

FOSSZILISRÓL MEGÚJULÓRA - HOGYAN GYORSÍTHATÓ FEL A FÖLDHŐSZONDÁK TELEPÍTÉSE?

OTDK DOLGOZAT

Készítette: Glavanov Gergő

(FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK)

Témavezető: Markó Ábel

Külső Konzulens: Pásztor Domokos

Belső Konzulens: Mádlné Dr. Szőnyi Judit

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Földrajz- és Földtudományi Intézet

Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék

Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra



2024

Tartalomjegyzék

1. Téma bemutatása, problémafelvetés, célkitűzés	2
2. A Pannon-medence és Magyarország geotermikus adottságai	4
3. Sekély geotermikus rendszerek jellemzői, előnyei	6
3.1. Hőszivattyúk működési elve és felépítése	6
3.2. Zárt rendszerek általános bemutatása	8
3.3. Hőmérsékleti állapot ismerete a rendszer tervezéséhez.....	8
4. Zárt sekély geotermikus rendszerekben rejlő lehetőségek Budapesten	10
5. Vizsgálati helyszín adottságainak bemutatása	11
5.1. A mérési helyszín földtani jellemzői	11
5.2. Korábbi, közeli területről származó adatok	12
6. Alkalmazott módszertan.....	15
7. Eredmények és értelmezésük	17
7.1. A fűrásból származó rétegsor.....	17
7.2. A szondában mért hőmérsékleti adatok	18
8. Következtetések	24
9. Összefoglalás és további lehetőségek a kutatásban.....	25
10. Táblázat; -és ábrajegyzék	26
11. Forrásjegyzék	27
12. Köszönetnyilvánítás	29

1. Téma bemutatása, problémafelvetés, célkitűzés

Napjainkban a klímaváltozás és az energiaválság begyűrűzése miatt egyre inkább felerősödtek azok a hangok, miszerint növelni kell a megújuló energiák részarányát az energiatermelésben. Az orosz-ukrán háború keltette energiaválság, valamint a fosszilis tüzelőanyagok éghajlatváltozásban játszott szerepe miatt újra előtérbe került a geotermikus energia. Ez összhangban áll az Európai Bizottság 'Tiszta energia mindenkinek' (2016), illetve az ennek köszönhetően megalkotott új Energiastratégia és a Nemzeti Energia és Klímaterv (NEKT 2020) célkitűzéseivel.

A geotermikus energia emberi léptékben nézve, valamint megfelelő technológiát alkalmazva, a megújuló energiák közé tartozik.

Magyarország geotermikus adottságai kiválóak. Ebből az adottságból fakadóan korábban kevesebb figyelmet fordítottak a sekély geotermiára, ahol fűrólyukas hőcserélők segítségével lehetséges kinyerni a felszínközeli képződmények hőenergiatartalmát. Bár napjainkban a sekély geotermikus rendszerek kezdenek elterjedni hazánkban, a 2024-ben kiadott Nemzeti Földhőstratégia is fontos fejlesztendő területként jelöli meg, az energiatermelés egészet nézve arányuk még mindig csekély. A sekély geotermikus talajszondás rendszerek tervezéséhez alapvető fontosságú a felszín alatti közeg kiindulási hőmérséklete a talajszondák teljes hosszában. A talajszondák fűrése, valamint a furat fala és a talajszonda közé kialakított tömedékelő anyag megkötése során hő keletkezik, mely ideiglenesen megváltoztatja a felszín alatti közeg hőmérsékletét. Erre még további hatással van a szondák feltöltéséül szolgáló folyadék, melynek szintén eltérő a hőmérséklete. Ez a rendszertervezés és a kivitelezés szempontjából nem előnyös, hiszen meg kell várni, hogy a szondában kialakuljon egy állandó hőmérséklet, mely már a földtani közegre és az adott területre jellemző. A tervező és kivitelező cégek jelenlegi általánosan elfogadott protokollja szerint, a szonda kiépítése, valamint a kiindulási hőmérséklet megmérése között egy hétnek kell eltelnie. A várakozási idő hossza pedig a tervezési és a kivitelezési folyamatokhoz szükséges időt is befolyásolja.

A rendszerek kialakítása időbe telik, ha a folyamat lerövidíthető, akkor ezzel azok telepítése felgyorsítható. Tudományos Diákköri dolgozatomban a felvetett problémával és a fönti állítással összhangban arra a kérdésre keresem a választ, hogy a hőmérsékleti normalizálódáshoz valóban szükséges eltelnie egy hétnek, vagy esetlegesen hamarabb is végbemegy ez a folyamat, és ha igen, akkor mennyi idő alatt. Ennek a kérdésnek a

megválaszolása azért fontos, mivel kedvező eredmény esetén a folyamat, és ezzel együtt magának a sekélygeotermikus a rendszernek telepítési ideje is lerövidíthetővé válna.

Kutatásom célja tehát annak az időnek a pontos meghatározása, amely a fúrás és a zavartalan hőmérséklet visszaállásához szükséges, valamint közvetett célkitűzés a fűrólyukhőcserélős rendszerek kiépítéséhez szükséges idő lerövidítése. További személyes célom a tapasztalat szerzés, mind terepi, mind elméleti síkon, ideértve a műszeres mérések elvégzésének mikéntjét, az adat; -és irodalom feldolgozást, kiértékelést, valamint a TDK dolgozattal járó teendők igényes elvégzését. Ezzel egyidőben egy olyan TDK dolgozat megalkotása, amely informatív, legfőképpen pedig a tudomány és az ipar számára egyaránt hasznosítható.

A téma felvetés Pásztor Domokos geológustól (külső konzulens), a Geo Concept Kft. munkatársától származik, utóbbi cégcsoport sekély geotermikus projektek tervezésével és megvalósításával foglalkozik. A méréseket, valamint a terepi munkát az ő iránymutatásával és segítségével hajtottam végre.

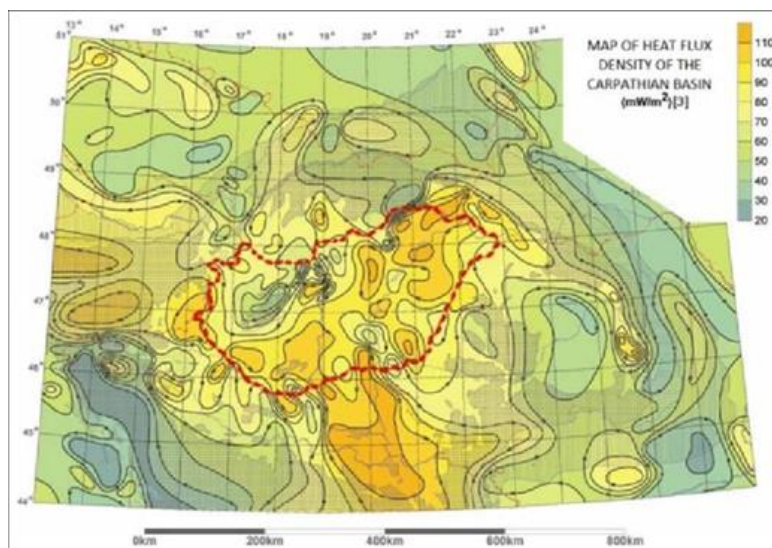
2. A Pannon-medence és Magyarország geotermikus adottságai

A földhő a kéregben és a köpenyben található hosszú felezési idejű, radioaktív izotópok (U^{238} , U^{235} , Th^{232} , K^{40}) bomlásából, valamint a primordiális hőből származik (Dövényi et al., 1983). Arányuk vitatott, egyesek hivatkozások 50-50%-ot, mások 90-10%-ot mondanak.

Hazánk geotermikus adottságai kiválóak. A kontinensünkre jellemző 65-90 mW/m² helyett a hazai hőfluxus értéke átlagosan 80-110 mW/m², egyes helyeken 120 mW/m² (1. ábra) (Dövényi et al., 1983; Lenkey et al., 2021).

Emellett a geotermikus gradiens értéke, amely megmutatja a hőmérséklet növekedését a felszíntől lefelé haladva, szintén átlagon felüli. A geotermikus gradiens Európában átlagosan 30-33°C/km, Magyarországon átlagosan 42-45°C/km, de egyes helyeken elérheti a 100°C/km-t is (Dövényi & Horváth, 1988). Továbbá nagy kiterjedésben megtalálhatóak a felszín alatt porózus víztartók (sekélyvízi pannóniai homokkő) valamint repedezett-karsztosodott mészkő és dolomit, amelyek a legfontosabb termásvíz rezervoárjaink (Horváth et al., 2015).

