

Ádám Béla, Tóth László

Talajok hőtechnikai ellenőrzése függőleges elrendezésű hőszondák telepítéséhez

2007-ben kezdődött meg Európa 7. legnagyobb, 18 000 méter földhőszondát tartalmazó, hőszivattyús fűtő- és hűtőenergiára létesült épülete (Telenor központi épület). A kivitelezés megkezdésével azonos időszakban végeztük a területen a próbafúrásokat. Ezek szolgálták a rendszer méretezéséhez szükséges adatok meghatározását, a fúrási rétegsor geofizikai méréseit, és a szondatesztet (Thermal Response Test – TRT).

A vizsgálatok a nyugalmi állapot felmérésével kezdődtek, de azóta is folyamatosan regisztráljuk a felszín alatti hőmérsékleteket, azaz a rendszer hatását a földtani környezetére. Megállapításaink szerint a tartós fűtési és a hűtési időszakokban a 100 m mély szondafuratok (közvetlen a furatok mellett) 10-11 °C-os hőmérsékletváltozást okoztak a nyugalmi bázishőmérséklethez képest. A működő földhőszonda közvetlen közelében a fűtés 5,74 °C hőmérsékletcsökkenést, a hűtés 4,30 °C hőmérsékletemelkedést eredményezett. A működő szondától 3,5 m-re a fűtés 0,28 °C hőmérsékletcsökkenést eredményezett, a hűtés hatására a kőzet 0,08 °C-ot melegedett. A furatoktól 6,6 m távolságban hőmérsékletváltozás nem volt mérhető, ezért a szondák elhelyezéséhez 7 m-es rasztert ajánlottunk.

Problémafelvetés

Ma már Magyarországon is egyre nagyobb számban alkalmazzák a függőleges elrendezésű hőszondákat talajok hőszivattyúzásához, ún. geotermikus energia hőszivattyús felhasználásához, épületek fűtésére és hűtésére. A jellemző építési módok közül a kisebbeknél csak néhány szondát (3-7 db) létesítenek, ezek főleg nagyobb családi házak fűtését és hűtését szolgálják. A nagy és kifejezetten nagy létesítményeknél (pl. nagy alapterületű irodaházak, iskolák, különféle közösségi épületek) 50-180 szondát is telepítenek. A kisebb létesítményeknél az építmények helye és a szondakiosztási lehetőségek kötöttek, legfeljebb a szondamélységet változtatják (a biztonság miatt ezeknél a hőtechnikai túlméretezés a jellemző). Magyarországon nagyon nevezhető rendszerekből már több is létesült. Ilyen a Törökbálinton megvalósult Telenor Ház, ahol összességében 18 000 m szondafurat létesült, azaz 180 db 100 m mély furat szolgálja az épület hűtési és fűtési energiaellátását. A nagy európai rendszerek adatait tartalmazza az 1. táblázat, melyben a Magyarországon megvalósult rendszer az előkelő 7. helyen található. A nagyobb létesítményeknél célszerű a rendszer létesítését megelőzően ún. szondatesztet készíteni (Thermal Response Test – TRT), mellyel meghatározható az adott területen (fúrástechnikailag még kedvező helyen), például 100 m mélységig a talaj hőelnyelő, illetve hőleadó képessége, a szükséges hőkapacitás mértéke, vagyis a szükséges szondaigény, de a szondák egymáshoz viszonyított távolsága is, hogy egymást ne befolyásolják, s a létesítés költséghatékony legyen. Ezek birtokában már pontosabb számításokat végezhetünk, de nem csak a talajból kinyerhető, illetve elnyelhető hő mennyiségéről, hanem a hőmérsékletváltozás intenzitásáról is. 50-150 db szondafurat esetén a megelőző mérés költségei már elenyészők a létesítés költségéhez viszonyítva.

