamilyen (sekély vagy mély) kihasználási formája szinte mindenhol lehetséges.

A legnagyobb lehetőség az országban elérhető hidrotermás készletekben rejlik. Ezek porózus és karbonátos víztartóinak hasznosítása lehetővé teszi a távfűtésben való részarányuk növelését, mely termelő-visszasajtoló kutakkal lehetséges. A termálvíz szempontjából meddő kutak mély fűrólyuk hőcserélő segítségével hőtermelésbe állíthatók. Az egykori meddő szénhidrogén-kutak hőcserélők beépítésével történő hasznosítása is lehetséges. Ugyanakkor a felszínre jutó termálforrások és az elfolyó medencevizek számottevő hőpotenciálja helyben kínál

lehetőséget a kihasználásra. A fokozódó termálvíz-kitermelés megköveteli a felszín alatti térrész korlátozott ismeretéből eredő geológiai kockázatok, valamint a fenntarthatósági kérdések kezelését, különösen a jelenleg alacsony mértékű visszasajtolás párhuzamos fejlesztését. Ugyanis a termelt készletek természetes megújulása – még ott is, ahol biztosított –, legalább annyi időt igényel, mint a termelés időtartama.

A geotermikus energia feltárása és kiaknázása településszintű tervezéssel valósulhat meg hatékonyan. Itt lehet összehangolni a felmerülő igényeket és a lehetséges fogyasztókat, és így lehet elérni a leghatékonyabb felhasználást. Ez és a fogyasztók sorba kapcsolása segíti a fenntarthatóságot is, ugyanis a mezőgazdasági használatlal összehangolva, a visszasajtoló kutak költségei nem kizárólag az agrárszektorra érintik.

Az aljzati karbonátok hidrotermás rendszeréből és a javított hatékonyságú (EGS) és abból fejlesztett rendszerek révén a jövőben lehetséges hazánkban is a villamos áram és kapcsolt hőenergia-termelés, de az előbbi korlátozott területen alkalmazható, az utóbbi technológia pedig még nem piacképes. Mindkét technológiára igaz, hogy nagy kockázatúak. Láthattuk, hogy a jövőben egyre fontosabb szempont a környezeti mellett a gazdasági fenntarthatóság, ami a beruházókat a termálvíz nyersanyag tartalmának kiaknázására sarkallja.

A sekély geotermikus energia jelentős potenciállal rendelkezik a világban bárhol, így hazánkban is. A technológia fejlődik, hűtésre és fűtésre egyaránt alkalmazható, és a rendszerek létesítéséhez nem szükségesek kiemelkedő geotermikus adottságok. A hőszivattyús technológia a termálvíz kaszkád rendszerű kihasználásához is nélkülözhetetlen. A jövőben a Kárpát-medencei éghajlatunk mellett várhatóan a felszín alatti víztartókban és fűrólyuk hőcserélők révén tárolt hőnek egyre nagyobb szerepe lesz a fűtési és hűtési igények kielégítésében.

Az országban Budapest a legkiterjedtebb geotermikus piac, különböző technológiákat alkalmazhatunk a hasznosítás optimalizálására és a hidrotermás rendszerben fellépő kedvezőtlen kölcsönhatások elkerülésére.

A környezeti és gazdasági fenntarthatóság mellett ugyanolyan fontos a társadalom ismereteinek gyarapítása a felszín alatti térrészt, annak működését és a lehetséges technológiákat illetően. A felszín alatti térrész fokozódó kiaknázása kutatást és összehangolt hasznosítást igényel.