Magyarországon tehát számos helyszínen megtalálható mindhárom elem, amely egy geotermikus rendszerhez szükséges: a hőforrás, a rezervoár és a geotermikus fluidum.



1. ábra Magyarország hőfluxus térképe (Dövényi, 2002 nyomán, Mádlné Szőnyi és Ádám, 2011)

A kedvező geotermikus adottságok oka a Pannon-medence összetett fejlődéstörténetéből adódik. Ezt támasztják alá a térség geológiai képződményei. A medencealjatot kainozoikumnál idősebb kőzetek alkotják, amelyeket az európai-és afrikai-lemezek mozgása alakított. A medence mai jellege, és az ebből következő kedvező geotermikus adottságok a késő-kainozoikumban alakultak ki, mikor az Európai-lemezhez forrott Magura-óceán

szubdukálódott, majd lehajlása a litoszféra kivékonyodását eredményezte. Ezt követően, a Pannon-medence a középső-miocéntól süllyedésnek indult. Összességében tehát a medence a Tethys egyik ágának a szubdukciójából kialakult, ív mögötti medencének tekinthető (Horváth, 2007, Horváth et al., 2015).

3. Sekély geotermikus rendszerek jellemzői, előnyei

Ugyanakkor a geotermikus energia hatása az aktív geotermikus területektől eltekintve a felszín közelben minimális, a felszínhez közeli pár tíz méteren együtt érvényesül a napsugárzásból származó energiával. Ezt a régiót heterotermális zónának hívjuk. A hőmérséklet napi járása jellemzően a talaj felső 1 méterére van hatással. A hőmérséklet havi és évszakos változása azonban az 5-50 méter közötti térrészt befolyásolja. A felső 10 méteren a hőmérséklet havi járásnak értéke átlagosan 2,5-5°C. A geotermikus gradiens átlagosan 30°/km, tehát ez száz méteres mélységben jellemzően 3°C-kal emeli meg a felszíni átlaghőmérsékletet (Badino, 2018). Hazánk kedvező geotermikus adottságai miatt ez az érték magasabb, 4-5°C (Lenkey et al., 2021). A sekély geotermikus kiaknázásnak nincsen számszerűen definiált alsó határa. Jellemzően 100-200 méter mélységben található ennek a tartománynak a határa, azonban eltérő földtani és hidrogeológiai környezetekben lehet mélyebben és sekélyebben is.

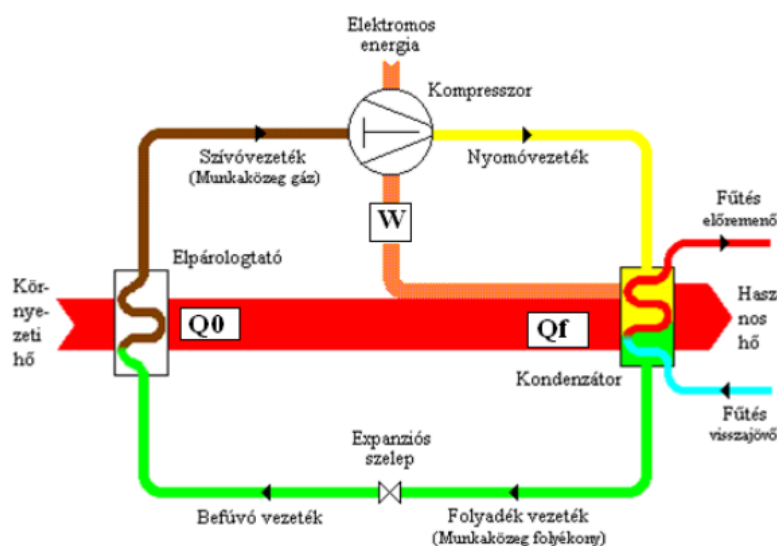
3.1. Hőszivattyúk működési elve és felépítése

A sekélygeotermia szempontjából fókuszba kerülő felső 100-200 m mélységű térrész hőtartalmának kiaknázására használt eszköz a hőszivattyú, melynek működési elve hasonló egy hűtőgéphez. Nyáron hűtésre, legkondicionálásra, télen fűtésre, illetve ezek mellett melegvíz készítésre használható. Az eszköz képes a környezeti hőt alacsonyabb hőfokszintről, magasabb hőfokszintre emelni, minimális külső energia befektetésével. Hőforrása sokféle lehet: a kőzetek, talaj vagy kutak vizének a hőtartalma, egy folyó vagy tó vize, hulladékhő, vagy levegő hőtartalma (Ádám, 2012). A földhőszivattyúk a felszín alatti geotermikus készletek, a talaj, a sekély földtani környezet vagy a felszín alatti vizek hőtartalmának kihasználásán alapulnak (Ádám, 2012).

Működésének elvi alapja a termodinamika második főtétele, hogy hő önként (spontán lezajló folyamatokban) csak melegebb testről hidegebbre mehet át. Ennek köszönhetően egyenlítődik ki a hőmérséklet-különbség (Holics, 1998).

A hőszivattyú egy olyan eszköz, amely környezeti hő felhasználásával képes hasznos energiát előállítani egy alacsony forráspontú munkaközeg segítségével. Ez a folyamat az elpárologtatóban (elgőzöltetőben) történik, ahol alacsony nyomáson és hőmérsékleten a munkaközeg gőzzé alakul. Az így képződött gőz a szívóvezetéken keresztül, egy külső energiát igénylő kompresszor segítségével a nyomóvezetékbe kerül. Itt a munkaközeg nyomása, és ebből kifolyólag a hőmérséklete is megemelkedik. Ezután a kondenzátorba kerül a

munkaközeg, ahol újra cseppfolyós lesz, ennek köszönhetően adja lesz a hasznos hőt. A folyamat a fizika azon törvényen alapul, miszerint a párolgás hőt von el, a kondenzáció pedig hőkibocsátással jár. Végezetül a folyadék halmazállapotú munkaközeg az expanziós (adagoló) szelephez ér, amelyben lecsökken a nyomása. Innen a munkaközeg ismét az elpárologtatóba kerül, és a teljes ciklus kezdődik előről (2.ábra) (Ádám, 2012).



2. ábra Hőszivattyú felépítése (Ádám, 2012)

A kömpresszor működése külső befektetett energiát igényel. A hőszivattyús rendszer hatékonyságát az ún. jósági fokkal ($COP = \text{Coefficient of Performance}$) jellemezhetjük. Ez megmutatja, hogy a hasznos energia hányszorosa a befektetett, vagyis a kömpresszor által felhasznált energiának. A kedvező érték 4-6 között van. $COP = \frac{Q_{hsz}}{P_{hsz}}$, ahol a Q_{hsz} a hőszivattyú által leadott pillanatnyi hőteljesítmény (kW), a P_{hsz} a hőszivattyú által felvett pillanatnyi elektromos teljesítmény (kW) (Ádám, 2012).

A talaj vagy talajvízhő hasznosító földhőszivattyúk kiaknázzák a felső néhány száz méterig terjedő geotermikus készleteket. Előnyük, hogy alkalmazásuk nem igényel különösen kedvező geotermikus adottságokat.

A sekély geotermia további előnyei: -Minimális környezetátalakítás

-Helyben elérhető

-Alacsony üzemeltetési-és karbantartási költségek

-Minimális szén-dioxid kibocsátás

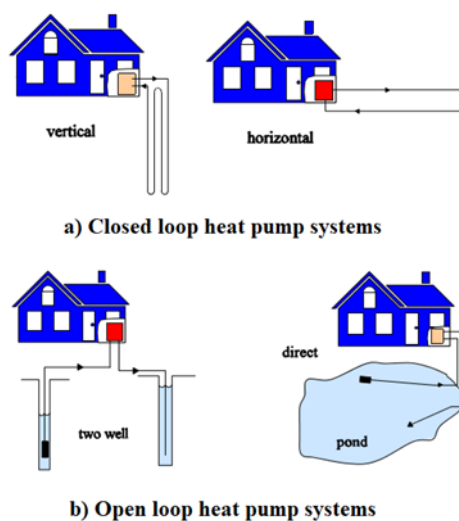
3.2. Zárt rendszerek általános bemutatása

A földhőszivattyús rendszerek két csoportra oszthatóak, lehetnek zártak, vagy nyíltak.