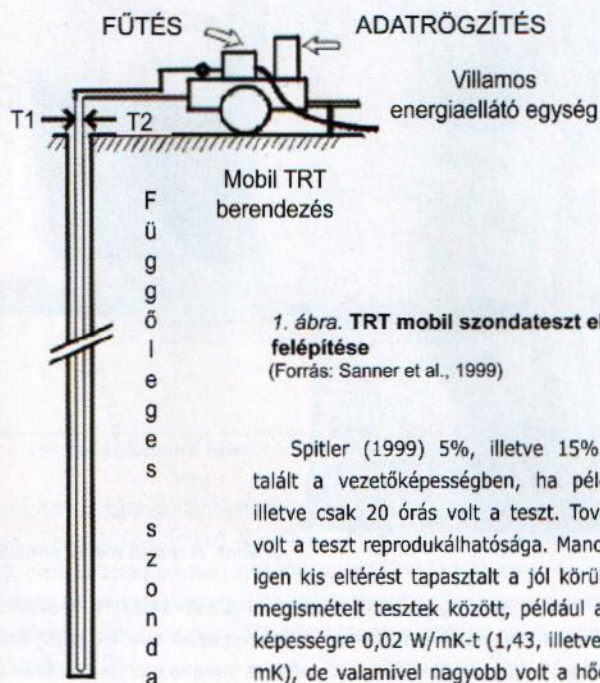
Anyag és módszer

(A hőszondás rendszer vizsgálata a tervezés és telepítés előtt)

A szondateszt alkalmazását számos kutató ajánlja [2], a méréseket és a számításokat el is végzik a nagy telepítések előtt, de gyakran a későbbi ellenőrzés miatt ún. monitoring furatokat is készítenek [3]. Már 1995-ben mobil TRT-meghatározó berendezést fejlesztettek a Luleå Technical University laboratóriumában, amely alkalmas volt a szondákban, illetve furatokban létrejövő hőcserélés meghatározásához 10 m-től 100 m-es mélységekig (Gehlin and Nordell, 1997). Ettől független, de hasonló fejlesztés volt Oklahoma State University laboratóriumában, 1966-ban. Németországban [9] az első TRT 1999-ben lett eredményesen kipróbálva (Sanner et al., 1999). Magyarországon a GEORT Kft. állított össze eljárási javaslatot [5] a szondateszt gyakorlati alkalmazására. Végül is a szondateszt gyakorlatilag egy gyorsított eljárás a talaj hőbefogadó és hőleadó képességének megállapításához. A mérési adatok birtokában a jellemző hővezetés matematikai összefüggésekkel is meghatározható, és ennek révén számítható a rendszerhez telepíthető hőszivattyú-kapacitás, a primer és szekunder oldal hőtechnika jellemzői. Sok vita folyt a tesztes időtartamáról. A kutatók a rövidebb és a hosszabb időtartamok mellett is érveltek (Skouby, 1998; Spitler et al., 1999). Az elemzések alapján végül a szerzők a min. 48 órás időtartamot tartották a leginkább megbízhatónak. Az időtartamot Eklöf és Gehlin (1996) a hővezető képességtől és a furat átmérőjétől tették függővé (nagyobb átmérőnél hosszabb tesztelési időt javasoltak).

1. táblázat

| Country | City/Project name | No. BHE | depth BHE | total BHE length |
|------------------------------|---------------------------------------|---------|-----------|----------------------|
| NO | Loerensko, SIA hospital* | ca. 300 | 150 m | ca. 45 000 m |
| NO | Oslo, Nydalen district | 180 | 200 m | 36 000 m |
| SE | Lund, IKDC | 153 | 230 m | 35 190 m |
| SE | Stockholm, Vällingby Centr.* | 133 | 200 m | 26 600 m |
| SE | Kista, Kista Galleria* | 125 | 200 m | 22 500 m |
| HU | Budapest Pillangó street, Tesco | 150 | 150 m | 22 500 m |
| TR | Istanbul, Metro market | 168 | 107 m | 18 000 m |
| HU | Törökbálint, Telenor House | 180 | 100 m | 18 000 m |
| HU | Törökbálint, School and Sport Centr.* | 180 | 100 m | 18 000 m |
| DE | Golm near Potsdam, MPI | 160 | 100 m | 16 000 m |
| SE | Stockholm, Blackeberg area | 90 | 150 m | 13 500 m |
| HU | Budapest Pesti street, Tesco | 130 | 100 m | 12 000 m |
| HU | Páty, Monicomp Ltd., logistics centr. | 120 | 100 m | 12 000 m |
| SE | Örebro, Musikhögskolan | 60 | 200 m | 12 000 m |
| DE | Langen, DFS | 154 | 70 m | 10 780 m |
| CH | Zürich, Grand Hotel Dolder | 70 | 150 m | 10 500 m |
| BHE: Borehole Heat Exchanger | | | | * under construction |