Köszönetnyilvánítás

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



AZ NKFI ALAPBÓL MEGVALÓSULÓ PROJEKT

Irodalomjegyzék

- 1509/2022. (X. 21.) Korm. határozat a geotermikus energiahasznosítással kapcsolatos intézkedésekről <https://magyarkozlony.hu/dokumentumok/a6aa2686bfde19730c8150be8f7d160d57c94c15/letoltes> [Letöltve: 2023.12.02.]
- Arnórsson, S., Axelsson, G., & Sæmundsson, K. (2008). Geothermal systems in Iceland. *Jökull*, Vol. 58, pp. 269–302.
- Arola, T. (2019). Deep geothermal energy utilisation in Finland—total madness or possibility for successful business. *Exploration & Development of Deep Geothermal Systems—CAS DEEGEOSYS*, Vol. 4, pp. 1–17.
- Bakane, P. A. (2013). Overview of extraction of mineral/metals with the help of geothermal fluid. In: *Proceedings of the 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, CA, USA*, pp. 11–13.
- 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.
- Bayer, P., Attard, G., Blum, P. & Menberg, K. (2019). The geothermal potential of cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 106, pp. 17–30.
- Békési E., Lenkey L., Limberger J., Porkoláb K., Balázs A., Bonté, D., Vrijlandt, M., Horváth F., Cloetingh, S., & van Wees, J. D. (2018). Subsurface temperature model of the Hungarian part of the Pannonian Basin. *Global and Planetary Change*, Vol. 171, pp. 48–64. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.09.020>
- Bloemendal, M., Jaxa-Rozenc, M., & Olsthoorna, T. (2018). Methods for planning of ATEs systems. *Applied Energy*, Vol. 216, pp. 534–557.
- Bobok, E., & Tóth, A. (2005). *Megújuló energiák*. Miskolci Egyetemi Kiadó, p. 227.
- Bourcier, W. L., Lin, M., Nix, G. (2005). Recovery of minerals and metals from geothermal fluids (No. UCRL-CONF-215135). Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States).
- Bregnard, D., Leins, A., Cailleau, G., Vieth-Hillebrand, A., Eichinger, F., Ianotta, J., Hoffmann, R., Uhde, J., Bindschedler, S., Regenspurg S., & Junier P. (2023). Unveiling microbial diversity in deep geothermal fluids, from current knowledge and analogous environments. *Geotherm Energy*, Vol. 11, Art. 28. <https://doi.org/10.1186/s40517-023-00269-z>
- Buday T., Buday-Bódi E., Csákbérenyi-Nagy G., & Kovács T. (2019). Subsurface urban heat island investigation in Debrecen, Hungary. Based on archive and recently measured data. In *Proceedings of the European Geothermal Congress*.
- Chamorro, C., García, C., José, L., Mondejar, M., & Pérez-Madrado, A. (2014). Enhanced geothermal systems in Europe: An estimation and comparison of the technical and sustainable potentials. *Energy*, Vol. 65, pp. 250–263.
- Czauner B. (2012). *Regional Hydraulic Function of Structural Elements and Low Permeability Formations in Fluid Flow Systems and Hydrocarbon Entrapment in Eastern-Southeastern Hungary*. PhD Thesis, Eötvös Loránd University, Department of Physical and Applied Geology, 150.
- Czauner B., Madl-Szőnyi J. (2011). The function of faults in hydraulic hydrocarbon entrapment: Theoretical considerations and a field study from the Trans-Tisza region, Hungary. *AAPG Bulletin*, Vol. 95, No. 5, pp. 795–811.
- Czauner B., & Mádl-Szőnyi J. (2013). Regional hydraulic behavior of structural zones and sedimentological heterogeneities in an over-pressured sedimentary basin. *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 48, pp. 260–274.
- Czauner B., Molnár F., Masetti, M., Arola, T., & Mádl-Szőnyi J. (2022). Groundwater Flow System-Based Dynamic System Approach for Geofluids and Their Resources. *Water*, 14, No. 7, 1015.
- Czauner B., Szabó Z., Márton B., & Mádl-Szőnyi J. (2023). Basin-Scale Hydraulic Evaluation of Groundwater Flow Controlled Biogenic Gas Migration and Accumulation in the Central Pannonian Basin. *Water*, 15, No. 18, 3272. <https://doi.org/10.3390/w15183272>
- Erőss A., Zsemle F., & Pulay E. (2015). Heat potential evaluation of effluent and used thermal waters in Budapest, Hungary. *Central European Geology*, Vol. 58, No. 1–2, pp. 62–71.
- Európai Bizottság (2016). Tiszta energia minden európainak [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:52016DC0860\(01\)&from=CS](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:52016DC0860(01)&from=CS) [Letöltve: 2023. 10. 23.]
- European Commission, Regional Policy, Newsroom 25 May 2023, Inforegio - EU Cohesion Policy: Inauguration of the largest geothermal heating system in the EU, in Szeged, Hungary (europa.eu) [Letöltve: 2023. 12. 02.]
- Falus Gy. (2023). A felszín alatti fluidumok oldott elemeinek hasznosítása. Előadás – Magyar Geotermia Klaszter második ülése. 2023. 11. 15.