Zárt rendszer jellemzői:

- A hőcserélők a föld alatt kerülnek elhelyezésre horizontális vagy vertikális elrendezésben (3.ábra, a)
- Hőközvetítő munkaközeg (például alkohol, CO₂, vagy víz) kering a hőcserélőkben, hőt szállítva a talajból/földtani közegből a hőszivattyúba, a környezetből ennek révén zajlik a hőkivétel vagy hőkitermelés (Dorkota et al., 2020; Ádám, 2012)
- Hővezetés (konduktív hőtranszport), - hőmérséklet-különbség hatására kialakuló, anyagáramlás nélküli hőátadás jellemzi (Szlivka, 2014), → azaz a munkaközeg a kőzettel vagy a felszínalatti vízzel való érintkezés nélkül veszi fel é adja le a hőt

Ezzel szemben, röviden összefoglalva, a nyílt rendszerek esetében vízkivétel történik, azaz, felszínalatti vagy felszíni víz szolgál hőközvetítő közegként, amely energiatartalmát hasznosítja a hőszivattyú (3.ábra, b).



3. ábra Zárt is nyitott földhőszivattyús rendszerek (Forrás: www.softinway.com)

3.3. Hőmérsékleti állapot ismerete a rendszer tervezéséhez

A felszín alatti hőmérséklet viszonyok ismerete nélkülözhetetlen egy földhőszivattyús rendszer tervezése során. A két legfontosabb paraméter a közeg hővezető képessége, valamint a szonda hőellenállása. Ezeknek a tulajdonságoknak a meghatározásánál bevált módszer a TRT (Thermal Response Test), vagy geotermikus szondateszt. A felszín alatti közeg tulajdonságainak ismerete

csökkentheti a méretezésben szükséges biztonsági ráhagyásokat, ezáltal csökkenteni a kiadásokat (Sanner et al., 2005).

Amennyiben TRT elvégzésére nincs lehetőség, vagy pedig nem lenne gazdaságos (például kisebb beruházások, családi házak esetén), abban az esetben a hőmérsékleti viszonyok meghatározásához egy hőmérőt engednek le a szondába a fűrás befejezése után. Ez a módszer bár kevésbé hatékony, mégis számos információval tud szolgálni a felszín alatti közeg hőmérsékletéről. Ilyen tulajdonság például a közeg hőmérsékletének nyugalmi állapota. Ez fontos a kivitelezés szempontjából, ugyanis ennek tudatában lehet kiszámítani a betervezhető be-és kimenő hőmérsékletet, amely elengedhetetlen a rendszer tervezése során. A bemenő hőmérséklet a hőcserélőbe télen magasabb, nyáron alacsonyabb, mint a kimenő. Ezeknek az értékeknek a különbségéből lehet megállapítani, hogy mennyi hő cserélődött ki a rendszer és a környezet között (Motamedi et al., 2020).

4. Zárt sekély geotermikus rendszerekben rejlő lehetőségek Budapesten

Budapest geotermia szempontjából három részre osztható (Dorkota et al., 2020; Mádl-Szőnyi 2015):

- I. A Budai- hegység magasabban fekvő területei (átlagnál gyengébb geotermikus tulajdonságok, a legrosszabb adottságok ÉK-Budára jellemzőek)
- II. Pest (átlagnál jobb geotermikus tulajdonságok, különösen a belső területeken)
- III. A Duna és a Budai-hegység között elterülő rész, valamint DK-Pest és Csepel (a geotermikus tulajdonságok változóak)

A Duna két partján jellemzően feláramlási területekkel találkozunk, ugyanakkor az itt megtalálható rezervoárokkal kapcsolatban vannak bizonytalanságok, továbbá ezeken a területeken változatosak a geológiai adottságok is. A Duna pesti oldalán a legkedvezőbbek a geotermikus adottságok, ugyanis itt magas hőmérsékletű, sekély mélységű rezervoárok vannak. (Dorkota et al., 2020; Mádl-Szőnyi, 2015).

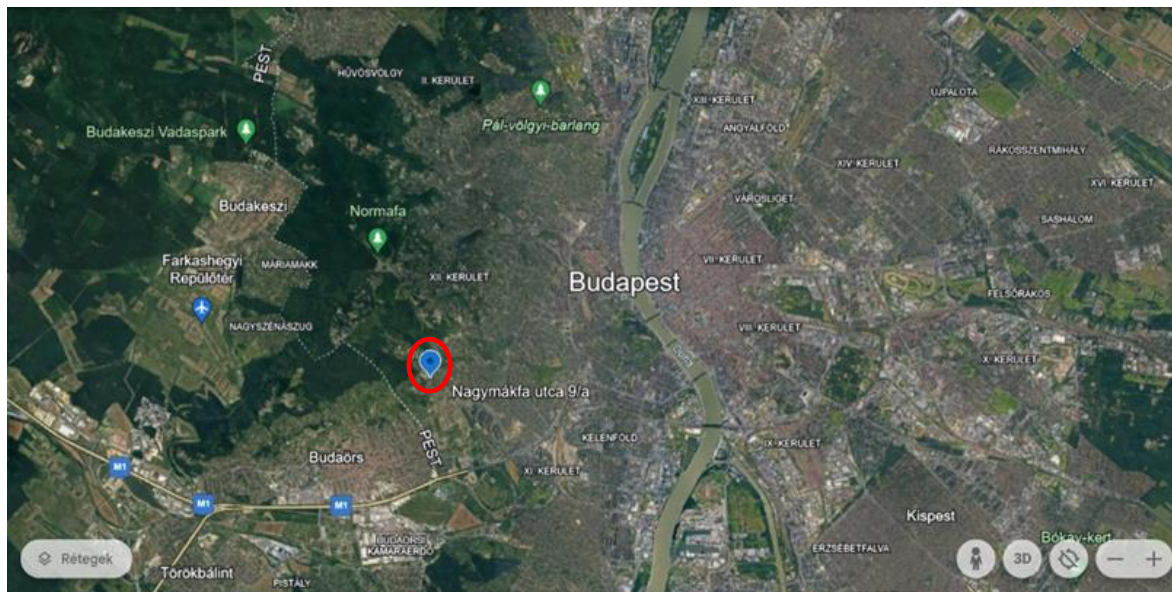
A fővárosban számos helyen lehet találkozni földhőszivattyús rendszerekkel. Az utóbbi évtized legnagyobb geotermikus beruházása a Fővárosi Állat-és Növénykertben valósult meg, ahol a Széchenyi Gyógyfürdőből származó felesleges hőt hasznosítják hőszivattyúk segítségével. Azonban a fürdőben a termálvizet több, mint 1000 méter mélyről nyerik, így ez nem esik a sekély geotermia tárgykörébe (Dorkota et al., 2020).

Sekély geotermikus készleteket kiaknázó földhőszivattyús rendszerekkel leginkább társasházak esetén találkozhatunk, ahol a fűtési-hűtési igényeket szolgálják ki ezzel a megoldással. Ilyen beruházások például a Németvölgyi úti, vagy a Kertész utcai lakópark. Továbbá szintén ilyen megoldásokat fognak alkalmazni az ún. Waterfront City nevezetű lakó-és irodaház esetén (Dorkota et al., 2020). Hazánk egyik legnagyobb sekély geotermikus beruházása a MOL-torony építése kapcsán valósult meg, ahol is az épület fűtési és hűtési igényeinek egy részét biztosítja földhőszivattyús rendszer. Ebben az esetben ez 220 darab 100 méter mélységű és 90 darab 120 méter mélységű szondát jelent, amelyeknek össz hossza több, mint 30 kilométer.

5. Vizsgálati helyszín adottságainak bemutatása

A mérés helyszíne a Budapest, 1112. Nagymákfa utca 9/a alatt található, $47^{\circ}28'41''\text{N}$ $18^{\circ}58'54''\text{E}$ koordinátájú telek (4.ábra), amely a mérések ideje alatt építési terület volt.

A terület 279 méteres tengerszint feletti magasságon helyezkedik el, közvetlenül a Budai-hegység lábánál.