1. ábra. TRT mobil szondateszt elvi felépítése (Forrás: Sanner et al., 1999)

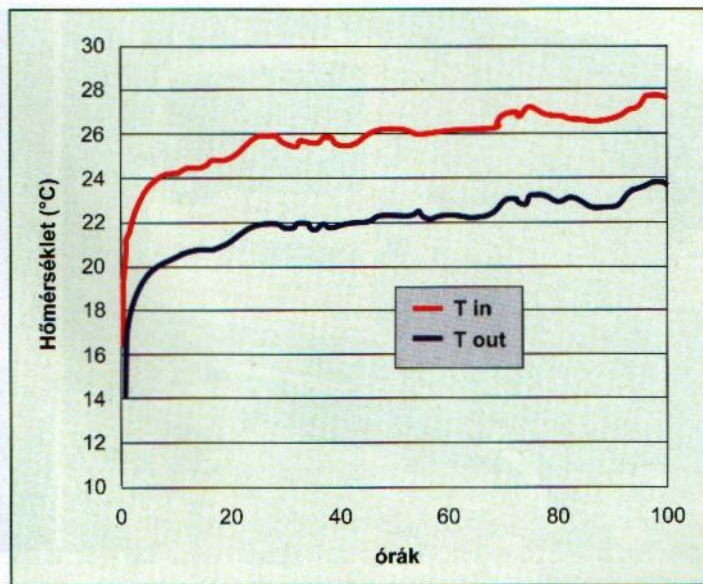
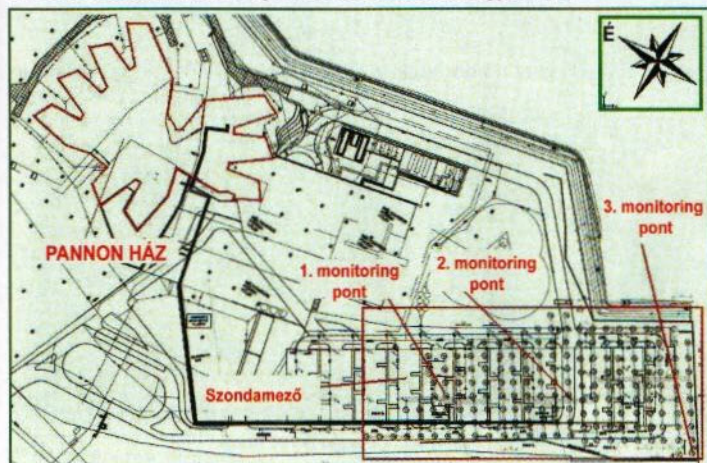
Spitler (1999) 5%, illetve 15% eltérést talált a vezetőképességben, ha például 50, illetve csak 20 órássá a teszt. További vita volt a teszt reprodukálhatósága. Mancz (1999) igen kis eltérést tapasztalt a jól körülhatárolt, megismételt tesztek között, például a vezetőképességre 0,02 W/mK-t (1,43, illetve 1,41 W/mK), de valamivel nagyobb volt a hőellenállás eltérése (17%). Sanner szerint az eredmény akkor egyértelmű, ha a vonalforrást minél inkább megközelítjük, és a paraméteres eljárásához ragaszkodunk. Cél szerű elvégezni mind a hőbeviteli, mind a hőelvételi tesztelést [5], mégpedig egységes módszer szerint. A munka során ezt a rendszert alkalmaztuk.

A létesítmény, a kutatás előkészítése

Helyszín

A Telenor Zrt. a 26 500 m² alapterületű új központi épület tervezése során, még 2007 nyarán döntött, hogy fűtésére és hűtésére a fosszilis energiahordozók helyett a megújuló energiát alkalmazzák. A társaság elkötelezett a környezettudatos megoldások iránt, ezért a gazdaságossági szempontokon túl a környezeti előnyök alapján döntött a hőszivattyús rendszer létesítése mellett. Az épületről általában elmondható, hogy a környezetbe való illesztése és az alkalmazott egyéb technológiák mind a takarékos energiafelhasználást és környezettudatos üzemeltetést képviselik. A tervezéskor a meghatározott szondaszámon túl még 3 szondát telepítettünk a talajhő-monitoring, illetve a szondás rendszer működésének nyomon követésére. Az első mérési pontot

