

GEOSZFÉRÁK

2016

A Szegedi Tudományegyetem Földtudományok Doktori Iskolájának eredményei

Szerkesztette
Unger János – Pál-Molnár Elemér



GeoLitera
SZTE TTIK Földrajzi és Földtudományi Intézet
Szeged, 2017

GeoLitera

HU ISSN 2060-7067

Geoszférák időszaki kiadvány

HU ISSN 2062-2465

Kiadó

SZTE TTIK Földrajzi és Földtudományi Intézet

Sorozatszerkesztő

Pál-Molnár Elemér

A sorozat szerkesztőbizottsága

Geiger János
Hetényi Magdolna
Keveiné Bárány Ilona
Kovács Zoltán
M. Tóth Tivadar
Mezősi Gábor
Mészáros Rezső
Rakonczai János
Sümegei Pál
Unger János

A Geoszférák időszaki kiadvány köteteinek grafikai terve Jacob Péter és Pál-Molnár Elemér munkája

Címlapfotó: A Hajnóczy-barlang légkörzésmodellje a téli hónapokban (Csépe-Muladi, Mucsi, 103. oldal)

- Nagyalföld Alapítvány, Békéscsaba, 2001, 44–63.
- Csizmadia, L. (1993): Falusi turizmus – környezetbarát turizmus oktatási összefüggései. Kézirat. Kereskedelmi és Idegenforgalmi Továbbképző, Budapest, 62 p.
- Csordás, L. (1992): Az Alföld Turizmusa. Alföld I. kutatási program VIII. kötet. MTA Regionális Kutatások Központja, Kecskemét, 239 p.
- Csordás, L. (1999): Változások az Alföld turizmusában. Alföld II. kutatási program. MTA Regionális Kutatások Központja, Kecskemét, 43 p.
- Dávid, L. (2007): A turizmus földrajzi alapjai. In: Dávid, L., Jancsik, A., Rátz, T. (Eds.): Turisztikai erőforrások. A természeti és kulturális erőforrások turisztikai hasznosítása. Budapesti Gazdasági Főiskola, Budapest, 7–61.
- Fehér, I., Kóródi, M. (2009): A vidéki turizmus fejlesztése. Szaktudás Kiadóház, Budapest, 196 p.
- Hanusz, Á. (2009): A területi turisztikai tervezés és a helyi TDM rendszerek kialakításának mozgástere a fehérgyarmati térségében. Turisztikai „desztinációs menedzsment”. Nyíregyháza, 45–60.
- Hanusz, Á., Pristyák, E. (2007): A turizmus szerepe egy vidéki térség szerkezet és funkcióváltásában. Földrajzi Közlemények, **131/55, 3**, 203–215.
- Jansen-Verbeke, M. (1990): The Potentials of Rural Tourism and Agritourism in EEC, University of Nijmegen, Netherlands.
- Kovács, D. (2003): Falusi és vidéki turizmus értelmezések a nemzetközi irodalomban. In: Kovács, D. (Ed.): A falusi turizmus hagyományai. Mezőgazda Kiadó, Budapest, 55–67.
- Kovács, D. (2015): Falusi turizmus Magyarországon – kérdések és dilemmák. Területi statisztika, **2015/6**, 592–613.
- Lane, B. (1994): What is rural tourism? Journal of Sustainable Tourism, **1994/1–2**. Special Issue: Rural Tourism and Sustainable Rural Development, 7–21.
- Miklay, F.-né (Ed.) (2007): Falusi turizmus tájékoztató, **2007/1–2**, 28 p.
- Terluin, I.J. (2003): Differences in economic development in rural regions of advanced countries: an overview and critical analysis of theories. Journal of Rural Studies, **19/3**, 327–344.
- Vidékkutatás, (2012–2013): Magyar Tudományos Akadémia Közgazdaság- és Regionális Tudományi Kutatóközpont Regionális Kutatások Intézete. MTA KRTK RKI ATO Kecskemét, 56 p.

A BARLANGHŐMÉRSÉKLET TÉR- ÉS IDŐBELI VÁLTOZÁSAINAK VIZSGÁLATA A HAJNÓCZY-BARLANGBAN

Csépe-Muladi Beáta, Mucsi László

Szegedi Tudományegyetem Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged
e-mail: muladi@geo.u-szeged.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Napjainkban a klímaváltozás egyre sürgetőbb probléma. Előtérbe kerülése felveti azt a kérdést is, hogy a felszín klímaváltozásának szélsőségei hogyan érvényesülnek barlangi körülmények között. A barlangi levegő folyamatosan cserélődik a felszíni levegővel a két légtér eltérő felmelegedésének következtében, de minden barlangnak más és más a légközése, így teljesen egyedi barlangklíma alakulhat ki. A barlangok klímájának mérése és vizsgálata jelenösen hozzájárul a barlangi környezet alaposabb megismeréséhez. Céljaink között szerepelt, hogy egy új típusú, vezeték nélküli szenzorhálózat eszközével valósítsuk meg a méréseket, ami könnyen telepíthető a barlangokban és olcsón hozzáférhető, így akár ezzel az új technológia vizsgálatával a barlangklíma vizsgálatának módszertani fejlődését is előrelendítsük.

A kutatás kapcsán vizsgáltuk a barlangon belüli hőmérséklet rétegződését; meghatároztuk a járatok hűlési, örvénylési és melegedési szakaszait; a hosszú távú mérések során választ kaptunk arra, hogy mikor történik, és milyen tényezőktől függ a tavaszi és őszi légáramlás fordulása; illetve megtudtuk, hogy a barlangban túrázó vagy kutató csoportok létszáma hogyan befolyásolja a barlang léghőmérsékletét.

1. Bevezetés, célkitűzések

A barlangklíma a szilárd földkéreg közeleiben természetes úton létrejött üregek légterének sajátos klímája” (Fodor, 1980). A barlang léghőmérséklete általában megközelíti a felszín éves átlaghőmérsékletét, s bár a barlangi légterek levegője évszakosan

változó intenzitással cserélődik a felszíni légtömeggel, ez a légcseré nem akadályozza meg a sajátos barlangklíma kialakulását. Hatással van a barlangklíma kialakulására az is, hogy a barlangbejáratok különböző tengerszint feletti magasságban helyezkednek el, méretük különböző, elhelyezkedhetnek völgytalpon, hegyoldalon vagy

hegytetőn, kitettségük, és bejárataik száma is eltér egymástól. A barlangjáratok morfológiája is hatással van a barlangklíma alakulására, mivel különböző nagyságúak és alakúak, így eltérő módon hatnak a barlangi légközre (Stieber, 2014). A felszint borító növénytakaró is befolyásolja a hőmérsékleti viszonyokat, az erdők sűrű lombkoronája felfogja a beeső napsugarakat, így a lég-hőmérséklet kiegyenlítettebb, mint a nyílt karsztos lejtőkön (Zelinka, Stieber, 2014). A léghőmérséklet térbeli eloszlása is változatos, mivel az egyes barlangi termek, folyosók különböző magasságban helyezkednek el, ami egy ún. belső cirkulációt alakít ki (Fodor, 1981). Mindezen különbségek mellett a barlangi klíma egyik legfőbb jellemzője, hogy jóval kiegyenlítettebb, mint a felszíni.

A hazai barlangklíma-kutatás nagy múltra tekint vissza. A Baradla-barlangban a Styx-patak hőmérsékletének első adatait az 1700-as években jegyezték fel (Townson, 1797). Raisz Keresztély Gömör vármegye megbízottja a Baradla-barlangról készített leírásában ugyancsak korán feljegyzi a patak hőmérsékletét (Kessler, 1941). A 19. sz. végén már egyre több kutató foglalkozott a barlangok kialakulásával, fejlődésével, általános morfológiai leírásával, osztályozásával. A barlangi hőmérsékletek időszakos megfigyelése is egyre gyakrabban fellelhető a korabeli szakirodalomban.

Fodor (1981) barlangklimatológiai munkájában a barlangokat – hazai és külföldi barlangklímamérések alapján – az ott tartózkodó ember közérzetének figyelembevételével osztályozza. Részletesen elemzi a Baradla-, Abaligeti-, Tapolcai-barlangokat, valamint a Telkibányai- és Dobsinai-jégbarlang klímaviszonyait. A barlangok komplex klimatológiai vizsgálata által kulcsfontosságú információkkal járult hozzá a barlangterápia továbbfejlesztéséhez is. A barlangterápia szempontjából

négy klimatikus barlangtípust különített el: hidegérzetet-, hűvös érzetet-, komfortérzet- és meleg érzetet keltő barlangok. Ez a csoportosítás egy a lehetséges osztályozások közül. Bárhogy osztályozzuk is azonban a barlangokat, a speleo-meteorológia bebizonyította: ahány barlang, annyi sajátos föld alatti mikroklíma-rendszer létezik.

A kutatás során az alábbi kérdésekre keressük a választ:

- A barlangon belül hogyan rétegződik a levegő hőmérséklete?

- Hogyan lehet egyszerű elemzéssel lehatárolni a hűlési, örvénylési és melegedési szakaszokat?