4. ábra A terület elhelyezkedése Budapesten (Google Earth)

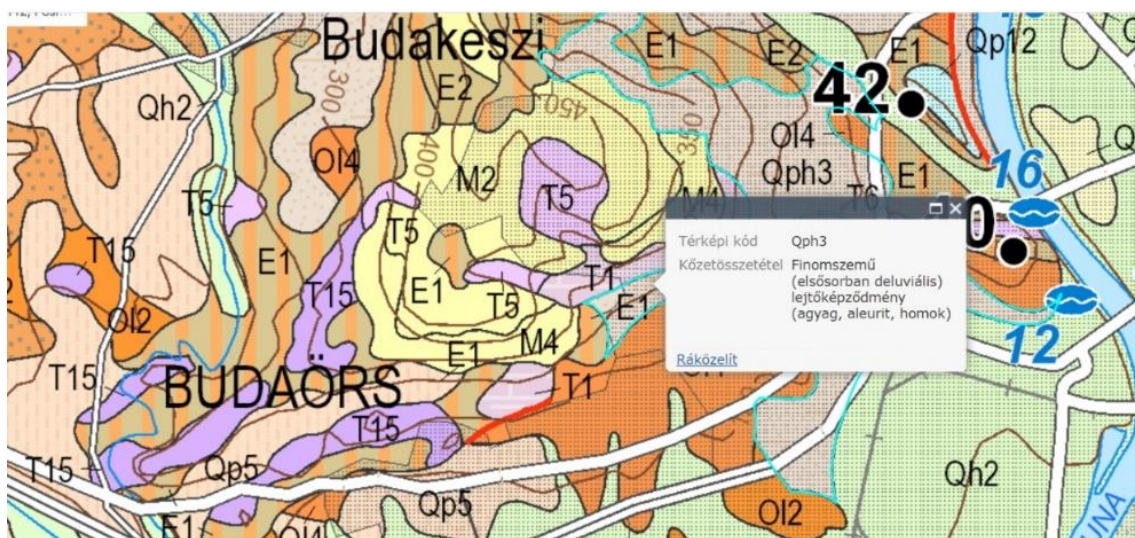
Az előzőekben vázoltak alapján Budapest geotermikus adottságai változatosak. A méréseknek helyet biztosító terület a Budai-hegység lábánál helyezkedik el. Ebből kifolyólag a geotermikus viszonyok változatosak.

5.1. A mérési helyszín földtani jellemzői

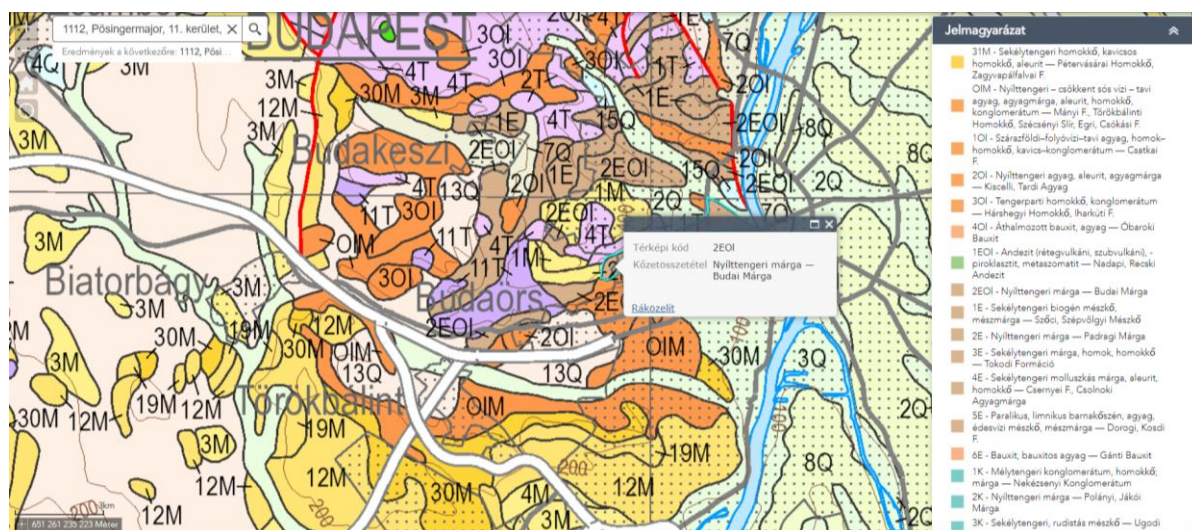
A kutatás során elvégzett méréseknek helyet adó terület földtanilag változatos, ugyanis a Nagymákfa utca DK-i részén a Kiscelli; - valamint a Tardi Agyag formációba tartozó kőzetek fordulnak elő a felszín közelében (MBFSZ, 2017). Ugyanakkor az ingatlan, ahol a mérések készültek, az utcának az ÉÉK-i részén fekszik, itt már a Budai Márga formációba tartozó kőzetek várhatók (6.ábra), amelyek esetéknként szintén lehetnek agyagosak (Gyalog et al., 1996).

A Budai Márga Formáció nyílttengeri, szürkés-barnás árnyalatú, erősen aleuritós, agyagos márga. Jellemző bioklasztjai között vannak Foraminiferák, illetve Bryozoák. Vastagsága 50-

A felszínen kvarter képződményekkel, lösszel találkozhatunk (5.ábra). A lösz alapanyaga eolikus módon szállítódott aleurit (kőzetliszt), ebből képződik diagenézis során. A magyarországi löszök nagy része deluviálisan (jég által) áttelepített lejtőlösz, így ezeket már a deluviális üledékekhez sorolják (Gyalog et al., 1996). Ezek szintén lehetnek agyagosak (5.ábra).



5. ábra A vizsgálati helyszín felszíni képződményei (MBFSZ, 2017)

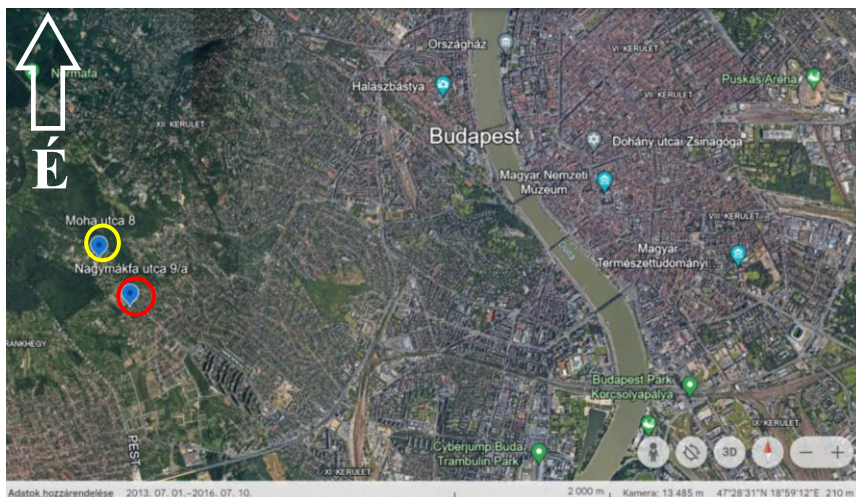


6. ábra A vizsgálati terület litológiája (MBFSZ, 2017)

5.2. Korábbi, közeli területről származó adatok

Budapesten, a 11.kerületben, a Moha utcában hajtottak végre korábban hasonló méréseket. (Pásztor Domokos szóbeli közlése).

Ez a terület, a dolgozatomban vizsgált helyszíntől 1 kilométerre, ÉÉK-i irányba található (7.ábra).



7.ábra A Moha utcai (sárgával); valamint a Nagymákfa utcai (pirossal) helyszín elhelyezkedése (Google Earth, szerkesztett)

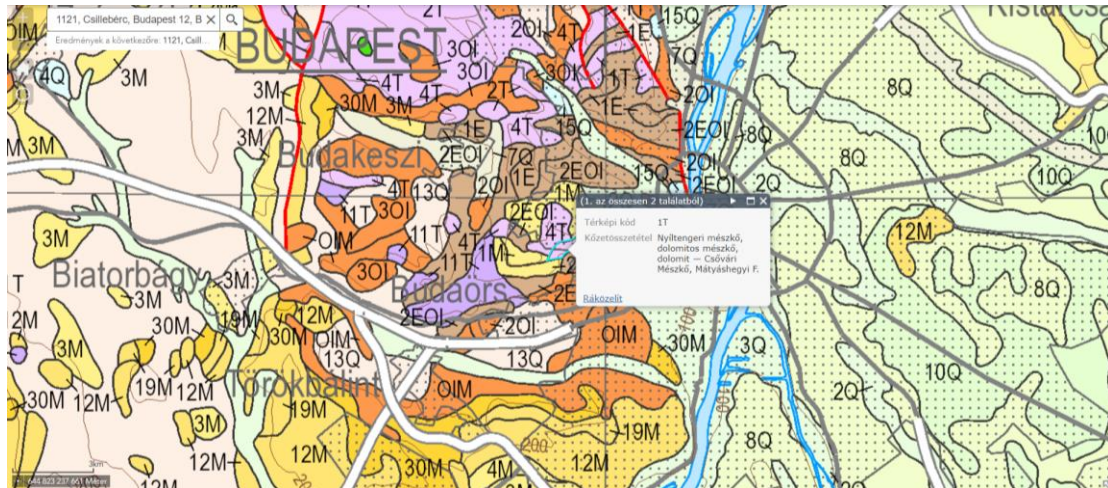
Bár a két helyszín közel helyezkedik egymáshoz, ugyanakkor földtani felépítésük eltérő. A Nagymákfa utcában a Budai Márga és -/vagy a Kiscelli Agyag Formációba tartozó képződmények várhatók, addig a Moha utcában a Mátyáshegyi Formációba tartozó kőzetek jelennek meg a felszín közelében (6. és 8.ábra). Ennek a jelentősége a jelenlegi kutatás szempontjából az, hogy a két helyszínen előforduló egyes kőzeteknek eltérő a hővezető képességük.