3. ábra. A szondatesztel nyerhető információk egyike [9]



2. ábra. A szondatesztel nyerhető információk egyike [9] (Forrás Sanner et al., 1999) T_{in} = bemenő, T_{out}=visszaérkező

a szondamező első harmadában a mezőbe, a dupla szonda egyik ágába, a másodikat hasonlóan, de a két szonda közé (fele távolságban), a harmadikat a szondamezőtől 6,6 méterre helyeztük el (3. és 4. ábrák). Az első 100 méteres próbafúrás 2007. júliusban kezdődött. Ebebe telepítettünk a szimpla U hurokból álló szondát a tervezett geotermikus TRT előkészítéséhez. Először a fúrás után, az ún. in situ közethőmérséklet állapot-helyreállítását végeztük, hőmérsékletregisztrációval.

A mérőrendszer

Az alkalmazott berendezés és műszerek (mobil egységbe szerelve, 5. ábra):

- DA-S-R3 háromcsatornás hőmérséklet- és impulzus-adatgyűjtő,
- DA-S-4TRB 118 hőmérsékletregisztráló,
- DA-TIC 127 hőmérséklet-távadó,
- DA-S-TRC 260 hőmérsékletregisztráló.

Számítógépes adatgyűjtő és feldolgozó: SMART acu WIN-ESP, verzió: F252-SP1; EED 3.0 méretező szoftver.

Az eredményeinek kiértékelését a Kelvini vonalforrás-módszerrel végeztük [5] és [7]. Az ún. ekvivalens hővezető képesség (λ) a hővezetés differenciálegyenletének megoldásával kapható az alábbi képlet szerint:

4. ábra. A szondamező elhelyezkedése a később létesített gépkocsi parkoló alatt





5. ábra. A mobil mérőrendszer

$$T_f(t) - T_o = \frac{q_c}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{r_b^2}\right) - \gamma \right] + q_c \times R_b = \frac{q_c}{4\pi\lambda} \ln(t) + q_c \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2}\right) - \gamma \right) \right]$$

ahol:

T_f = a folyadék hőmérséklete

T_o = zavartalan talajhőmérséklet

λ = hővezető képesség [W/mK]

γ = állandó

a = hődiffúzió [m²/s]

t = a vizsgálat kezdete [s]

q = fűtési teljesítmény [W]

r_b = sugár [m]

R_b = termikus fúróluk-ellenállás [mK/W]

A fenti módszerrel meghatározott ekvivalens hővezetőképeség-érték (λ) tükrözi a kőzetformációban lévő konduktív és a talajvíz révén létrejövő konvektív hővezetést is.

Eredmények

Hőelnyelési teljesítmények

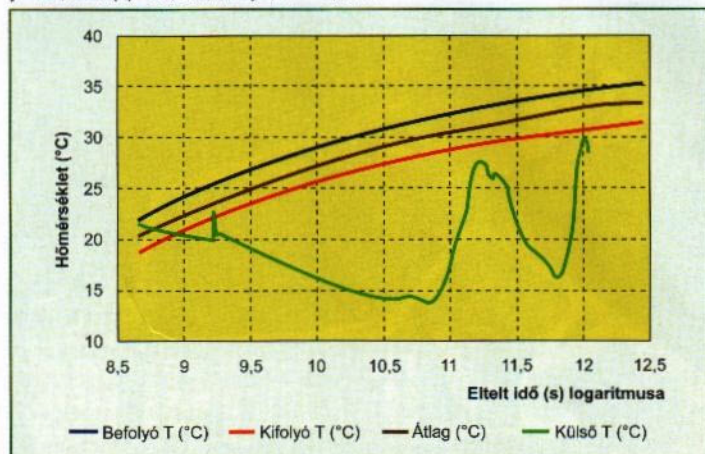
A TRT-vizsgálat megkezdése előtt a nyugalmi állapotot rögzítettük. A 100 m-es szimpla szonda teljes hosszában a hőmérsékleti adatokat 10, 40, 70 és

6. ábra. A szondák környezetéből felvehető hőteljesítmény (TRT)

$y = 30,364\ln(x) - 40,81$, befolyó, $R^2 = 0,9696$

$y = 29,886\ln(x) - 41,527$, átlag, $R^2 = 0,9738$

$y = 29,408\ln(x) - 42,244$, kifolyó, $R^2 = 0,9774$



100 m-es mélységben regisztráltuk (az értékek 11,99-13,97 °C között változtak). Először a középső szimpla szondában végeztük el a TRT-vizsgálatot (2007. július 17-20.). Az összidő a 100 méteres szimpla szonda esetében 68 óra 14 perc volt. A mérés során regisztráltuk az előremenő és visszajövő ág hőmérsékletét és a keringtetett folyadék tömegáramát (6. ábra).