- Garrison, G. H., Guðlaugsson, S. P., Ádám, L., Ingimundarson, A., Cladouhos, T. T., & Petty, S. (2016). The South Hungary enhanced geothermal system (SHEGS) demonstration project. *GRC Trans*, Vol. 40, No. 10, pp. 307–315.
- Hartai, É., Bodó, B., CHPM2030 Team (2017) Combining energy production and mineral extraction – The CHPM2030 project *European Geologist* 43 | May 2017 6-9. [EGJ43_Hartai_et_al.pdf](https://u-szeged.hu/EGJ43_Hartai_et_al.pdf) (u-szeged.hu) [Letöltve: 2024. 01. 27.]
- Herneckzy G. (2022). Turai Geotermikus hőforrás hasznosításának tapasztalatai, további lehetőségei. Szakdolgozat. Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar
- Horváth F., Bada G., Szafián P., Tari G., Ádám A., & Cloetingh, S. (2006). Formation and deformation of the Pannonian Basin: constraints from observational data. *Geological Society, London, Memoirs*, Vol. 32, No. 1, pp. 191–206.
- Horváth F., Musitz B., Balázs A., Végh A., Uhrin A., Nádor A., ... & Wórum G. (2015). Evolution of the Pannonian basin and its geothermal resources. *Geothermics*, Vol. 53, pp. 328–352.
- Innovációs és Technológiai Minisztérium (2020). Nemzeti Energia- és Klímaterv https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/hu_final_necp_main_hu_0.pdf [Letöltve: 2023. 10. 23.]; illetve <https://magyarkozlony.hu/dokumentumok/a6aa2686bfde19730c8150be8f7d160d57c94c15/letoltes> [Letöltve: 2023.12.02.]
- Izapy, G. (ed.) (1997). Magyarország forrásainak katasztere, OV-VITUKI, Institute of Hydrology, Budapest (Database of springs in Hungary)
- Kalmár L., Medgyes T., & Szanyi J. (2020). Specifying boundary conditions for economical closed loop deep geothermal heat production. *Energy*, Vol. 196, 117068. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117068>
- Keiser, U., & Butti, G. (2015). Ökonometrische Analyse der Tiefen Erdwärmesonde Triemli vom EWZ. Schlussbericht. EnergieSchweiz, Bundesanstalt für Energie BFE
- Kim, K. I., Min, K. B., Kim, K. Y., Choi, J. W., Yoon, K. S., Yoon, W. S., ... & Song, Y. (2018). Protocol for induced microseismicity in the first enhanced geothermal systems project in Pohang, Korea.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 91, pp. 1182–1191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.062>
- Korhonen, K., Markó Á., Bischoff, A., Szijártó M., & Mádl-Szőnyi J. (2023). Infinite borehole field model – a new approach to estimate the shallow geothermal potential of urban areas applied to central Budapest, Hungary. *Renewable Energy*, Vol. 208, pp. 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.043>
- Koroncz, P., Vizhányó, Z., Farkas, M. P., Kuncz, M., Ács, P., Kocsis, G., ... & Kovács, J. (2022). Experimental Rock Characterisation of Upper Pannonian Sandstones from Szentes Geothermal Field, Hungary. *Energies*, Vol. 15, No. 23, 9136.
- Kukkonen, I. T. (2000). Geothermal energy in Finland. *Proceedings*, pp. 277–282.
- Lenkey L., Dövényi P., Horváth F., & Cloetingh, S. A. P. L. (2002). Geothermics of the Pannonian basin and its bearing on the neotectonics. *EGU Stephan Mueller Special Publication Series*, Vol. 3, pp. 29–40.
- Lenkey L., Mihályka J., & Paróczy P. (2021). Review of geothermal conditions of Hungary. *Földtani Közlemény*, Vol. 151, No. 1, pp. 65–65.
- Lund, H., Østergaard, P. A., Nielsen, T. B., Werner, S., Thorsen, J. E., Gudmundsson, O., ... & Mathiesen, B. V. (2021b). Perspectives on fourth and fifth generation district heating. *Energy*, Vol. 227, 120520.
- Lund, J. W., & Toth A. N. (2021a). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, Vol. 90, 101915.
- Mádlné Szőnyi J., & Tóth, Á. (2015). Basin-scale conceptual ground-water flow model for an unconfined and confined thick carbonate region. *Hydrogeology Journal*, Vol. 23, No. 7, pp. 1359–1380.
- 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, 1796–1807. <https://doi.org/10.1556/2065.180.2019.12.6>
- Mádlné Szőnyi, J., Rybach, L., Lenkey, L., Hámor, T., & Zsemle, F. (2008). A geotermikus energiahasznosítás nemzetközi és hazai helyzete, jövőbeni lehetőségei Magyarországon – Ajánlások a hasznosítást előmozdító kormányzati lépésekre és háttér tanulmány, Magyar Tudományos Akadémia, Budapest
- Mádl-Szőnyi J. (2020). Felszínalatti vízáramlások mintázata fedetlen és kapcsolódó fedett karbonátos víztartó rendszerekben, a Budai-termálkarszt tágabb környezetének példáján. Doktori disszertáció. ELTE