A karbonátos kőzeteknek jellemzően magasabb a hővezető képességük. A Moha utcai mérés esetén a szondateszt alapján ez az érték átlagosan 2,9 W/mK volt (Pásztor Domokos szóbeli közlése), ami az irodalmi adatokkal összehasonlítva átlagosnak mondható. A mészkő hővezető képessége 2,3-3,6 W/mK (Horváth, 1979).

Ezzel szemben az irodalmi adatok alapján az agyagmárga hővezető képessége 1,4-2,9 W/mK (Horváth, 1979), a márgára jellemző érték pedig 2,1-2,2 W/mK (Rohner et al., 2005). Tehát a Budai Márga hővezető képessége ezek az értékek között változhat. Az agyagos képződmények hővezető képessége 1-2,2 W/mK között mozog (Horváth, 1979). A Kiscelli Agyagra ez lehet a jellemző érték. Az agyagos-agyagmárgás kőzetek hővezető képessége széles tartományban változik, átlagos értéke körülbelül 2 W/mK (Horváth, 1979). A hővezető képességet

számszerűsíti az ún. hővezetési tényező, amely megmutatja, hogy egységnyi hőmérséklet különbség hatására, egységnyi idő alatt mekkora hőáram halad át egységnyi vastagságú anyagon. Mértékegysége W/mK, jele λ (Sanyi et al., 2010).

Ez alapján a Nagymákfa utcában alacsonyabb hővezető képességű kőzetek várhatóak, mint a Moha utcában, így feltételezhetően több idő szükséges a stabil hőmérséklet kialakuláshoz a szondában.



8.ábra Moha utca geológiája (MBFSZ, 2017)

6. Alkalmazott módszertan

Az építési területen 5 darab, 70 méter mélységű fúrás mélyítették a földhőszivattyús rendszer kiépítéséhez 2023.10.10-11. között. Mindegyik fúrás vízöblítéssel történt. A fúrás során felszínre kerülő anyagból 8 darab mintát vettem a rétegsor vizsgálatára.

A fúrás befejezése után kezdődött a 40 milliméter átmérőjű, szimpla U alakú szondák (9.ábra) lehelyezése, majd pedig tömedékelése. Ezt követően a szondák ragasztószalaggal lezárásra kerültek. A szondák zártak, munkaközegük víz.

A hőmérséklet rögzítését egy 250 méter hosszú, Solisent Water Level Temperature Meter-rel végeztem (10.ábra). Az adatok rögzítésére 2 méterenként került sor, az egyes értékek leolvasása és jegyzőkönyvezése előtt 2-3 másodperces várakozással (12.ábra). A kapott adatok tizedesjegy pontosságúak, az utolsó mérést követően digitalizáltam azokat.

A szonda fél méterrel lógott ki a talajból, ezért minden mérés végrehajtása fél méteres ráhagyással történt a hőmérőn (11.ábra).



9. ábra Szonda behelyezés előtt



10. ábra Solisent Water Level Temperature Meter hőmérő



11. ábra Jegyzőkönyv és hőmérő

A fúrás lemélyítésének, valamint a szonda tömedékelésének a befejezése: 2023.10.11. 13:15.

Az mért hőmérséklet adatokat 2023.10.11-2023.10.17.-e között rögzítettem, az első napon óránként, a második napon két óránként, a többi mérés esetén pedig naponként. Az időjárás minden esetben száraz, enyhén borult volt, a hőmérséklet 20°C körül alakult.



12.ábra Eredmények rögzítése a helyszínen mérés közben

7. Eredmények és értelmezésük

A mérésekből két eredmény született. Először is a fúrásból származó mintákat vettem össze az előzetesen, irodalmi forrásokból származó feltételezésekkel, melynek eredménye a rétegsor leírása. Ez után következett a szondából származó hőmérsékleti adatok feldolgozása és értelmezése.

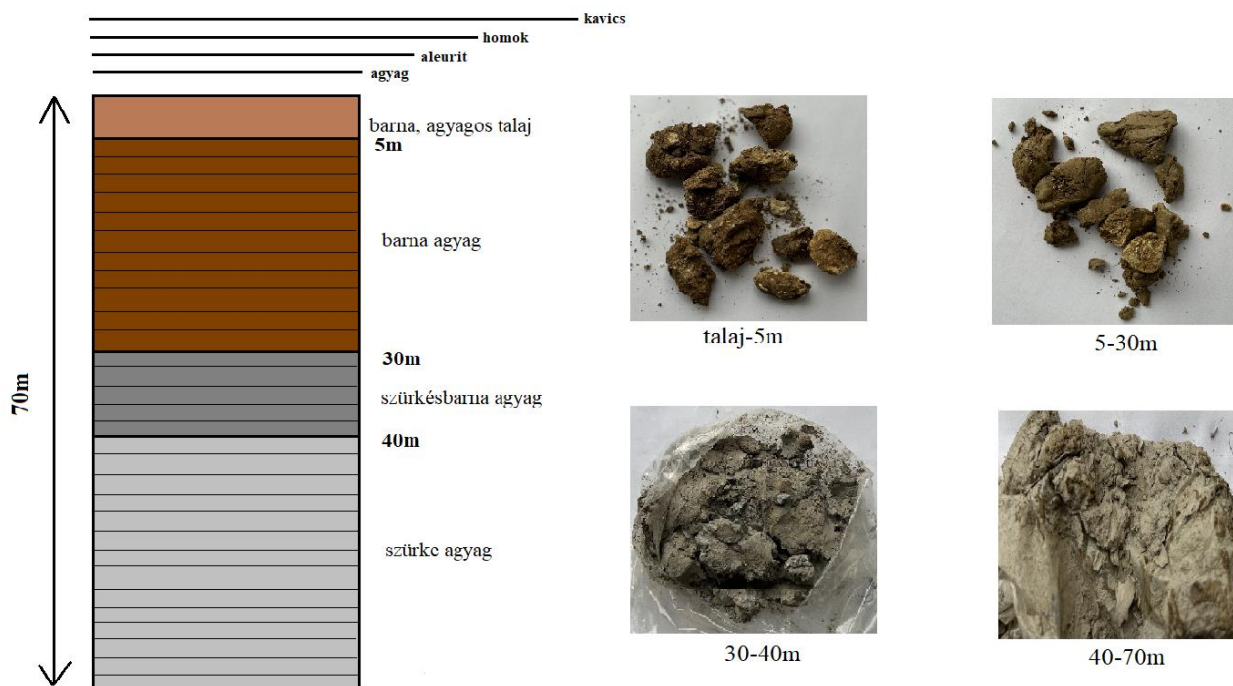
7.1. A fúrásból származó rétegsor

Az előzetes várakozások alapján a Nagymákfa utca környékének földtani felépítése változatos, az előzetesen várttól eltérés előfordul.

A fúrás során megközelítőleg egyveretű kőzetek kerültek a felszínre a furat teljes hosszából-közöttük különbség a színükben volt. A felszín közelében, a talajszinten barna, finomszemű, agyagos talaj a jellemző (13.ábra). Ez összhangban áll az előzetes várakozással, miszerint a területen agyagos, aleuritos, homokos lejtőképződmények fordulnak elő (5.ábra).