A mérésnél:

- a maximális előremenő hőmérséklet: 35,34 °C,
- a $\Delta t = 3,85$ °C,
- a tömegáram 1,44 m³/óra,
- a bevitt fűtési teljesítmény 7,0 kW,
- A vízzel elnyelehető teljesítmény 6,42 kW, a glikollal elnyelehető pedig 5,91 kW volt.

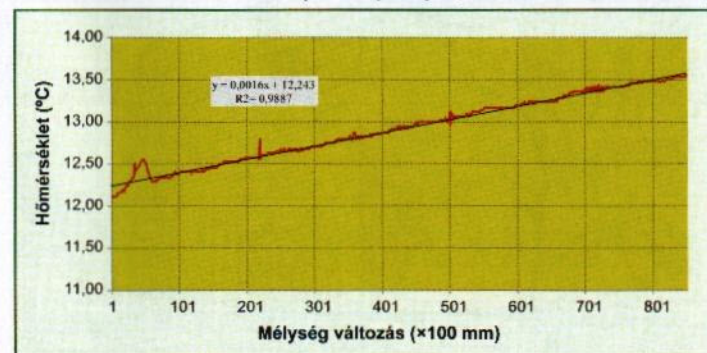
A talajszevények hőmérséklete a mélység függvényében

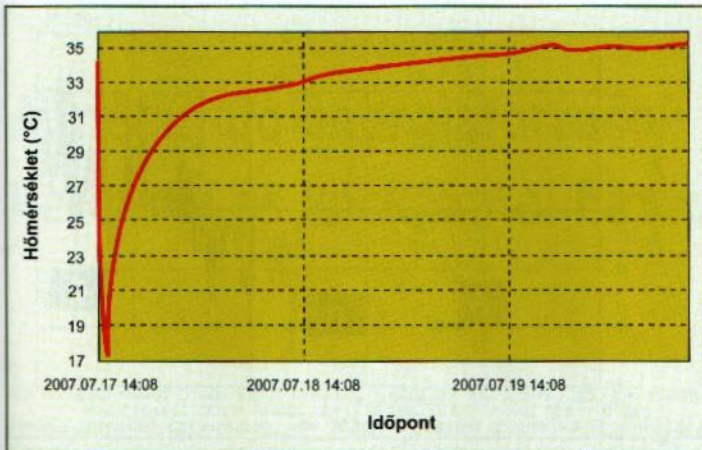
Nyugalomban lévő szondában (feltöltött állapotban), ~20 perc alatt, a 100 m-ig levezetett hőmérővel mért hőmérsékleteket a 7. ábra szemlélteti. A vízszahúzásnál a görbék jellegében nem volt szignifikáns különbség. Az eltérés a talajszevény ekvivalens hőelviteli képességét jelzi. A szórások, menet közbeni változások jelentéktelenek voltak, nem volt folyamatos jelentékeny növekedés, ami esetleges talajvízarámlást jelzett volna.

A fűrt szondaluk határ-hőterhelhetőségének vizsgálata

A kísérletben a felfűtött folyadékot a szondában keringtettük, s vizsgáltuk, hogy a fúróluk hűtőhatása milyen mértékben érvényesül. Ellenőriztük, hogy a folyamatos hőközlés hatására a hőmérséklet az idő függvényében mekkora

7. ábra. A talaj hőmérséklete a furat mélységének függvényében (ún. alapállapot, Törökbálint: 2007-07-17)





8. ábra. Az előremenő hőmérséklet változása az idő függvényében

intenzitással közelíti az állandósuló állapotot (8. és 9. ábrák). A 3×24 óra alatt elvégzett szondateszt alapján az elnevelhető hőteljesítmény 100 m-es szimpla szondára (glikollal) 5,91 kW-nak adódott. A fenti eredmények közelítő értékek, a tényleges szondaszám meghatározását – a response test eredményeit felhasználva – az erre a célra kifejlesztett EED 3.0 méretező szoftverrel végeztük el.¹

Az eredmények hasznosítása

Méretezés és kivitelezés

A fúrási rétegsor geofizikai mérését elvégeztük (a szelvény bemutatásától terjedelmi okok miatt eltekintünk), pontosítottuk a TRT-teszt során nyert hővezetési tényező értékét, és ezt az értéket használtuk a földhő-szondarendszer számítógépes modellezéséhez.