- Mádl-Szőnyi J., Czauner B., Iván V., Tóth Á., Simon S., Erőss A., Bodor P., Havril T., Boncz L., Sőreg V. (2019). Confined carbonates—Regional scale hydraulic interaction or isolation? *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 107, pp. 591–612. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.06.006>
- Mádl-Szőnyi J., Erőss A., Csondor K., Iván V., & Tóth Á. (2022). Hydrogeology of the Karst Regions in Hungary. In: Veress, M., Leél-Össy, S. (eds) *Cave and Karst Systems of Hungary. Cave and Karst Systems of the World*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92960-2_6
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.001>
- Mádl-Szőnyi J. & Tóth J. (2009). A hydrogeological type section for the Duna-Tisza Interfluvium, Hungary. *Hydrogeology Journal*, Vol. 17, No. 4, pp. 961–980.
- 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. (2023). Determining the “geothermal reinjection potential” into sedimentary formations using datasets of hydrocarbon exploration (No. EGU23-6992). *Copernicus Meetings*.
- Maury, J., Hamm, V., Loschetter, A., & Le Guenan, T. (2022). Development of a risk assessment tool for deep geothermal projects: example of application in the Paris Basin and Upper Rhine graben. *Geothermal Energy*, Vol. 10, No. 1, p. 26.
- MEKH (2023a). Elsődleges megújuló energiahordozók termelése és felhasználása <https://www.mekh.hu/eves-adatok> [Letöltve: 2023. 10. 23.]
- MEKH (2023). Hőenergia termelés. <https://www.mekh.hu/eves-adatok> [Letöltve: 2023. 10. 23.]
- Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S., & Blum, P. (2013). Subsurface urban heat islands in German cities. *Science of the Total Environment*, Vol. 442, pp. 123–133.
- Mignan, A., Landtwin, D., Kästli, P., Mena, B., & Wiemer, S. (2015). Induced seismicity risk analysis of the 2006 Basel, Switzerland, Enhanced Geothermal System project: Influence of uncertainties on risk mitigation. *Geothermics*, Vol. 53, pp. 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.05.007>
- Moeck, I. S. (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 37, pp. 867–882.
- Nádor A. (ed.) (2019). *Cascades and Calories: Geothermal Energy in the Pannonian Basin for the 21st Century and Beyond*. Belgrade, Serbia: EU Interreg Danube Transnational Programme (2019), p. 132.
- Nádor A. (2023). Porózus közegbe történő visszasajtolással kapcsolatos kutatások. Előadás – Magyar Geotermia Klaszter második ülése. 2023. 11. 15.
- Nádor A., Sebess-Zilahi L., Rotár-Szalkai Á., Gulyás Á., & Markovic T. (2019). New methods of geothermal potential assessment in the Pannonian basin. *Netherlands Journal of Geosciences*, Vol. 98, e10. <https://doi.org/10.1017/njg.2019.7>
- Nagygal J. (2011). A termálvíz hasznosítása és nehézségei 50 év tükrében. Megújuló Energiaforrások Konferencia. Miskolc, 2011. április 28. Előadás
- NEKT (2020) Nemzeti Energia és Klímaterv. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/hu_final_necp_main_hu_0.pdf (Letöltve: 2024.01.27)
- Norbeck, J. H., & Latimer, T. (2023). Commercial-Scale Demonstration of a First-of-a-Kind Enhanced Geothermal System. Pre-print OGRE (2020). Geotermikus Információs Rendszer. MBFSZ 2020. <https://map.mbfz.gov.hu/ogre/> [Letöltve: 2023. 11. 25.]
- Flóvenz, Ó. G., & Saemundsson, K. (1993). Heat flow and geothermal processes in Iceland. *Tectonophysics*, Vol. 225, No. 1–2, pp. 123–138.
- Osvald M. (2021). Geotermikus rezervoárokból történő fémkioldás laboratóriumi vizsgálata, különös tekintettel a volfrámra. Doktori disszertáció. SZTE
- Patel, S. (2023). EGS, AGS, and Supercritical Geothermal Systems: What’s the Difference? Power, New & Technology for the Global Energy Industry. <https://www.powermag.com/egs-ags-and-supercritical-geothermal-systems-whats-the-difference/> [Letöltve: 2023. 12. 03.]
- Piipponen, K., Martinkauppi, A., Korhonen, K., Vallin, S., Arola, T., Bischoff, A., & Leppäharju, N. (2022). The deeper the better? A thermogeological analysis of medium-deep borehole heat exchangers in low-enthalpy crystalline rocks. *Geothermal Energy*, 10, No. 1, pp. 1–20. <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00221-7>
- Pollack, H. N., Hurter, S. J., & Johnson, J. R. (1993). Heat flow from the Earth’s interior: analysis of the global data set. *Reviews of Geophysics*, Vol. 31, No. 3, pp. 267–280. <https://doi.org/10.1029/93rg01249>
- Ragnarsson, Á., Steingrímsson, B., & Thorhallsson, S. (2020). Geothermal development in Iceland 2015–2019. In: *Proceedings World Geothermal Congress (Vol. 1)*
- Rman, N., Balan, L. L., Bobovečki, I., Gál, N., Jolović, B., Lapanje, A, ... & Vranješ, A. (2020). Geothermal sources and utilization prac-