- A hosszú távú mérések során mikor történik, és milyen tényezőktől függ a tavaszi és őszi légáramlás fordulása?

- A barlangban túrázó vagy kutató csoportok létszáma hogyan befolyásolja a léghőmérsékletet?

Egyre több nemzetközi természetvédelmi program foglalkozik a barlangok megóvásával. A Rózsadombi termálkarszt hatékonyabb védelme érdekében a Pál-völgyi-barlangban 1995-ben komplex monitoring rendszert építettek ki (PHARE-program keretén belül), a tervezett mérések között barlangklíma paraméterek is szerepeltek. Az akkori technikai adottságokkal időigényes és fárasztó munkát jelentett a kábelek elhelyezése (Bekey, 1996), s a rendszer a magas páratartalom miatt működésképtelenné vált. A technika fejlődésével olyan automata vezetékek nélküli adatgyűjtőket hoztak létre, melyek könnyedén kihelyezhetők, és még pontosabb képet nyújtanak a barlangklíma változásokról. A módszertanilag is újdonságnak számító, vezetékek nélküli szenzorhálózatok eszközét, az UC Mote Mini alkalmazhatóságát vizsgáljuk barlangi körülmények között.

Kutatásaink során vizsgáltuk a tengerszint feletti magasság, és a hőmérséklet rétegzettségnek kapcsolatát (Muladi,

Mucsi, 2013). A Morva-karszton található Macocha-barlang bejáratánál a sziklafalon 2008-ban tanulmányozták a mikroklimatis viszonyokat. A barlang 138,4 m mély sziklafalán, a téli-nyári hőmérsékleti profil bemutatta a hőmérséklet rétegződését a különböző évszakokban, és az is bebizonyosodott, hogy a tengerszintfeletti magasság függvényében mennyire változékony a hőmérséklet (Litschmann et al., 2012). A fizikai törvényszerűségnek megfelelően, a barlangban is alulról felfelé növekszik a hőmérséklet, a növekedés mértéke azonban differenciált képet mutat (Fodor, 1981). Fodor (1981) a Baradla–Dolica-barlang levegő-rétegzettségének vizsgálata során a legnagyobb vertikális különbséget a bejárat térségben mérte, 140 cm-en 0,4 °C-ot. Badino (2010) az olaszországi barlangokban vizsgálta a hőmérséklet tengerszint feletti magasság szerinti eloszlását, ahol bebizonyosodott, hogy nem lineáris a kapcsolat a tengerszint feletti magasság és hőmérséklet között.

A bejáratától számított távolság alapján három különböző szakaszt különíthetünk el a barlangokban: 0–2 m-ig télen a lehülési, nyáron a felmelegedési szakaszt; 2–14 m-ig az örvénylési szakaszt; 6–14 m-ig pedig a felmelegedési szakaszt, ahol a barlangi légkörzés dominál (Kordos, 1970). A precíziós mérések alapján viszont lehetőség van ennek a gondolatmenetnek a megfordítására. Ez esetben a napi és az éves hőingás alapján határoljuk le a szakaszokat. A hőmérséklet változékonyságának függvényében, barlangonként a bejáratától számított távolság alapján, az adottságoknak megfelelően történik kijelölésük.

A kutatás célja a barlangi léghőmérséklet időbeli változásainak vizsgálata, hiszen ez lehetővé teszi a hőmérséklet hosszútávú (évszakos) változásainak leírását. A barlangjárat léghőmérséklete különböző mértékben követi a felszíni léghőmérséklet

periodikus változását. A barlang egyes szakaszainak mikroklímája napi, szezonális, és éves szinten eltérően reagál a felszíni hőmérséklet-változásra, így a különböző járatok léghőmérsékletének időbeli változásáról is képet kaphatunk (Kordos, 1970).

A barlangok kedvező mikroklímája lehetővé tette sokféle hasznosításukat (Keveiné, 2009). Barlanghasznosítás szempontjából is fontos a klímáparaméterek mérése, mivel a turisztika számára megnyitott barlangokban az odaérkező barlanglátogatók a barlangi klímára hatással vannak (Smith et al., 2013). A klímamérések segíthetik a Nemzeti Parkok barlangjainak turisztikai hasznosítását, mivel olyan optimális csoportlétszámot tervezhetnek, amely nem jelent a troglobiont fajok sérülésével járó hőtübbletet. Az aktívan kutatott barlangok esetében a barlangászok okoznak hőmérsékleti anomáliát a gyakran több órás intenzív fizikai munkával.

Végső célunk, hogy az aperiodikus változások mértékét meghatározzuk a barlangban a látogatócsoportok okozta antropogén hatás mértékére vonatkozóan, illetve a kutatók tevékenységéből származó hőtübblet meghatározása szempontjából. Egy adott terem szellőzésének mértéke meghatározható azon időtartam ismeretében, amely alatt a hőmérséklet és a páratartalom a látogatások után az eredeti állapotra visszaáll. Ezek az adatok értékesek lehetnek a barlangkutatásban, segíthetnek megérteni a legtöbbször bonyolult barlangi járatok légmozgásának jellemzőit is.

2. Alkalmazott vizsgálati módszerek

A vezeték nélküli szenzorhálózat technológiájának fejlődésével együtt az erre épülő alkalmazások is egyre inkább bővültek. A szenzorhálózat általános jellemzői közé

tartozik a rövid hatótávolság, az olcsóbb beszerezhetőség, valamint az alacsony energiafogyasztás. A hálózatot alkotó node-ok általában kisméretűek, a processzor és a memóriája limitált. A szenzorhálózati eszközök alkalmazása esetén elkerülhető a drága vezetékös eszközök telepítése, helyettük egy könnyen kihelyezhető, rádió-kommunikációra alkalmas eszközökkel történik a mérés. Az eszközök bővíthetők további érzékelőkkel, melyek segítségével több paraméter is mérhető (Lengyel, 2007).

Az UC Mote (mely az IEEE802.15.4/ZigBee szabványt használja) rádiómodulja 250 kbps adatátvitelre képes, melyet 2.4 GHz-es ISM sávban biztosít (1. táblázat). A vezérlésről egy 16 MHz-es Atmel ATmega128RFA1-as mikroprocesszor gondoskodik, mely 128 kB RAM-mal ren-

delkezik. Az eszközben gyárilag többféle érzékelő van beépítve: hőmérsékletmérő, páratartalom érzékelő, és légnyomásmérő. Az SHT21-es szenzor képes mérni a hőmérsékletet és a páratartalmat is, a Sensor MS5607-02BA03 rögzíti a légnyomás adatokat (Muladi et al., 2012).

A kutatás kezdeti időszakában a műszerek tesztelése zajlott laborkörülmények között, ahol bebizonyosodott, hogy megfelelő kalibráció esetén a műszerek közötti 0,3 °C-os különbség kiküszöbölhető. Egy stabilizált klímakamrában végeztünk előzetes méréseket, így pontosan meg tudtuk adni az egyes szenzorok kalibrációs konstansának értékét. A barlangi mérések megkezdése előtt 2011 decemberében a bükki Hajnóczy-barlangban teszteltük (10 percnkénti adatokkal rendelkezünk

a barlangról). A Hajnóczy-barlangban 10 db műszer kihelyezésére került sor (9 mintavételi helyszín a barlangban, és 1 db a barlang bejárata mellett a felszínen), ahonnan 10 percnkénti adatrögzítéssel 61.934 db adatot használtunk fel a különböző járatokról feldolgozott elemzésünkben. A felszíni adatokat a Szentléleki meteorológiai állomás adataival hasonlítottuk össze.

Az adatok könnyebb kezelhetősége érdekében a 10 perces adatokat 1 óránként átlagoltuk az éves áttekintés során minden barlang esetében. Ezután a barlangi vizsgálati helyszínekre kiszámítottuk a vizsgált időszak minimum, maximum és átlagos adatait, melyeket a diagrammon ábrázoltunk. Klaszteranalízis segítségével

1. táblázat – Az UC Mote Mini eszköz és paraméterei (Sensiron, 2011a,b).

Eszközök	UC Mote Mini
Általános tulajdonságok	Olcsó, alacsony fogyasztás, kis méret Nyílt forrású operációs rendszer (TinyOS) vezeték nélküli
Hőmérséklet	Felbontása $\pm 0,01$ °C Pontossága $\pm 0,3$ °C
Páratartalom	Felbontása $\pm 0,04\%$ Pontossága $\pm 2,0\%$
Légnyomás	Szenzor: MS5607-02BA03 –20 °C és 85 °C közötti tartományban, 300 és 1100 mbar között –2.5– +2.5 mbar hibahatár
Flash Memory	2 M bytes
Rádió kommunikáció	400 m
Processor	16 MHz
Elem	CR2450 elem
Méret (mm)	43 X 29 X 10
User Interface	Micro USB IEEE802.15.4/ZigBee

vel meghatároztuk az egyes barlangjáratok közötti homogén csoportokat, a különböző évszakokban mely barlangszakaszok léghőmérséklet-változása mozog hasonlóképpen a mért adatok alapján.