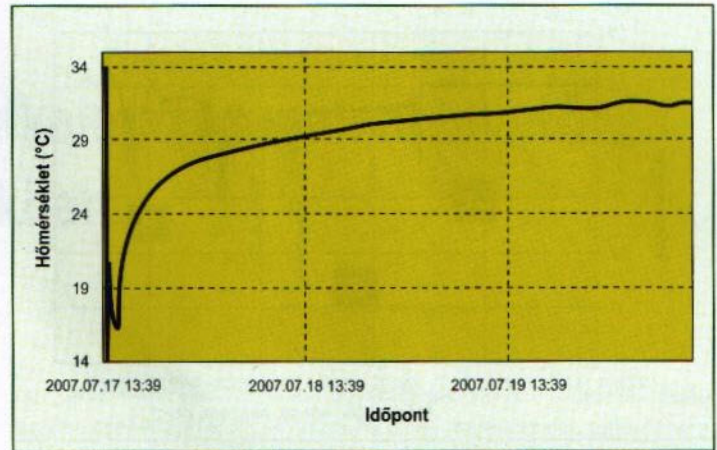
A terület rétegsora többnyire száraz agyagos, agyagmárgás, az alsó 80-100 méter szakaszon váltakozva mészmárgás rétegeket tartalmazott. A számítások alapján:

- a beépített szondák száma 180 db,
- a szondafuratok egyenként 100 m mélyek,
- a szimpla szondák $\Phi 40$ mm PE anyagúak,
- a szondafuratok bázistávolsága 7 m, amely értéket ugyancsak a modellezés alapján határoztuk meg.

10. ábra. Az osztók a gyűjtőaknában



¹ Earth Energy Designer



9. ábra. A visszatérő hőmérséklet változása az idő függvényében

A szondamező végül az épülettől távolabbra tervezett parkoló alá került, azon okból, hogy ez a terület régészetileg meg volt vizsgálva, és ezzel is beruházási költségcsökkentést lehetett elérni. A szondák vízszintes hálózatban, 60-60 db-os csoportokban vannak, és 3 db osztó-gyűjtő aknába lettek bekötve (10. ábra). Az innen kiépült gerincvezeték az épület hőközpontjába csatlakozik. Ahogy a teljes rendszert, úgy a hőszivattyúk kiválasztását is az épület energetikai jellemzői határozzák meg: fűtési terhelés, a teljes fűtési terhelés (óra), a hőszivattyú fűtési, hűtési terhelése (COP/SPF), a teljes hűtési terhelés (óra), továbbá fűtés és hűtés csúcsterhelése. A hőszivattyúk száma 3, teljesítményük egyenként 287,4 kW fűtésben és 321,9 kW hűtésben, s így az összes teljesítmény 862,2 kW fűtésben, 965,7 kW hűtésben (11. ábra). Mindegyik hőszivattyút a külső hőmérséklet vezérli, automatikusan állnak be fűtő vagy a hűtő üzemmódra. Teljesítményük 25-100% tartományban szabályozható. A külső elektromos vezérlő és automatikus szabályozó rendszer az épületfelügyelettel folyamatos kommunikációt tart. A hőközpont gépészeti egységeit teljesítményellenőrző monitoring rendszer egészíti ki. Ennek révén a rendszer teljesítményadatait rögzítik, és a hatékonyság is értékelhető.