A fúrás mélyülésével nem változott jelentősen a litológia, végig agyagot találtunk. Mindössze 5; -30; -illetve 40 méternél mutatkozott egy színbeli változás. Fentről lefele haladva a rétegek fokozatosan mentek át barnából szürkébe (13.ábra). Ennek oka valószínűsíthetően a csökken szerves anyag tartalom. Bár az előzetes várakozások alapján a fúrás mélyítése Budai Márgában volt várható, amelynek a korábban kifejtettek alapján lehet agyagos kifejlődése. De a makroszkópos vizsgálatok alapján ennek mértéke a kutatásban vizsgált kőzetek esetén jelentősen meghaladta az erre a formációra jellemzőt, azaz a fúrás mélyítése a Kiscelli Agyagban történt, továbbá nem jelentek meg karbonátos képződmények, mint a Moha utcai helyszínen.

A területen a földhőszivattyús rendszerhez 5 fúrást mélyítettek, és bár ezek közül csak az egyiket vizsgáltuk a hőmérséklet alakulását, ettől függetlenül eltérés a többi fúrásból származó kőzetek esetén nem volt megfigyelhető.



13.ábra A vizsgált fűrásból származó rétegsor és az abban megjelenő kőzetek

7.2. A szondában mért hőmérsékleti adatok

A mért hőmérsékleti adatokat az 1. táblázatban foglaltam össze.

1.táblázat A szondában mért adatok, pirossal a napi legmelegebb, kékkel a napi leghidegebb hőmérséklet

Mélység (m)	Mérések (°C)									
	1./1	1./2	1./3	1./4	2./1	2./2	3./1	4./1	5./1	6./1
2	21,3	20,7	18,9	18,8	18,9	18,9	17,6	17,6	16,2	16
4	20,8	20,2	18,9	18,7	17,4	16,7	16,4	16,2	16,2	16
6	20,2	19,3	18,1	17,9	15,2	15,1	14,6	14,3	14,1	14
8	19,9	18,7	17,4	16,9	14,1	14	13,6	13,4	13,2	13,3
10	19,7	18,3	16,8	16,2	13,6	13,5	13,1	13	12,8	12,9
12	19,6	18,1	16,4	15,8	13,3	13,3	13	12,9	12,7	12,7
14	19,6	18	16,2	15,7	13,3	13,3	12,9	12,9	12,6	12,7
16	19,5	17,8	16,1	15,6	13,3	13,3	12,9	12,9	12,7	12,7
18	19,4	17,8	16	15,5	13,3	13,3	12,9	12,9	12,7	12,7
20	19,3	17,7	15,9	15,5	13,3	13,3	13	12,9	12,8	12,7
22	19,3	17,7	15,9	15,5	13,3	13,3	13	12,9	12,8	12,8
24	19,4	17,7	15,9	15,5	13,3	13,3	13	12,9	12,8	12,8
26	19,4	17,7	15,9	15,5	13,4	13,3	13	12,9	12,9	12,8
28	19,4	17,7	15,9	15,5	13,4	13,4	13,1	13	12,9	12,9
30	19,3	17,7	16	15,5	13,5	13,4	13,1	13	13	12,9
32	19,5	17,7	16	15,5	13,5	13,4	13,2	13	13	13
34	19,6	17,7	16,1	15,5	13,5	13,5	13,3	13,1	13,1	13
36	19,4	17,7	16,1	15,6	13,6	13,6	13,4	13,1	13,1	13
38	19,3	17,7	16,1	15,6	13,6	13,6	13,4	13,2	13,2	13,1
40	19,3	17,7	16,1	15,6	13,7	13,6	13,4	13,3	13,2	13,2
42	19,4	17,7	16	15,6	13,7	13,7	13,4	13,3	13,3	13,2
44	19,3	17,7	15,9	15,6	13,8	13,7	13,5	13,4	13,3	13,3
46	19,1	17,6	15,9	15,6	13,8	13,8	13,5	13,4	13,4	13,3
48	19	17,6	15,9	15,6	13,9	13,8	13,6	13,5	13,5	13,4
50	19,2	17,6	15,9	15,6	13,9	13,9	13,7	13,6	13,5	13,5
52	19,2	17,6	16	15,7	14	13,9	13,7	13,6	13,6	13,5
54	19,1	17,6	16	15,7	14	14	13,8	13,7	13,7	13,6
56	19	17,5	16	15,7	14,1	14	13,8	13,7	13,8	13,7
58	18,9	17,5	16	15,7	14,2	14,1	13,9	13,8	13,8	13,7
60	18,8	17,5	16	15,7	14,2	14,2	14	13,9	13,9	13,8
62	18,8	17,5	16,1	15,7	14	14,2	14	14	14	13,9
64	18,8	17,4	16,1	15,7	14,3	14,3	14,1	14,1	14	13,9
66	18,7	17,4	16,1	15,7	14,4	14,3	14,2	14,1	14,1	14
68	18,6	17,3	16	15,7	14,4	14,4	14,2	14,1	14,1	14,1
70	18,4	17,2	15,9	15,7	14,4	14,4	14,3	14,2	14,2	14,2

A méréseknél az első szám a napot, a második szám az adott napi mérés számát jelöli.

1./1 mérés:

Időpont: 2023.10.11 13:30-14:05

A mért adatok igencsak változatosak, széles határok között mozognak (14.ábra). Az előzetes várakozásokkal ellentétben a hőmérséklet összességében a mélységgel csökken. Ennek oka, hogy erre a mérésre 15 perccel a fúrás után került sor, így a környezetnek nem volt különösebb ráhatása a szondára. A legfelső és a legmélyebb pont között $2,9^{\circ}\text{C}$ különbség van.

1./2 mérés:

Időpont: 2023.10.11. 14:30-14:45

Összképe hasonló az első méréséhez. A két végpont közötti hőmérséklet eltérés $2,5^{\circ}\text{C}$. Fentről lefelé ebben az esetben is csökken a hőmérséklet, azonban az megfigyelhető, hogy a felső 10 métert leszámítva, az adatok 1°C belül mozognak, illetve, hogy 20-62 méter között az adatok majdnem konstansok.

1./3 mérés:

Időpont: 2023.10.11 16:30-16-45

A felső 20 méter adatainak mintázata tökéletesen leköveti az előző mérést, azonban jelentős, helyenként több fokos különbségekkel. A szonda teteje és alja közötti hőmérséklet eltérés követi az eddigieket, jelen esetben 3°C . A 20 méter alatti térrész adatai változatosak, hőmérséklet emelkedések és csökkenések váltják egymást.

1./4 mérés:

Időpont: 2023.10.11 17:30-17:45

Az első olyan adatsor, ahol az előzetes várakozásoknak megfelelően változik a hőmérséklet, azaz a mélységgel növekszik. A legfelső métereken jól megfigyelhető a napsugárzás hatása. Ezt egy stagnálás követi, amely után a hőmérséklet a mélységgel növekedni kezd, igaz itt még csak minimális mértékben.

2./1 mérés:

Időpont: 2023.10.12. 11:30-11:45

A heterotermális zóna tökéletesen kirajzolódik az adatokból, a legfelső 10 méteren több mint 5°C a hőmérséklet csökkenés, amit a melegebb felszíni és felszínközeli hőmérséklet okoz. Ezt egy stagnálás követi, azonban az előző méréstől eltérően ez hamarabb kezdődik el, és kisebb mélységben is fejeződik. Innen a hőmérséklet emelkedésnek indul, az utolsó mérési pontig 1°C -t nő. Szintén eltérés az eddigiekhez képest, hogy a szonda alja és teteje között $4,5^{\circ}\text{C}$ a különbség. Továbbá a mintában szembetűnő egy kiugrás 62 méternél, ez valószínűsíthetőleg mérési vagy adatrögzítési hibának köszönhető.

2./2 mérés:

Időpont: 2023.10.12 13:30-13:45

24 óra telt el az első mérés óta. Az adatsor szinte tökéletesen megegyezik az előző mérésből kapottal.

3./1 mérés:

Időpont: 2023.10.13 11:00-11:15

Körülbelül 48 óra telt el az első mérés óta. A tendencia leköveti az utóbbi mérésnél leírtakat. 20 méter alatt is emelkedik a hőmérséklet, ennek relatív mértéke nagyobb, mint az előző mérésben, azonban számszerűsítve az értéke kisebb. A legalsó és legfelső mérési pont közötti hőmérséklet különbség az első napéhoz hasonló, $3,3^{\circ}\text{C}$.