Az aperiodikus vizsgálatot 2012.06.30. – 07.09. közötti időszakban monitoroztuk a Hajnóczy-barlangban, ehhez a vizsgálathoz kibővítettük a mintavételi számok helyet (32 db helyszín), hogy még pontosabb képet kaphassunk a barlangban érvényesülő antropogén hatásról

A barlangtérbeli elemzésére a Polygon programot alkalmaztunk és így határoztuk meg, hogy mely szakaszra helyezzük el a hőmérsékletérzékelő műszereket. A Polygon programmal határoztuk meg a műszerek bejárattól számított térbeli távolságát is.

A poligon rajzhoz az ArcGIS program segítségével készítettük el a rajzolt alaprajzi térképek georeferálását. Miután a rajzolt képeket térben elhelyeztük, lehetőség nyílt a Therion programban egy áttekintő 3D-s modell elkészítésére. Ehhez a modellhez a barlang poligonjára és alaprajzi térképre volt szükség, majd a keresztszelvényekkel lehetett pontosítani a térrajzot.

3. A mintaterület bemutatása

3.1. A barlangot befogadó hegység bemutatása, a Bükk

A Bükk Magyarország legmagasabbban elhelyezkedő (600–900 m) és legnagyobb kiterjedésű (120 km²) karsztvidéke. Legnagyobb kiterjedésben jól karsztosodó triász-jura mészkőből áll (Hevesi, 1991). A terület másik jelentős felszínalkotó kőzete az idősebb agyagpala. A mészkő és az agyagpala a kréta tektonizmus hatására jelentősen meggyűrődött, illetve az idősebb agyagpala a fiatalabb mészkőre tolódott (1.

ábra) (Hevesi, 1978). Az ausztriai hegységképző mozgások hatására jelentős deformációs események történtek (gyűrődés, takaróképződés, töréses deformáció), majd a terület a paleogénre a szárazföldi lepusztulás térszíne lett, melyet jól alátámasztanak a barlangi üledékek geokémiai vizsgálatai (Mucsi, 1992). A terület negyedidőszaki fejlődéstörténete kevésbé ismert, ugyanakkor kijelenthető, hogy a felső eocén–alsó oligocén között a terület hosszabb ideig volt a szárazföldi lepusztulás, mint a tengeri üledék felhalmozódásnak színtere.

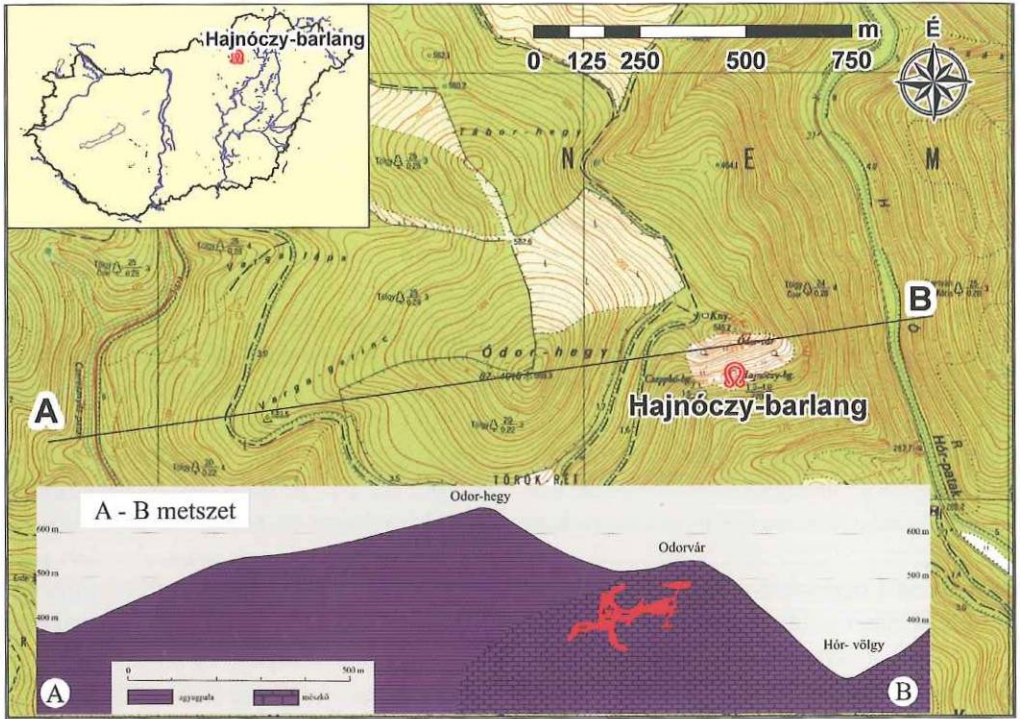
A Délnyugat-Bükkben található az Odor-hegy 661 m magasságú hegycsúcsa. Az Odor-hegy és Odorvár környezetét a miocén tengerelöntés hosszabb-rövidebb időre elérte, majd a terület a pliocénre ismét kiemelkedett és a szárazföldi lepusztulás lett domináns (Hevesi, 2003).

3.2. A Hajnóczy-barlang és mintavételi helyszínek bemutatása

A Hajnóczy-barlang a Délnyugat-Bükkben helyezkedik el. A barlang bejárata 457 m tengerszint feletti magasságban, az Odorvár oldalban található. Az Odorvár legmagasabb pontja 574 m, a nyugati oldalán a Hór-völgy található. A barlang teljes hossza a 4257 m, a vertikális különbség a legmagasabb és legmélyebb pontja között 125 m.

A barlang járatainak iránya É-Ék–D-DNy, erre merőleges litokázisrendszerrel. A barlangnak két jól elkülöníthető része van:

– réteglapmenti oldással, majd korróziós folyamatokkal kialakult, szűkületekben gazdag járatrendszer, amely a bejárattól a Nagy-teremig tart, itt a vizsgált szakasz tengerszint feletti magassága 425–457 m között változik, ahol a legmélyebben fekvő rész a Lapos-terem. A bejárattól számított távolság alapján ez a szakasz 235 m-ig terjed (2. ábra).



1. ábra – Ódorvár és az Ódor-hegy geológiai felépítése, és a Hajnóczy-barlang keresztmetszete (NyDny–KÉK irányú metszet) Mucsi (1992) alapján

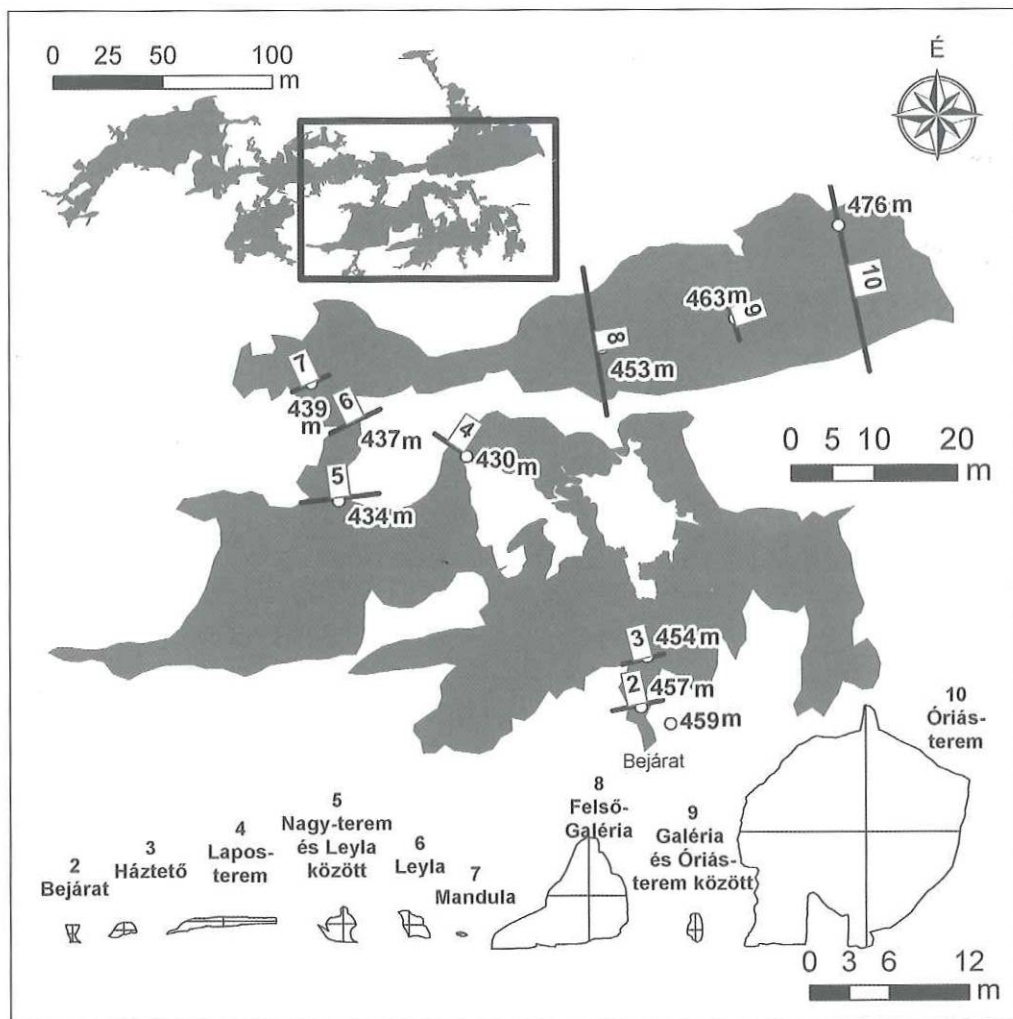
– főként eróziós folyamatokkal létrejött szakasz, itt nagy formák (pl.: Óriás-terem, amely 40×20 m kiterjedésű) és a nagy termek közötti törmelékhalomok, szűkületek (pl.: Mandula: 0,7 m × 0,4 m) jellemzőek. A vizsgált szakasz tengerszint feletti magassága 458–500 m között változik, a legtávolabbi pont térbeli távolsága alapján 470 m-re van a bejáratától.