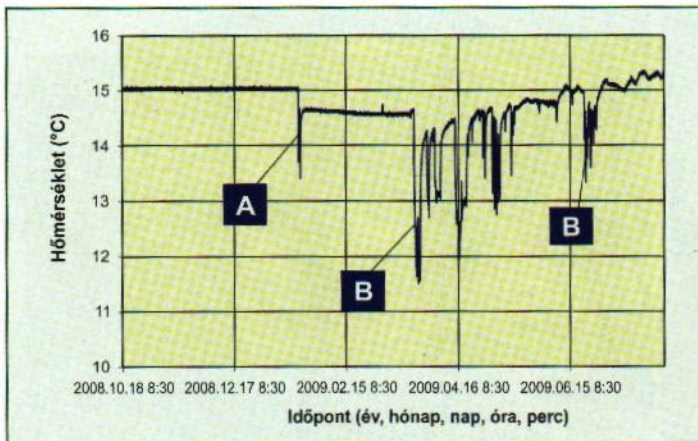
A létrehozott rendszer ellenőrzése (monitoring)

Hőmérséklet változása a szondamélység függvényében és a szondafuratok között

Említettük, hogy a 180 db működő szondán túl további 3 földszondát építettünk be a szondarendszer működésének vizsgálatára érdekében. Így a szondák

11. ábra. A hőszivattyúk





12. ábra

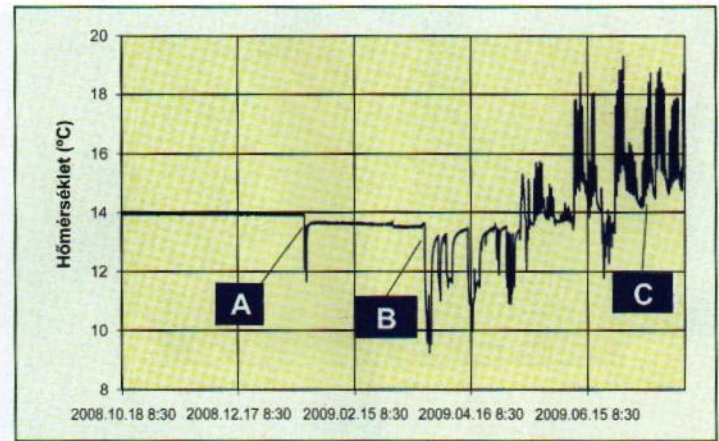
közötti és a szondamezőn kívüli környezetében a kőzet folyamatos hőmérsékletváltozását regisztrálni lehet. A monitoring-pontokat lásd a 3. ábrán. A monitoring-pontoknál (a 100 m-es szelvény mentén) 4 mélységben történik hőmérsékletregisztráció, 10, 40, 70 és 100 m-en. A hőmérséklet-regisztrálók 30 perces mintavételi gyakoriságra lettek beállítva. Az egyes hőmérséklet-regisztrálók hasonló hőmérsékleti értékeket mutattak az alapállapotot tekintve a 4 regisztrálási mélységben. A nyugalmi állapot adatai:

1. hőmérséklet-regisztráló: 10 m: 11,5 °C; 40,0 m: 12,7 °C; 70 m: 14,0 °C; 100 m: 15,0 °C.
2. hőmérséklet-regisztráló: 10 m: 11,4 °C; 40,0 m: 12,6 °C; 70 m: 13,8 °C; 100 m: 15,2 °C.
3. hőmérséklet-regisztráló: 10 m: 11,9 °C; 40,0 m: 12,3 °C; 70 m: 13,8 °C; 100 m: 15,0 °C.

Az 1-es ponton (11. ábra) az első próbaüzem során a hőmérséklet 13,41°C-ig „hült le” 100m-en, azonban a hőmérséklet 2 nap alatt 14,68 °C-ig regenerálódott (A). A második próbaüzem során a hőmérséklet 100 m-en (3 nap alatt) 11,50 °C-ig csökkent (B), azonban a leállás után 3 nap alatt a közhőmérséklet 14,29 °C-ig regenerálódott. A csökkenő fűtési igényekkel párhuzamosan növekedett a közhőmérséklet. A nyár elején elindult hűtési üzem hatására 15,0 °C-nál magasabb hőmérséklet volt 100 m-en (C). A 70 m-en elhelyezett hőmérsékletmérő nyugalmi állapotban 14,0 °C-ot regisztrált. A tavaszi fűtési szezonban (12. ábra) 9,26 °C-ig csökkent a hőmérséklet (A). Az április végétől induló hűtési üzem hatására 19,30 °C-ig emelkedett (B) július elején a közhőmérséklet, augusztus 4-én 16,4 °C-ot regisztráltunk 70 m-en (C). A 2-es ponton, 100 m-en a két földhőszonda közötti távolság felénél (a vizsgálati időszakban) a fűtési és a hűtési üzemek nem okoztak hőmérsékletváltozást. A próbaüzem hatására (14 nap) nem következett be hőmérsékletcsökkenés a szondától 3,5 m-re lévő mérési ponton. Április elejétől a fűtés hatására 15,2 °C-ról 14,92 °C-ig csökkent a hőmérséklet, majd az elindult hűtés következtében a földtani közeg 15,0 °C-ra melegedett fel.