- tice in six countries along the southern part of the Pannonian basin. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 79, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8746-6> [Letöltve: 2024. 01. 27.]
- Rotár-Szalkai Á., Maros G., Bereczki L., Markos L., Babinszki E., Zilahi-Sebess L., ... & Jolović, B. (2018). Identification, ranking and characterization of potential geothermal reservoirs. Report of the DARLINGe project, 82 p. Available at www.interreg-danube.eu/approved-projects/darlinge/outputs.
- Rotár-Szalkai A., Nador A., Szőcs T., Maros G., Goetzl, G., & Zekiri, F. (2017). Outline and joint characterization of transboundary geothermal reservoirs at the western part of the Pannonian basin. *Geothermics*, Vol. 70, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.05.005>
- Ruffo, P., Bazzana, L., Consonni, A., Corradi, A., Saltelli, A., & Tarrantola, S. (2006). Hydrocarbon exploration risk evaluation through uncertainty and sensitivity analyses techniques. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 91, No. 10–11, pp. 1155–1162.
- Rybach, L. (2010). The future of geothermal energy and its challenges. In *Proceedings World Geothermal Congress*, Vol. 29.
- Sanner, B. (2022). Summary of EGC 2022 Country Update Reports on Geothermal Energy in Europe. In *Proceedings of the European Geothermal Congress*, Vol. 2022.
- Stieber B. (2023). Sekélygeotermikus potenciálbecslés Kerekegyháza környezetében. Diplomamunka. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar
- Szabó Z., Hellevang, H., Király C., Sendula, E., Kónya P., Falus G., ... & Szabó C. (2016). Experimental-modelling geochemical study of potential CCS caprocks in brine and CO₂-saturated brine. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 44, pp. 262–275. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.11.027>
- Szanyi J. & Kovács B. (2010). Utilization of geothermal systems in South-East Hungary, *Geothermics*, Vol. 39, No. 4, pp. 357–364, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.09.004>
- Szanyi J., Kurunczi M., Kóbor B., & Medgyes T. (2013). Korszerű technológiák a termálvíz visszasajtolásban: Kutatási eredmények és gyakorlati tapasztalatok. InnoGeo Kft. Szeged, Magyarország.
- Szanyi J., Nádor A., & Madarász T. (2021). A geotermikus energia kutatása és hasznosítása Magyarországon az elmúlt 150 év tükrében. *Földtani Közlemény*, Vol. 151, No. 1, 79–102. Budapest
- Szekszárdi A., Békési E., Tóth K., Sulyok I., & Gáti, M. (2022). WeHEAT SYSTEMS: a sustainable closed loop heating technology in the field of Geothermal Energy European Geothermal Congress 2022 Berlin, Germany | 17-21 October 2022. www.europeangeothermalcongress.eu [Letöltve: 2023. 12. 03.]
- Szijártó M., Galsa A., Tóth Á., Lenkey L., & Mádl-Szőnyi J. (2019). Numerical investigation of the interaction of different driving forces on groundwater flow and temperature pattern in a theoretical basin and in the Buda Thermal Karst, Hungary. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 21, EGU2019-5830, 2019.
- Szijártó M., Galsa A., Tóth Á., & Mádl-Szőnyi J. (2021). Numerical analysis of the potential for mixed thermal convection in the Buda Thermal Karst, Hungary. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 34, 100783.
- Szilágyi I. (2023). Geotermikus geológiai kockázatok elemzése és számszerűsítése. Hogyan és miért?, SZTFH, Geotermikus előadói nap Budapest. 2023. 09. 07.