A barlangüregek egy része (bejárat szakasz, Óriás-terem) a keveredési korrózió eredményeként jött létre, míg a fedő agyagpala alatti mészkőrétegekben található barlangrészek (Grand-Canyon, Tsitsogó) kialakulásában a sztratigráfia (elváló réteglapok) is jelentős szerepet játszottak. A pleisztocénben bekövetkezett relatív karsztvíz níví süllyedésének köszönhetően a korábban kialakult több szintű üreghálózat szárazzá vált. Hir

vizsgálatai szerint a Hajnóczy barlang egyike a Bükk legidősebb barlangjainak (Hir, 1985). Régészeti leleteket hordoz a barlang, hiszen a Galéria járataiban olyan medve csontjait (*Ursus deningeri*) találták meg, mely 700 ezer évvel korábban élt (Kordos, 2002).

A Hajnóczy-barlangban 9 helyszínen (+1 felszíni szenzor) helyeztünk ki hőmérsékletregisztráló műszert (2. ábra), törekedve arra, hogy minél változatosabb keresztmetszeli méreteknél legyen a hőmérséklet-változás regisztrálva.

A Hajnóczy-barlang nagyobb részben egy felszín közeli barlang (2. ábra). A bejáratától egészen a Lapos-teremig folyamatosan mélyül a barlang. A Lapos-terem 55–66 m vertikális távolságra helyezkedik el a felszíni domborzat alatt, a vizsgálati szakasz legmélyebb része. A Leyla, Mandula



2. ábra – A Hajnóczy-barlang léghőmérsékletének vizsgált szakasza, a vizsgálati pontok, azok tengerszint feletti magassága, valamint keresztmetszete és azok elnevezései

és Alsó-Galéria található a legnagyobb vertikális távolságra (65–80 m) a felszíntől. A Felső-Galériától fokozatosan emelkednek a járatok, a kőzet és talajvastagság is egyre vékonyabb 25–50 m. Az Óriás-terem helyezkedik el legközelebb a felszínhez (10–24 m), a terem tetején már a fagyökerek is belógnak (Mucsi et al., 2004).

Az Óriás-terem az Odor-hegy csúcsa környékén található, ahol a karsztbokorerdő alatti rendzina talaj a déli kitettség

miatt jobban át tud melegedni. A karszt ezen része autogén jellegű (a szivárgó vizek csak csapadékvízből származnak) (Jakucs, 1971), és a barlang vízgyűjtője elég kicsi. Mivel a terem vékony fedőkőzet alatt a hegycsúcs közelében található, így a csapadékvíz gyorsan beszívárog a barlangba. A barlang nagyobb teremei a karsztvízszint alatt, keveredési korrozó hatására jöttek létre. A Hór-patak bevágódása a karsztvízszint süllyedését

eredményezte, emiatt a termék száraz-zá váltak, és a csepegővizek hatására elindult a cseppkőképződés. A csapadék változó mennyiségére utal, hogy a korábbi nedvesebb időszakokban hatalmas cseppkőlefolys képződött az Óriás-terem K-i falán, a mészkőfelszínen (Varga, 2003). Jelenleg csak a csapadékos napok után van csepegés és cseppkőképződés, egyébként az Óriás-terem a barlang legszárazabb része. Extrém száraz időszakokban a relatív páratartalom jelentősen csökken és a cseppkövek felszíne szárazzá válik és elindul a cseppkövek degradációja.

A barlang klimatikus szempontból statodinamikusan jellegű (Fodor, 1981), mert nyáron az egyetlen kijárat teljes keresztmetszetén át áramlik a szabadba a barlangi levegő, télen pedig a felszíni lehűlés módosítja a bejárat szakaszt.

4. Eredmények

A kutatás kezdeti időszakában a műszerek tesztelése zajlott laborkörülmények között, ahol bebizonyosodott, hogy megfelelő kalibráció esetén a műszerek közötti 0,3 °C-os különbség kiküszöbölhető. Minden mérésorozat előtt és után egy légmentesen lezárt dobozban szállítottuk a barlangig a szenzorokat, így tudtuk, hogy adott mérésnél szenzoroként milyen eltéréssel kell számolni. A tesztmérések után egyre több kérdés merült fel, hogy a vizsgált barlang esetében milyen hatások érvényesülnek.

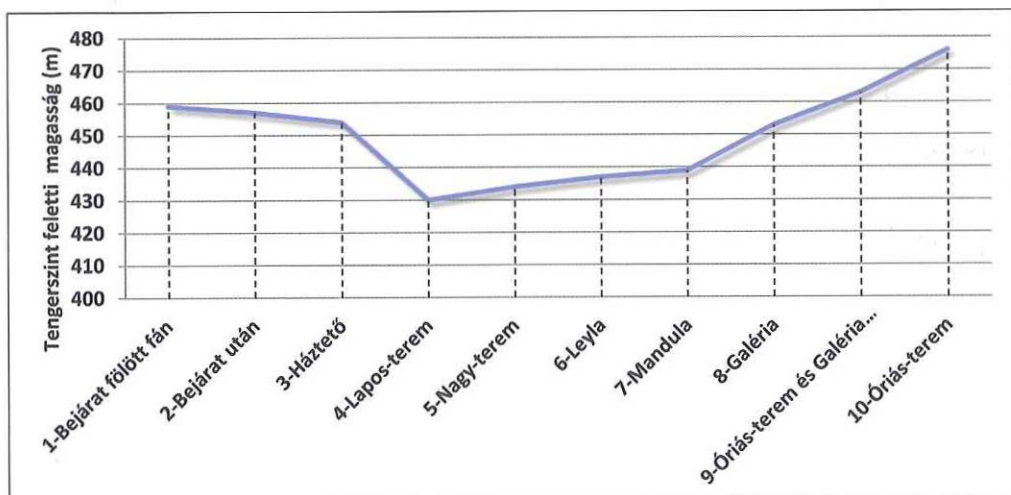
4.1. A barlangok vizsgált pontjainak bemutatása a tengerszint feletti magasság és léghőmérséklet tükrében

A barlangok morfológiai tulajdonságai nagyon eltérőek, így a járatok vertikális tagoltsá-

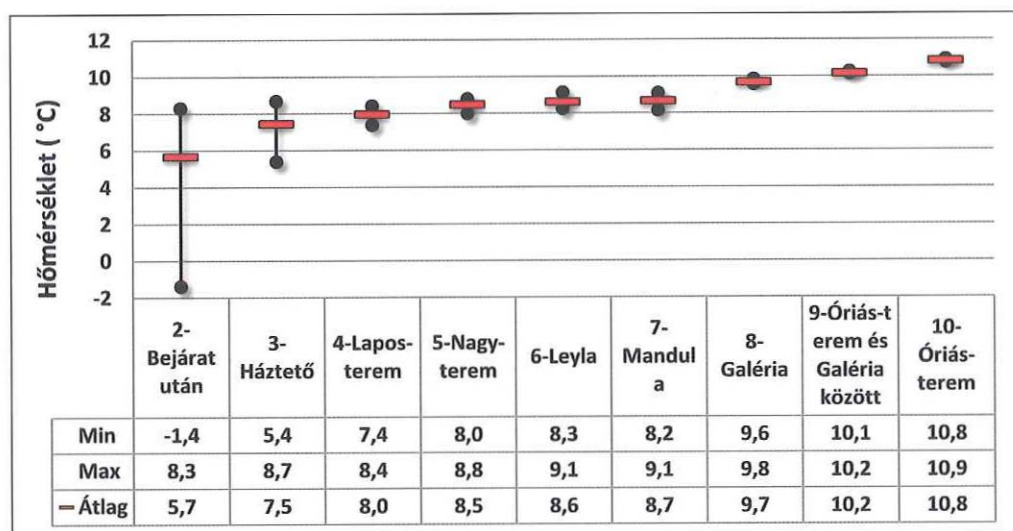
ga is különböző. A járatok különböző tengerszint feletti magasságából adódóan más-más hőmérsékleti szinten rétegződik a levegő.