Az eredmények összefoglalása

A módszeresen elvégzett tesztelés eredményeként a létesítmény fűtési és hűtési energiaellátásához 180 darab 100 méteres szondafúrást jelöltünk ki. Az épület beépített felületfűtő-hűtő rendszerét 18 000 méter talajszonda látja el. A működő földhőszonda közvetlen közelében a fűtés 5,74 °C hőmérsékletcsökkenést, a hűtés 4,30 °C hőmérsékletemelkedést eredményezett. A működő szondától 3,5 m-re a fűtés 0,28 °C hőmérsékletcsökkenést, a hűtés 0,08 °C-ot melegedést okozott. A földhőszonda-mezőtől 6,6 m-re elhelyezett mérési ponton nem észleltünk hőmérsékletváltozást a nyugalmi állapothoz ké-



13. ábra

pest. Ezek figyelembevételével a tervezés a TRT segítségével eredményesnek tekinthető, igazolta az irodalmi forrásokban is megjelölt várható értékeket.

Irodalom

- [1] Ádám B., Tóth L.: Adatok magyarországi sekélyszondás hőszivattyús rendszer telepítéséhez. Mezőgazdasági Technika, Gödöllő, 2010, 51. évf. 8. sz. 2-5. p. ISSN 0026 1890
- [2] Ádám B.: Európa hetedik legnagyobb földhőszondás hőszivattyús rendszere. 2010. <http://www.hgd.hu/index.php?m=5&t=Hoszivattyu-szakcikkekhttp>
- [3] Austin, W.: Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties. MSc-thesis, OSU, 164 p., 1998.
- [4] Eugster, W. J., Sanner, B., Mands, E.: Stand der Entwicklung und Anwendung des Thermal-Response-Test. – Proc. 7. Geothermische Fachtagung, pp. 304-314, 2002
- [5] Gehlin, S., Hellström, G.: Comparison of four models for thermal response test evaluation. ASHRAE transactions, 109, pp. 1-12, 2000.
- [6] Gehlin, S. and Nordell, B.: 1997 Thermal Response Test – a Mobile Equipment for Determining Thermal Resistance of Borehole. – Proc. Megastock '97, pp.103-108, 1997.
- [7] GEORT – Geothermal Response Test Kft. www.geort.hu
- [8] Hellström, G.: Thermal response test of a heat store in clay at Linköping, Sweden. Proc. Megastock '97, pp. 115-120, 1997.
- [9] <http://www.geowatt.hu/index.php/publikacio/sajto/59-geotermikus-energia-hasznoitas-ujgeneracios-hszivattyukkal.html>
- [10] <http://www.hgd.hu/index.php?m=5&t=Hoszivattyu-szakcikkekhttp>
- [11] Németh I., Bőjtő A.: A szondamező meghatározásának alapelvei. A talaj hővezető képességének meghatározása geotermikus szondatesztel, valamint a lehetséges szondakiosztások alternatívái, 30 p, 2009.
- [12] Sanner B., Hellström G., Spittler J.: Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005.
- [13] Sanner B., Reuss, M., Mands, E., Müller, J.: 2000 Thermal Response Test - Experiences in Germany. Proc. Terrastock 2000, pp. 177-182,
- [14] Seidinger, W., Mornhinweg, H., Mands, E., Sanner, B.: Deutsche Flugsicherung (DFS) baut Low Energy Office mit größter Erdwärmesondenanlage Deutschlands. Geothermische Energie 28-29/00, 23-27, 2000.
- [15] Spittler, J. D., Rees, S., Yavuzturk, C.: More Commentson In-situ Borehole Thermal Conductivity Testing. The Source 3-4/99, 1999.
- [16] Tóth L., Ádám B., Csernóczki Zs.: Adatok trigenerációs hőszivattyús rendszer üzembe állításáról. Mezőgazdasági Technika, Gödöllő, 52. évf. 2.sz. 2-4p. ISSN 0026 1890, 2011.