- Szocs T., Rman, N., Rotár-Szalkai Á., Tóth G., Lapanje, A., Černák, R., & Nádor A. (2018). The upper pannonian thermal aquifer: Cross border cooperation as an essential step to transboundary groundwater management. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 20, pp. 128–144. <https://doi.org/10.1016/j.jehrh.2018.02.004> [Letöltve: 2024.01.27.]
- Tester, J. W., Anderson, B. J., Batchelor, A. S., Blackwell, D. D., DiPippo, R., Drake, E. M. & Veatch, R. W., (2016) The Future of Geothermal Energy. Idaho National Laboratory, U.S. Department of Energy.
- Toth A. N., Sztermen, A., & Fenerty, D. K. (2015). Social acceptance of geothermal energy through tourism and balneology. In: *Proceedings World Geothermal Congress*
- Tóth A., Szűcs P., Fenerty D., & Ilyés Cs. (2022) Geotermikus energia projektek kezelhető kockázatai Magyarországon. Kovács, H., Madarász, T., Nagy, G., Nagy I., Szűcs, P., Németh, N., & Vadász, M. (2022) Fókuszban a hazai felszín alatti természeti erőforrások – nyersanyagok, energia és technológiák nexusa, Miskolci Egyetem ISBN 978-963-358-277-0, pp. 150–162. https://tkp2020-nka.uni-miskolc.hu/files/20063/TKP2022_ISBN_978-963-358-277-0.pdf [Letöltve: 2024. 01. 27.]
- Tóth Á., Galsa A., & Mádl-Szőnyi J. (2020). Significance of basin asymmetry and regional groundwater flow conditions in preliminary geothermal potential assessment–Implications on extensional geothermal plays. *Global and Planetary Change*, Vol. 195, 103344. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103344>
- 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*, Vol. 1, No. 1, pp. 11–36.
- Toth, A. N. (2020, April). Country update for Hungary. In *Proceedings of the World Geothermal Congress*, Vol. 1, pp. 1–10.
- UNFC-IGA (2022) United Nations Framework Classification for Resources Ad Hoc Committee of the International Geothermal Association. Supplementary Specifications for the application of the United Nations Framework Classification for Resources (Update 2019) to Geothermal Energy Resources. Done in Geneva on 25 October 2022. United Nations (unece.org) [Letöltve: 2024. 01. 27.]
- Varsányi, I., Kovács, L. Ó., & Bálint, A. (2015). Hydraulic conclusions from chemical considerations: groundwater in sedimentary environments in the central part of the Pannonian Basin, Hungary. *Hydrogeol J.* Vol. 23, pp. 423–435 <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1222-1> [Letöltve: 2024. 01. 27.]
- Vass I., Tóth T. M., Szanyi J. & Kovács B. (2018). Hybrid numerical modelling of fluid and heat transport between the overpressured and gravitational flow systems of the Pannonian Basin. *Geothermics*, Vol. 72, pp. 268–276. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.11.013> [Letöltve: 2024. 01. 27.]
- Világgazdaság (2023). MOL: fontos döntések előtt áll a lítiumprojekt. <https://www.vg.hu/energia-vgplus/2023/11/mol-fontos-dontesek-elott-all-a-litiumprojekt> [Letöltve: 2023. 11. 25.]
- Witter, J. B., Trainor-Guitton, W. J., & Siler, D. L. (2019). Uncertainty and risk evaluation during the exploration stage of geothermal development: A review. *Geothermics*, Vol. 78, pp. 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.12.011>
- Xu, J., Wang, R.Z., & Li, Y. (2014). A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. *Solar Energy*, Vol. 103, pp. 610–638.