A Hajnóczy-barlang esetében a 2012.03.11. – 2013.04.10. közötti időszakot választottuk ki az egy éves vizsgálatra. Ebben az időszakban szenzoroként átlagosan $n = 8747$ db órára átlagolt adatot vizsgáltunk. A barlang vizsgált pontjainak (2. ábra) tengerszint feletti magasságát lineárisan ábrázolva (3. ábra) láthatóvá válik, hogy a bejárat 457 m-en nyílik, ezután a Lapos-teremig folyamatosan mélyül a barlang 27 m-rel, majd innen az Óriás-teremig 476 m-ig emelkednek a járatok. Az átlaghőmérséklet adatokon láthatóvá válik, hogy a 19 m-es szintkülönbség esetén 5,1 °C-os a hőmérséklet-különbség (4. ábra).

A vizsgált időszakban a felszínen elhelyezett műszer $-6,1$ – $29,0$ °C közötti hőmérséklet-változást rögzített, a barlang bejáratától néhány méterre. Ezt az adatot összevetettük a szentléleki meteorológiai állomás adataival, mely alapján $-6,2$ °C és $29,4$ °C között változott a hőmérséklet. A Bejárat utáni szenzor (a vaslemezből készült ajtó után 2 méterre helyezkedett el, az ajtó zárt, csak denevéryílás található rajta) a téli, sűrűbb hideg levegő hatására átlagosan 5,7 °C-ot mért, míg az Óriás-teremben elhelyezett műszer 10,8 °C-ot rögzített. A Háztetőnél 7,5 °C átlagos hőmérséklet jellemző, és habár a Lapos-terem 24 m-rel mélyebben helyezkedik el, mégis átlagosan 0,5 °C-kal melegebb levegő található itt, köszönhetően annak, hogy a felszíni hatások itt már kevésbé érvényesülnek. A Nagy-terem–Leyla–Mandula vonala 434–437–439 tszf. magasságon helyezkedik el, és ekkora szintkülönbség hatására is 0,1 °C különbség látható az átlagos hőmérsékletükben. A Felső-Galéria és Mandula közötti 14 m szintkülönbség átlagosan 1 °C-os hőmérséklet-különbséget eredményez. A Felső-Galéria – Óriás-



3. ábra – A Hajnóczy-barlang vizsgált pontjainak tengerszint feletti magassága



4. ábra – A Hajnóczy-barlang vizsgált pontjainak alapstatisztikai értékei 2012.03.11. – 2013.04.10. között

terem és Galéria között – Óriás-terem vonala 453–463–476 tszf. magasságai hatására 9,7–10,2–10,8 °C az átlagos hőmérséklet. Ezek alapján elmondható, hogy barlangi légkörzés esetén a levegő rétegzettségét tekintve a Hajnóczy-barlang vizsgált szakaszán a hőmérséklet 2-3 m-enként 0,1 °C-kal változik.

4.2.A Hajnóczy-barlang hőmérsékletének éves menete

A felszínen 2 méterrel a barlang bejárata fölött elhelyezett szenzor mérte a külső levegő hőmérsékletét. A kapott adatsort a legközelebbi, szentléleki meteorológiai állomás adataival egészítettük ki (5. ábra). A két adatsor hőmérsékleti diagramja jól il-

leszkedik egymáshoz (a korrelációs együtthatójuk 0,95), egyedül a napi minimum és maximum értékek térnek el egymástól 1-2 °C-kal, aminek oka a műszerek helyének tengerszint feletti magasságkülönbsége.

A felszíni adatok alapján aszerint különböztettük meg a 4 évszakot, hogy a barlang Bejáratainak hőmérsékletéhez (8 °C az ábrán a 2-es pont a másodlagos tengelyen szerepel) képest a felszínen mért érték hogyan változik (5. ábra):

– Tavasz: $T_{\text{átl}} > 8 \text{ °C}$ és $T_{\text{min}} \leq 8 \text{ °C}$, emelkedő hőmérsékleti trend

A tavaszi időszak 2012. március 11. és 2012. május 22. között figyelhető meg, amikor a felszíni hőmérséklet 5–15 °C között változik. A barlangon belül fokozatosan melegszik a hőmérséklet, de a lehülések következtében, a hidegebb levegő hatására jön létre nagyobb változás

– Nyár: $T_{\text{átl}} > 8 \text{ °C}$ és $T_{\text{min}} > 8 \text{ °C}$

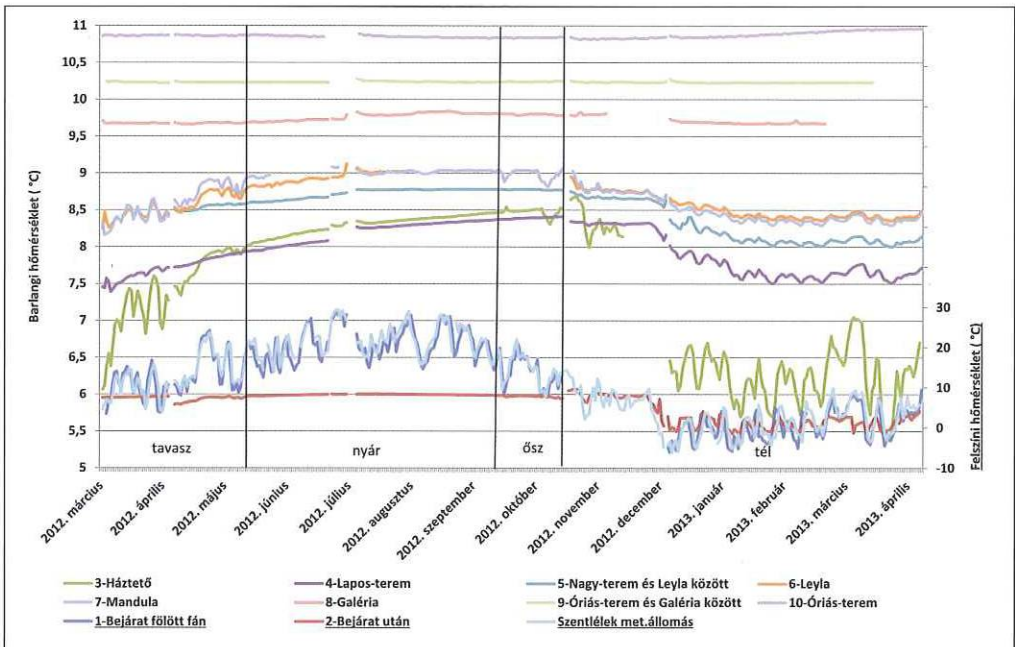
A nyári szakaszban egy fokozatosan me-

legedő tendencia figyelhető meg 2012. szeptember 19-ig, ahol 12–30 °C között változik a felszíni hőmérséklet.

A barlang bejáratánál megfigyelhető, hogy a nyári légkörzés idején a felszíni melegebb levegő nem módosítja ezt a szakaszt (5. ábra 2). A bejáratnál nyáron a szabadba tartó erőteljes légáramot figyelt meg Miklós is 1977 nyári mérései során, a napi átlagos légáramlás-sebessége 27 cm/s (Miklós, 1978). Az 5. ábrán is jól látható, hogy a bejáratnál a nyári időszakban egy simított görbe figyelhető meg, ahol a levegő 8 °C hőmérsékletű, minimumális 0,5 °C alatti változással.

– Ősz: $T_{\text{átl}} > 8 \text{ °C}$ és $T_{\text{min}} \leq 8 \text{ °C}$, csökkenő hőmérsékleti trend

Az őszi szakaszban fokozatos lehülés figyelhető meg 2012. október 19-ig, ahol a minimum értékek 5 °C körül találhatók. Amint a felszíni hőmérséklet 10 °C alá esik a légáramlás iránya megfordul, és a felszíni hőmérséklet befolyásolja a Bejárati



5. ábra – A Hajnóczy-barlang hőmérsékletének éves menete (2012. március – 2013. április) Másodlagos tengelyen: 1: Bejárat fölött fán, 2: Bejárat után, és a Szentléleki meteorológiai állomás adatai

szakaszt. A őszi időszakban válik ez a jelenség láthatóvá, így a Bejáratnál 6–8 °C között változik a hőmérséklet.

– Tél: $T_{\text{átl}} < 8 \text{ °C}$

A téli szakasznál (2012.10.22.–2013.04.12.) már fagyponthoz alatti hőmérsékletet is regisztráltunk, ahol a hőmérsékleti tartomány –6–5 °C között található. A negyedik szakasz utolsó napjaiban a napi maximumok már 5 °C fölé emelkednek (5. ábra). A téli időszakban a hideg sűrű levegő lefolyik a bejárat szakaszon, így erőteljes hóingásokat gerjeszt –1,3–6 °C között.

Klaszteranalízis vizsgálata során a különböző évszakokban a 3-Háztető adatsora a 4-Lapos-terem, 5-Nagy-t. és Leyla, 6-Leyla, 7-Mandula adataival tartozik egy klaszterbe. Ezt a kapcsolatot már a megelőző vizsgálatok is bizonyítják a szoros korreláció miatt (Muladi et al., 2013a) Itt a hőmérséklet 5,4–8,6 °C között mozog (5. ábra 3), a vizsgált időszakban télen a legnagyobb hóingás 3,5 °C, tavasszal 1,9 °C-os

változást regisztráltunk (2. táblázat).