4./1 mérés:

Időpont: 2023.10.14 9:00-9:15

Körülbelül 72 óra telt el az első mérés óta. Az adatsor egyre jobban illeszkedik az előző méréshez. A tendenciák ugyanazok, az eltérések az előző napitól maximum $0,3^{\circ}\text{C}$ -ak. A két végpont közötti különbség $3,4^{\circ}\text{C}$.

5./1 mérés:

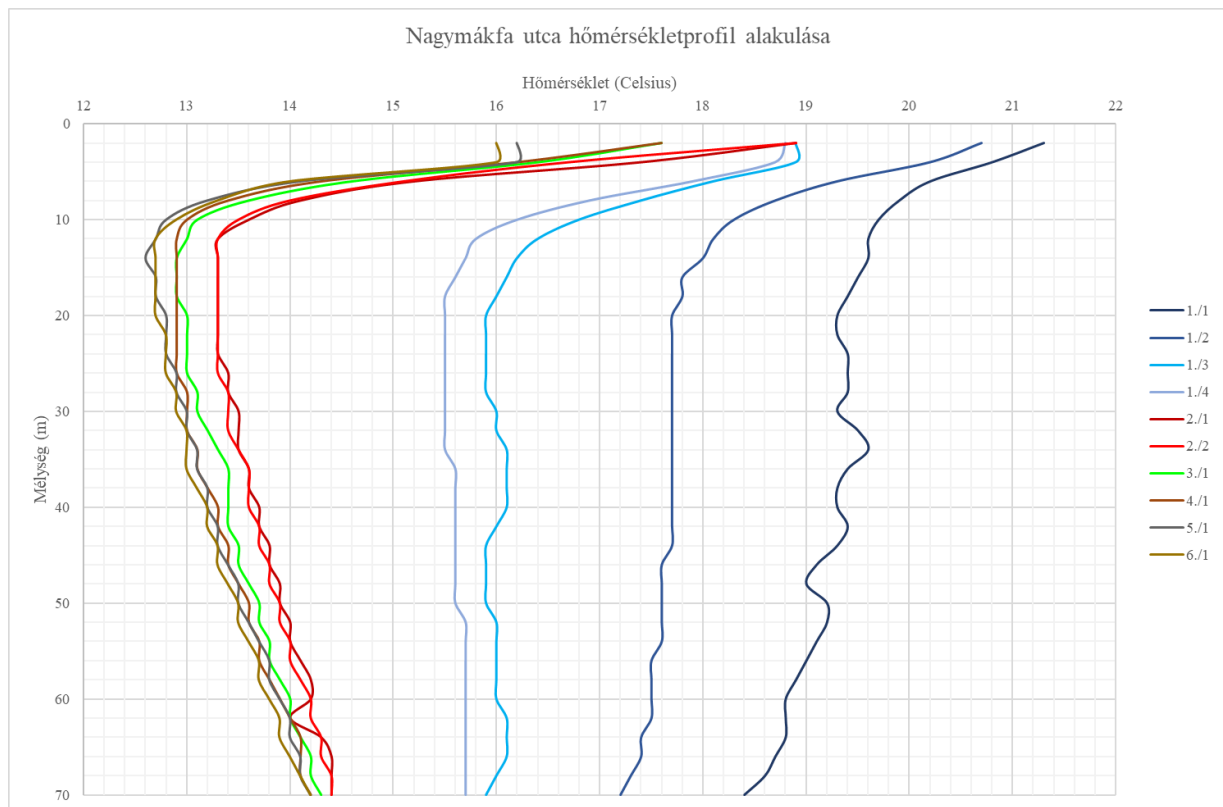
Időpont: 2023.10.16. 11-25-11:55

120 órával vagyunk az első mérés után. A legfelső mérési mélységen észlelhető egy erőteljes csökkenés az előző méréshez képest, ez feltételezhetően annak az eredménye, hogy előző nap, azaz 10.15.-én valamivel hidegebb volt az időjárás. Körülbelül 20 métertől lefele itt is nagyszerűen megfigyelhető a hőmérséklet emelkedése a szondában.

6./1 mérés:

Időpont: 2023.10.17 15:40-15:55

Az adatsor tökéletesen illeszkedik az előzőhöz. A szonda két végpontja között ebben az esetben van a legkisebb különbség, $1,8^{\circ}\text{C}$.



14.ábra Hőmérséklet változása a szondában a fúrást követően. Az első szám a napot, a második az adott napi mérést jelöli.

- Általánosan levonható megfigyelés, hogy a legmelegebb hőmérsékleti érték minden esetben 2 méteren jelentkezett. Ennek oka, hogy szondának ez a része van leginkább kitéve a külső hatásoknak, így a napsugárzásnak is. Szintén ebből az okból kifolyólag, az ebben a mélységben rögzített adatok között van a legnagyobb eltérés.
- Az első három mérés esetén az értékek változásában nem fedezhető fel mintázat.
- Egy kivételtől eltekintve a legnagyobb hőmérséklet változás 4-6 méter között játszódik le.
- A mérések előrehaladtával egyre jobban megfigyelhető a heterotermális zóna. Ezt követi a stagnálás, majd pedig az emelkedés.
- Az első napot leszámítva a görbék a mélység növekedésével egyre inkább összetartóak. Tehát ugyanaz a tendencia látszódik ezeken a görbéken, még pedig az, hogy a mélységgel fokozatosan nő a hőmérséklet.
- Szintén szembevetendő, hogy a második napi adatsorok szinte tökéletesen korrelálnak, azonban az utána következő mérésekhez képest jelentős a különbség a napok között. Minden bizonnyal ez annak az eredménye, hogy a második napi mérések között kevés idő telt el. Ezzel magyarázható az is, hogy ezen a napon nem volt eltérés a legfelső, azaz a 2 méteren mért hőmérsékletek között.

- Az adatok alapján a nyugalmi állapot eléréséhez 72 órának szükséges eltelnie a fűrást követően.

A szondában mért hőmérsékleti adatokat befolyásolható tényezők közül a legfontosabb a közeg hővezető képessége. Bár az előzetesen várt formációtól eltérő képződmények voltak megfigyelhetők a terepen, ez a mérés végkimenetelét nem befolyásolta. A karbonátos kőzeteknek jobb a hővezető képességük, mint az agyagos képződményeknek, ebből kifolyólag feltételezhető, hogy a karbonátos kőzetek esetén a stabil hőmérséklet profil kialakulása hamarabb végbe menne. Ennek a pontos megállapítása további méréseket igényel más földtani környezetben.

Szintén befolyásoló tényező lehet a mérés időpontja, mivel a szondákat csapvízzel töltik fel, és ennek a hőmérséklete évszakonként változó. Nyáron melegebb, télen hidegebb, ezért feltételezhetően nyáron a nagyobb hőmérséklet különbség miatt több idő lenne szükséges az állandó hőmérséklet beállításához. Ennek pontos megválaszolása szintén további méréseket kíván.

8. Következtetések

Tudományos Diákköri kutatásom célja elsődlegesen a sekély geotermikus földhőszivattyús rendszerek kivitelezési idejének lecsökkentése. Ennek érdekében egy budapesti helyszínen kialakított szondában vizsgáltam a kialakítást követően a szondában fellépő hőmérséklet-viszonyok változásait, amely során 2 méterenként rögzítettem a hőmérséklet értékeket a szonda teljes hosszában.

A mérések célja a szondában fellépő hőmérséklet viszonyok változásának a megállapítása, illetve az ezekből levonható információk értelmezése.

Az eredmények alapján megfigyelhető, hogy a fűrés valóban számottevő hatással van a szondában jelentkező hőmérsékleti viszonyokra, ugyanis már a legelső mérés adatsora sem egyenletes. Ennél a mérésnél egy nagyjából függőleges görbének kéne megjelennie, ugyanis itt még csak a feltöltés során beletöltött víznek a hőmérsékletét kéne mérni, azonban a környezetnek már itt is volt ráhatása a szondára.

A második naptól kivehető egy stagnálás az összes adatsorban. Ennek a mélysége jellemzően 10-30 méter között van. Ez a mélység egybeesik a heterotermális zóna alsó határával. Ezt követően mindegyik adatsorban növekvő értékek figyelhetők meg. Innentől kezdve lehet kijeleneti, hogy az előzetes várakozásoknak megfelelően, a mélységgel nő a hőmérséklet. Továbbá a második naptól a hőmérsékleti adatokból kapott görbék alakja megegyezik.