A Lapos-teremben elhelyezett szenzor vertikálisan a legmélyebben fekvő pont, a bejáratától 47 m vertikális távolságra helyezkedik el. Itt már a felszíni hőmérsékleti trendek jelennek meg, bár a napi hóingás a nyári időszakban nem látható, a téli időszakban már megjelenik ezen a ponton is (7,4–8,4 °C) (5. ábra 4).

A következő vizsgálati pont a Nagy-terem és Leyla között helyezkedik el. A Nagy-terem 48 m hosszú és 14 méter széles, magassága 5–8 m. Innen továbbhaladva Leyla és a Mandula egyre szűkülő keresztmetszetű járatai következnek, mely járat a Galériával biztosítja az összeköttetést (2. ábra). A három vizsgálati pont közel azonos hőmérsékleti tartományba esik, de a vertikális rétegzettség ezen a 2-3 m szintkülönbségen is látható (5. ábra 5,6,7). A keresztmetszetében egyre szűkülő járatban a hőmérsékleti trendek szinte ugyanazok, elkülöníthető a téli-nyári légkörzés (5.

2. táblázat – A Hajnóczy-barlang évszakonkénti hóingása, és az évszakokban jellemző napi hóingás értékei

Mérési pont	Tavasz		Nyár		Ősz		Tél	
	ΔT	ΔT_{nap}	ΔT	ΔT_{nap}	ΔT	ΔT_{nap}	ΔT	ΔT_{nap}
1–Bejárat fölött	19,1	14,9	24,7	12	13,2	7,7	19,2	10
2–Bejárat után	1,8	1,45	0,5	0	0,3	0,3	11	2,68
3–Háztető	1,9	0,37	0,5	0	0,2	0,2	3,2	1,5
4–Lapos-terem	0,5	0,1	0,4	0	0,1	0	0,8	0,17
5–Nagy-t. és Leyla	0,4	0,2	0,1	0	0	0	0,7	0,1
6–Leyla	0,5	0,3	0,4	0	–	–	0,6	0,1
7–Mandula	0,8	0,3	0,1	0	0,2	0,2	0,8	0,1
8–Galéria	0	0	0,2	0	0	0	0,1	0
9–Galéria és Óriás-t.	0	0	0	0	0	0	0	0
10–Óriás-terem	0	0	0	0	0	0	0,1	0

ábra 5,6,7). A nyári időszakban a barlangból kifelé áramló levegő a domináns, ekkor a hőingás ezen a szakaszon 0,1–0,4 °C, míg télen 0,6–0,8 °C (2. táblázat).

Cseppkövekben rendkívül gazdag a Galéria, amely 70 m hosszú, 1–8 m széles, s magassága 4–13 m. A Galéria cseppkőgazdagságát az okozza, hogy mennyezetét függőlegesen álló mészkőlapok alkotják, melyek mentén állandóan csepegett a mésztartalmú víz. A Galéria keleti végéből beomlott, több tonnás sziklatömbök között lehet feljutni a 63 m hosszú, 14 m magas és 16 m széles Óriás-terembe (4. ábra). Az utolsó három vizsgálati pont esetében a nagyméretű termek és omlások miatt nem észlelhetők erőteljes évszakos változások (2. táblázat). A térbeli rétegzettségük is jól látható az adatokon (5. ábra 8,9,10).

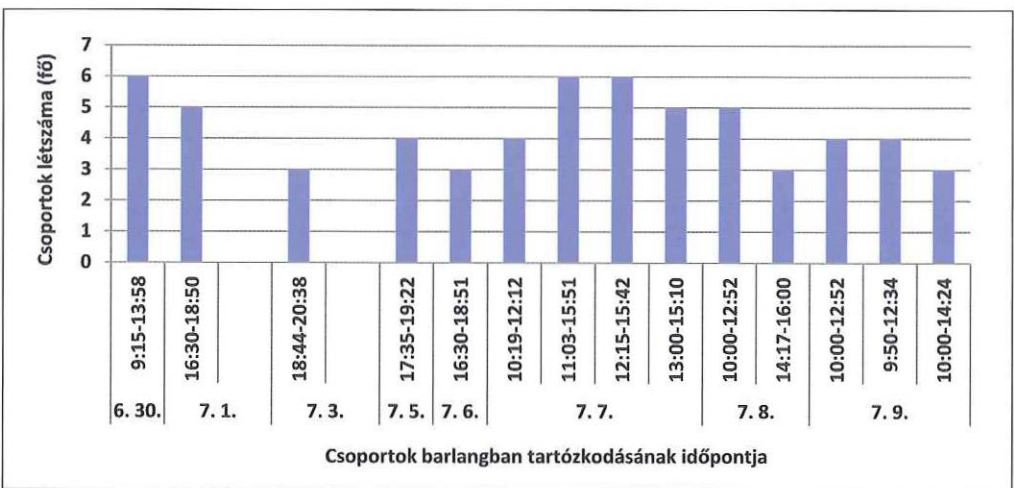
4.3. A Hajnóczy-barlang regisztrált antropogén hatásának mértéke

A 2012-es Hajnóczy József Barlangkutató Sportegyesület által szervezett nyári tábor idején történt a mérési időszak 2012.06.30. – 07.09.-ig. Ez idő alatt összesen 61 fő tartóz-

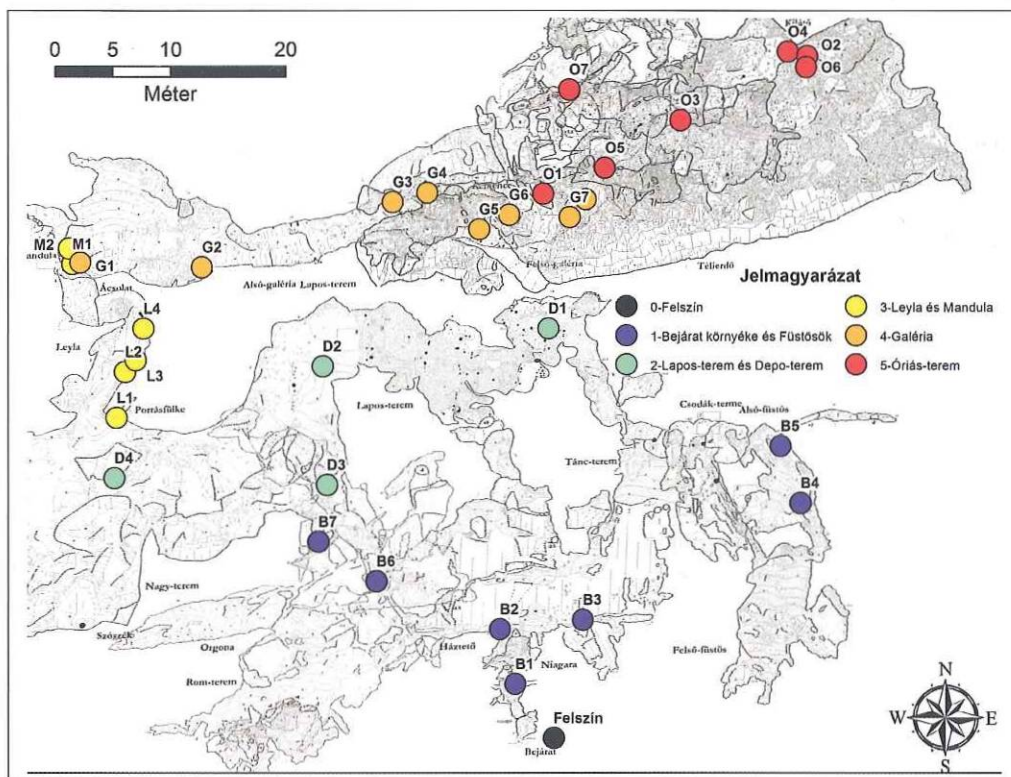
kodott a barlangban különböző terepbejárások alkalmával (6. ábra).

A barlangban elhelyezett szenzorokat a bejáratától való távolság és a különböző magasságban elhelyezkedő barlangi termek alapján több csoportba sorolhatjuk. Ebben az időszakban 32 db szenzorral mértük a hőmérsékletet. A vizsgált barlangszakaszon 5 különböző csoportot különítettünk el, valamint a bejáratnál a felszínen elhelyezett szenzort (7. ábra).

A 2012-es nyári méréseink alapján 8,2–11,2 °C között oszlik el a hőmérséklet. A 8,2 °C-os hőmérsékletet a bejárat zónában a Niagara tetején rögzítettük, míg a 11,2 °C-ot az Óriás-teremben. Az 1975–77 között megállapított értékhez képest (8,5–10,55 °C) negatív és pozitív anomáliát is tapasztalunk. A pozitív anomália annak köszönhető, hogy az 1975–77 közötti nyarakon a havi átlaghőmérséklet 20,6–22 °C között változott, ezzel szemben a 2012-es év júliusában rögzített átlaghőmérséklet 24,1 °C. Ez a tartós hőmérséklet-emelkedés a barlangban is megmutatkozik, 0,65 °C-kal kitolódik a barlangban mérhető maximális hőmérséklet.



6. ábra – A Hajnóczy-barlangba leszálló csoportok létszáma 2012.06.30. – 2012.07.09. között (Hajnóczy József Barlangkutató Csoport kutatásvezetője által feljegyzett adatok alapján)



7. ábra – A Hajnóczy-barlang nyári mérése során elhelyezett szenzorok 2012-ben

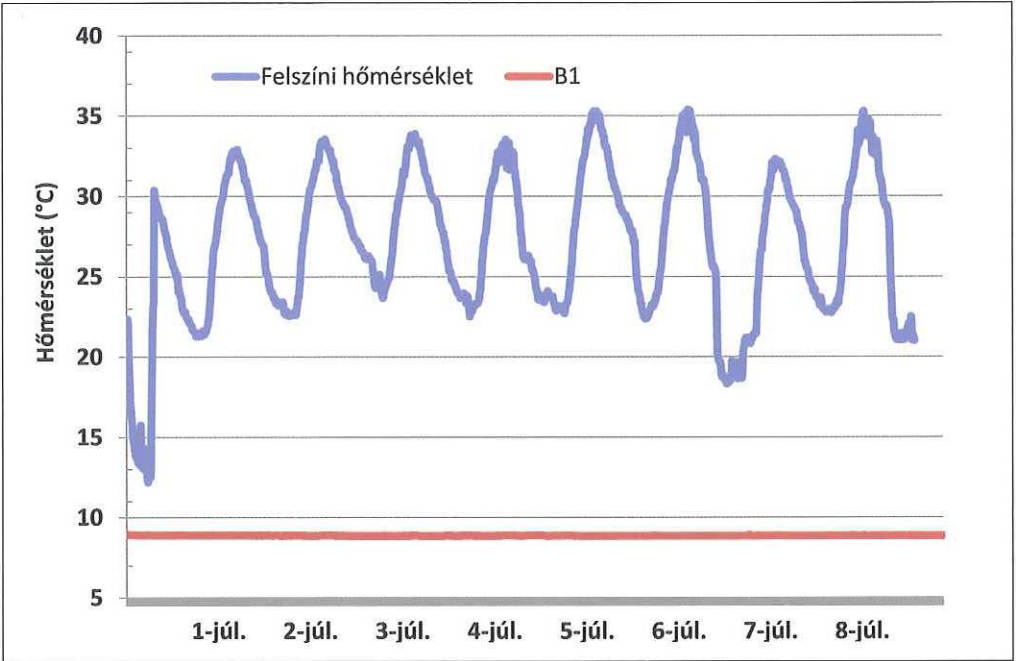
A felszínen elhelyezett szenzor adatairól (8. ábra) is jól látszódik, hogy a mérési időszakban a napi maximum adatok 33–35 °C között, míg a napi minimum adatok 13–23 °C között változnak.

A barlang bejárata az Odorvár oldalán nyílik, nyári légkörzés idején a bejárat teljes keresztmetszetén a szabadba áramlik a levegő. A bejárat környékén elhelyezett szenzorok esetében (B1–B7) a felszíni napi hőingás alig mutatható ki nyári légkörzés esetén, a barlangból kiáramló levegő a meghatározó. A bejárat akna jellege miatt barlangi légtömeg vertikális rétegzettsége is megjelenik az adatsoron, ahogy egyre mélyebbre haladunk a barlangban. Közvetlen a bejárat utáni elhelyezett B1 szenzor esetében (8. ábra) a hőmérséklet 8°C. A követ-

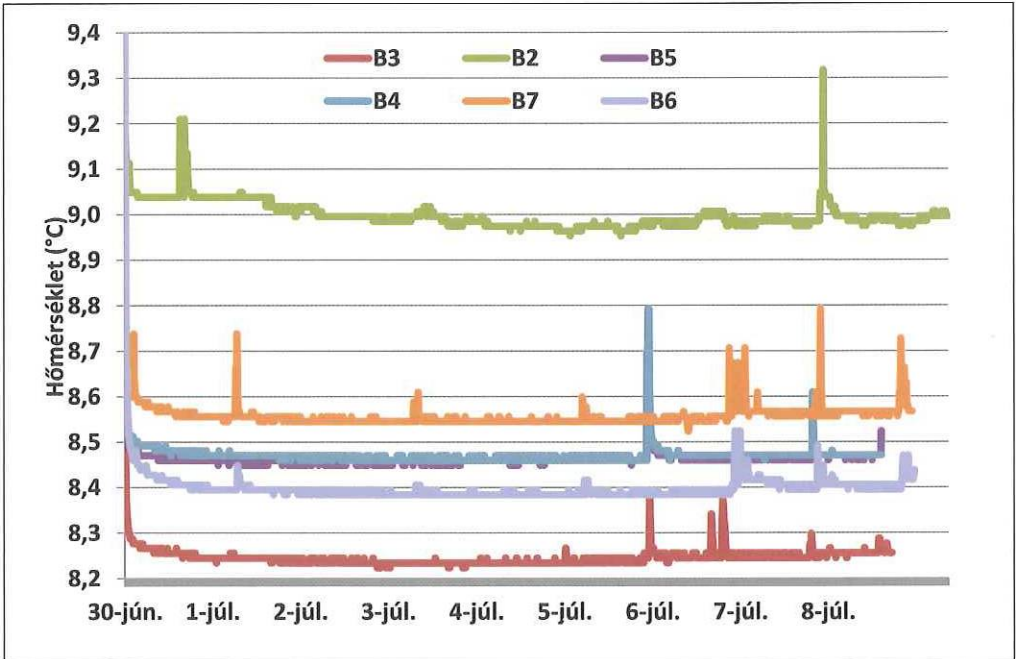
kező B2 és B3 szenzorok 5–5 m-rel bentebb helyezkednek el, itt is erőteljes kifelé áramló levegő érvényesül. (7. ábra).

A légáramlás mértéke ezen a szakaszon olyan intenzív, hogy a barlangba látogató csoportok (6. ábra) hatását elnyomja a barlangi léghőmérséklet.

A Füstösök a bejárat körüli labirintus félreeső járatrendszerei, amelyek nevüket a falakon képződött fekete füstszerű anyagról kapták. A Füstösök járatait két részre oszthatjuk (9. ábra), az Alsó-Füstösökre (B5) és Felső-Füstösökre (B4). Az Alsó-Füstösben, és a Felső-Füstösben is 8,5 °C körüli hőmérsékletet mértünk. A július 6.-án 3 barlangkutató okozta 0,3 °C lég-hőmérséklet-emelkedés két óra lecsengési idővel jellemezhető, mivel ezen a szaka-



8. ábra – A Felszín és a Bejárat (B1) hőmérséklete



9. ábra – A Bejárat környéke (B2–B3), Füstösök (B4–B5), Rom-terem (B6–B7) 2012.06.30. – 07.08.

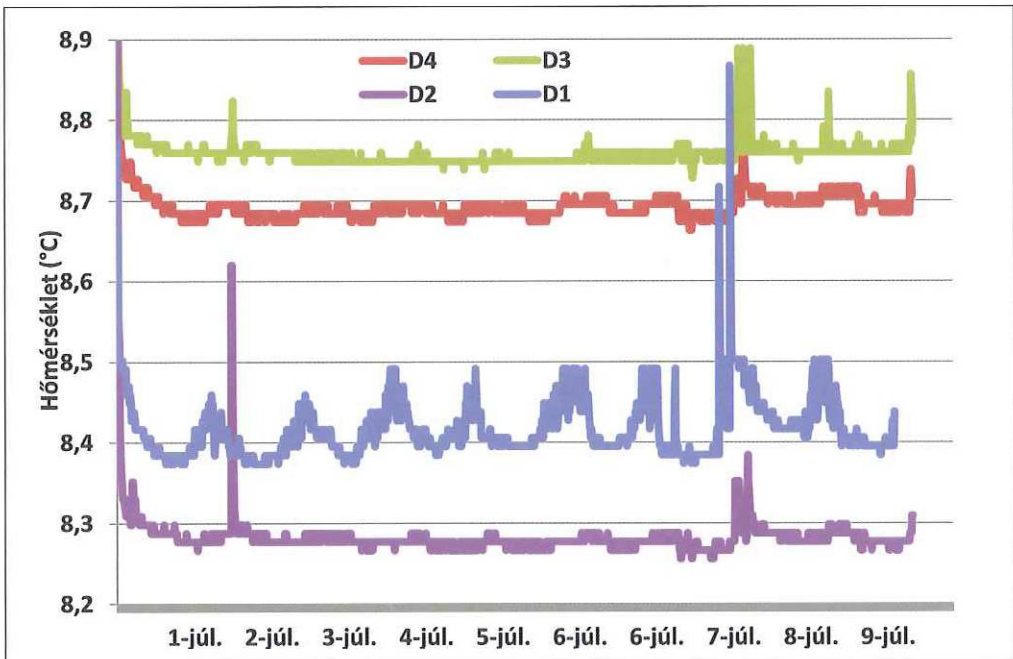
szon a nyári légkörzés esetén nem érzékelhető légmozgás. A július 8-i 3 fős csoport 0,1 °C-os emelkedést okozott, mely 1 óra alatt hűlt vissza az eredeti hőmérsékletre. Az antropogén hatás mértékét a teremben tartózkodás ideje is befolyásolja, ennek köszönhető a két csoport közötti eltérés.