Végezetül a legfontosabb következtetés, hogy az adatok 72 óra után szinte megegyeznek, a belőlük kapott görbék hibahatáron belül egyformák. Bár már 48 óra elteltével is közelítünk ehhez az eredményhez, annál az adatsornál még helyenként a 0,1-0,2°C meghaladó eltérések vannak a későbbi napok méréseihez képest.

Ezeknek az eredményeknek köszönhetően lehetőség mutatkozik egy ipari beruházás kivitelezési idejének a lecsökkentésére, valamint az tudomány számára sikerült új adatokkal szolgálni egy eddig alul reprezentált témában.

9. Összefoglalás és további lehetőségek a kutatásban

Hazánk világviszonylatban is kiemelkedő geotermikus adottsággal bír, de nem csak a mélygeotermiában rejlik lehetőség a fosszilis energiahordozók kiváltására és a szén-dioxid kibocsátás csökkentésére. Jelentős kihasználható potenciált nyújtanak a sekélygeotermikus földhőszivattyúk, amelyek hozzájárulhatnak az energiaválság, valamint import energiától való függés mérsékléséhez is. Mint minden ipari beruházás, egy sekély geotermikus rendszer kiépítése esetén is lényeges, hogy mennyi időt vesz igénybe a kivitelezés. Ökölszabály szerint a szonda elhelyezéséhez szükséges fúróluk mélyítése és a kiépítés megkezdése között egy hétnek kell eltelnie. Kutatásom célja annak meghatározása volt, hogy a fúrás milyen hatással van a szonda hőmérsékletére. Ezt a kérdést egy konkrét budapesti helyszín egy újonnan létesített szondájában megvizsgálva rámutattam, hogy az egyensúlyi állapot jóval korábban kialakul (~3nap) a szonda és környezete között.

Természetesen egy vizsgálat még nem elégséges a kérdés bizonyítására. De az eredmények biztatóak és reményeink szerint a kutatások folytatásával sikerül a szondatelepítés idejét lerövidíteni, továbbá a tudomány számára is új adatokkal szolgálni. Fontos kihangsúlyozni, hogy különböző geológiai környezetben, valamint eltérő évszakban eltérőek lehetnek az eredmények, így a probléma teljes körű vizsgálata további méréseket igényel.

Ennek első lépése, egy hasonló geológiai környezetben végrehajtott mérés lenne, azonban másik évszakban, hogy választ kapjunk arra a kérdésre, hogy a csapvíz hőmérséklete milyen hatással van a végeredményre. Ezt követően célszerű lenne méréseket végrehajtani eltérő geológiai környezetekben. Az ezekből származó eredmények segítségével pedig lehetőség nyílna a felvetett téma minden aspektusának megvizsgálására, továbbá az együttes hatások kiértékelésére.

10. Táblázat; -és ábrajegyzék

1.táblázat A szondában mért adatok, pirossal a legmelegebb, kékkel a leghidegebb hőmérséklet (saját)	19
1. ábra Magyarország hőfluxus térképe (Dövényi, 2002 nyomán, Mádlné Szőnyi és Ádám, 2011).....	4
2. ábra Hőszivattyú felépítése (Ádám, 2012).	7
3. ábra Zárt is nyitott földhőszivattyús rendszerek (Forrás: www.softinway.com)	8
4. ábra A terület elhelyezkedése Budapesten (Google Earth)	11
5. ábra A vizsgálati helyszín felszíni képződményei (MBFSZ, 2017).....	12
6. ábra A vizsgálati terület litológiája (MBFSZ, 2017).....	12
7.ábra A Moha utcai (sárgával); valamint a Nagymákfa utcai (pirossal) helyszín elhelyezkedése (Google Earth, szerkesztett)	13
8.ábra Moha utca geológiája (MBFSZ, 2017).....	14
9.ábra Szonda behelyezés előtt.....	15
10.ábra Solisent Water Level Temperature Meter hőmérő	15
11.ábra Jegyzőkönyv és hőmérő	15
12.ábra Eredmények rögzítése a helyszínen mérés közben	16
13.ábra A vizsgált fúrásból származó rétegsor és az abban megjelenő kőzetek	18
14.ábra Hőmérséklet változása a szondában a fúrást követően. Az első szám a napot, a második az adott napi mérést jelöli.	22

11. Forrásjegyzék

Ádám B. (2012). Földhőszondák hőtechnikai viszonyai hőszivattyús rendszereknél. Doktori értekezés. SZIE Gépészmérnöki Kar Folyamatmérnöki Intézet, Gödöllő

B. Sanner & G. Hellström & J. Spitler & S. Gehlin, (2005). Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application

Dorkota L., & Tóth A., & Nyikos A., (2020). Geotermikus Budapest

Dövényi P. & Horváth F., 1988: A review of temperature; thermal conductivity; heat flow data from the Pannonian basin. — In: ROYDEN, L. H. & HORVÁTH, F. (eds): The Pannonian Basin, a Study in Basin Evolution. — American Association of Petroleum Geologists, Memoir 45, 195–223.

Dövényi P., & Horváth F., & Liebe P., & Gálfi J., & Erki I., (1983). GEOTHERMAL CONDITIONS OF HUNGARY

E. Rohner, & L. Rybach, & U. Schärli (2005). A New, Small, Wireless Instrument to Determine Ground Thermal Conductivity In-Situ for Borehole Heat Exchanger Design

Gyalog L., & Haas J., & Hegyiné Rusznyák É, (1996). A FÖLDTANI TÉRKÉPEK JELKULCSA ÉS A RÉTEGTANI EGYSÉGEK RÖVID LEÍRÁSA. Alkalmi kiadvány. Magyar Állami Földtani Intézet

G. Badino (2017). Geothermal flux and phreatic speleogenesis in gypsum, halite, and quartzite rocks. International Journal of Speleology, 47(1), 1.

Holics L., (1998). Fizika összefoglaló, TypoTex Elektronikus Kiadó Kft., Budapest, p. 333.

Horváth F., (1979). A geotermikus kutatásban használatos fizikai mennyiségek és mértékegységek. MAGYAR GEOFIZIKA XX. ÉVF. 1. SZ.

Horváth F., (2007). A PANNON-MEDENCE GEODINAMIKÁJA Eszmetörténeti tanulmány és geofizikai szintézis

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, 53, pp. 328-352.

Kercsmár Zs., & Budai T., & Csillag G., & Selmeczi I., & Sztanó O., (2015). Magyarország felszíni képződményeinek földtana. Alkalmi kiadvány. Magyar Földtani és Geofizikai Intézet

- Lenkey L., & Mihályka J., & Paróczy P., (2021). Review of geothermal conditions of Hungary
- Mádl-Szőnyi J., & Virág M., & Zsemle F., (2015). Potential maps for the hydrogeologic prerequisites of the installation of deep geothermal doublets and groundwater source heat pump systems in Budapest, Hungary
- MBFSZ (2017). <https://map.mbfisz.gov.hu/fdt500/> (Letöltés: 2023. november. 12.)
- MBFSZ (2017). <https://map.mbfisz.gov.hu/atlasz200/> (Letöltés: 2023. november. 12.)
- Pásztor D., (2022). SZONDATESZT – GEOTHERMAL RESPONSE TEST. Geo Concept Kft. Budapest
- Szanyi J., & Medgyes T., & Kóbor B., & Kovács B., & Jánosi-Mózes T., & Csanádi A., & Bozsó G., (2010). Szemelvények a geotermikus energia hasznosítás hidrogeológiai alkalmazásaiból
- Szlivka F., (2014). Hő- és Áramlástechnika
- Y. Motamedi & N. Makasis & A. Arulrajah & S. Horpibulsuk & G. Narsilio (2020). Előadás: E3S Web Conferences, La Jolla, California, USA, 2022.

12. Köszönetnyilvánítás

Hálával tartozom Mádlné Dr. Szőnyi Judit Tanárnőnek, aki az egyetemi tanórák alatt felkeltette az érdeklődésemet a téma iránt.

A dolgozat nem jöhetett volna létre a Geo Concept Kft., illetve Pásztor Domokos nélkül, aki a téma felajánlásán túl biztosította a méréshez szükséges eszközöket, továbbá beavatott a szakma rejtelseibe. Szintén köszönettel tartozom Tóthi Tamarának a mérések lebonyolításban nyújtott segítségéért.

Végezetül a legnagyobb köszönettel Markó Ábelnek tartozom, akihez bármilyen ügyes-bajos kérdéssel fordulhattam a dolgozat megírása közben.

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