A Rom-terem a bejárati zóna és a Depó-terem között helyezkedik el (7. ábra), mintegy átmeneti zónát képez a két szakasz között. A teremben két szenzort helyeztünk el (B6–B7), melyek értéke 8,4–8,55 °C között változott. A csoportok nagy része áthaladt ezen a termen, így 3 és 6 fős csoportok okozta anomália is látható az adatsoron.

A Lapos-teremben (10. ábra D1) a felszíni napi hőingás láthatóvá válik, mely 8,38–8,5 °C között változik. Az adatsoron alig látható, hogy az Füstösökben tartózkodó csoport ezen az útirányon haladt keresztül július 6-án, csak 0,1 °C-os az emelkedés. A Hajnóczy József Barlangkutató

Csoport kutatásvezetője által feljegyzett adatok alapján (6. ábra) július 7-én összesen 4 csoport indult a barlangba különböző időpontokban, ezek közül 2 csoport járt a Lapos-teremben 4-6 fővel. Az első csoport esetén 0,3 °C-os emelkedés figyelhető meg, míg a második csoport esetén 0,45 °C. A csoport okozta hőtöbblet 40 és 30 percen belül állt vissza az eredeti állapotába, a napi ingás okozta napi maximum csak a csoport után mutatkozott.

A nyári mérés során elhelyeztünk a Depó-terem tetején (D3), illetve a Depó-terem alján (D2) egy-egy műszert (7. ábra), melyek segítségével meghatároztuk a terem vertikális hőmérséklet rétegződésének különbségét, amit 0,5 °C-ban állapítottunk meg. A terem alján (D2) 8,3 °C, míg a terem tetején 8,8 °C-ot mutattunk ki (D3). A Nagy-terem 48 m hosszú és 14 méter széles, magassága 5–8 m. A Nagy-teremben elhelyezett szenzor (D4)



10. ábra – A Lapos-terem (D1) Depó (D2,D3) és a Nagy-terem (D4) hőmérsékleti adatai 2012.06.30. – 07.08.

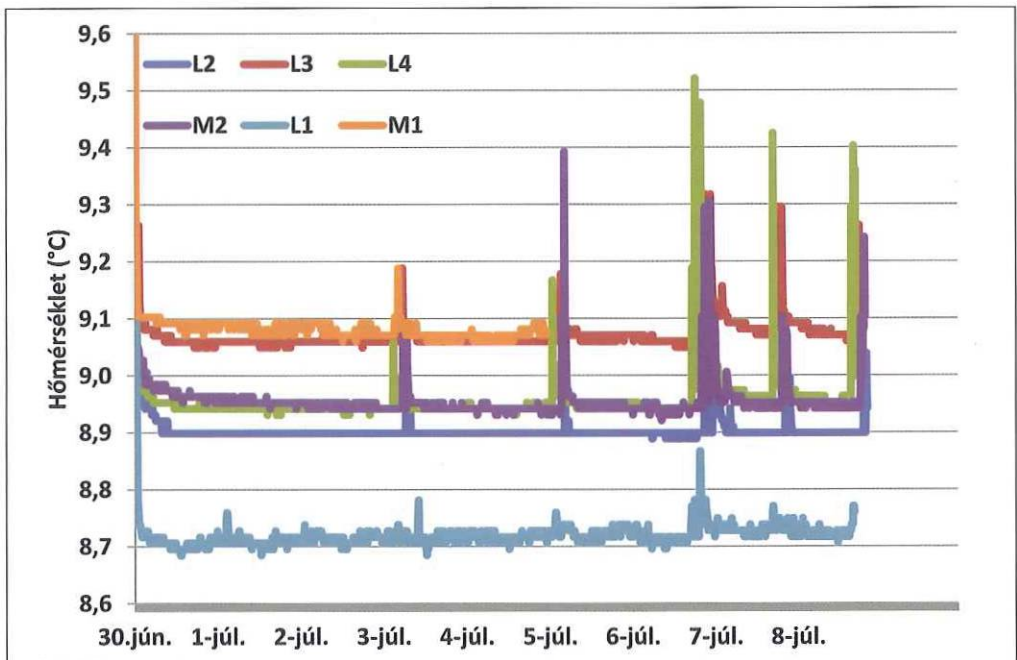
hasonló relatív magasságban lett elhelyezve, mint a Depó-terem teteje, viszont ebben a pontban az intenzíven kiáramló levegő figyelhető meg, mely 8,9 °C-os. A Depó-teremben július 1.-én délután 5 fő tartózkodott a terem alján elhelyezett műszer környékén, ez 0,3°C-os emelkedést mutat, mely kb.20 perces ott-tartózkodással alakult ki, és ez 1 óra 20 perc alatt állt vissza az eredeti állapotába. A terem tetején lévő 0,1 °C-os emelkedést mutat, mely 10 perc ott-tartózkodással alakult ki, és 20 perc lecsengési idővel tért vissza nyugalmi szintre.

A Nagy-teremből továbbhaladva a Leyla, majd a Mandula egyre szűkülő keresztmetszetű folyosója biztosítja az összeköttetést a Galériával (7. ábra). Az eddigi méréseink (Muladi et al., 2013b), és Miklós (1978) vizsgálatai alapján a Leyla és a Mandula szűk keresztmetszete felerősíti a légáramlást.

Ezen a szakaszon az évi hőmérséklet menetet, illetve a napi ingást is láthatjuk, és téli légkörzés idején sokkal intenzívebb.

A Leylában és Mandulában elhelyezett műszerek hőmérséklet adatai 8,7–9,1 °C között oszlanak meg (11. ábra). A Portásfülkében (L1) elhelyezett szenzort légáramlás szempontjából védettebb helyre tudtuk elhelyezni, de a látogatók hatása még így is látszódik, ha csak minimálisan is.

A többi helyszín esetében 0,1–0,2 °C-os változások láthatók, a legintenzívebb hőmérséklet-emelkedés a Leyla utolsó pontjánál (L4), illetve a Mandula szűkületben (M2) mértünk. A két utóbbi pontot (L4, M2) részletesebben elemezve az alábbi hatások láthatók: július 3-án 3 fő indult a Jubileumba, ez 0,1 °C-os emelkedést eredményezett mindkét helyen. Július 5-én Komszomol irányába indult túra,



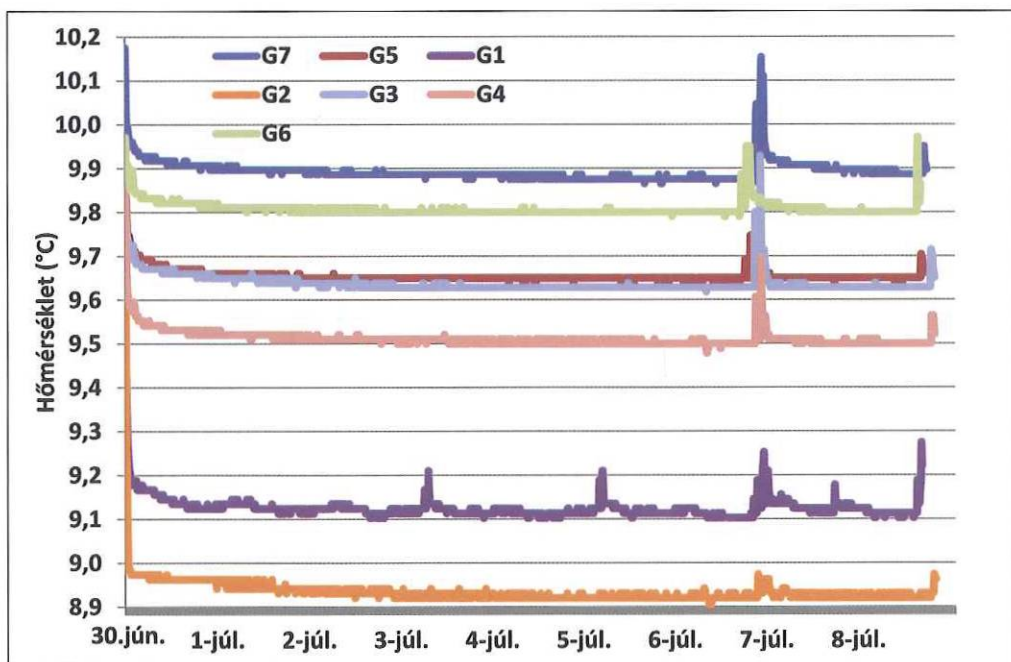
11. ábra – A Leyla (L1, L2, L3, L4) és a Mandula (M1, M2) hőmérsékleti adatai 2012.06.30. – 07.08.

ahol a 4 fős csoport a Leylánál $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal, a Mandulánál $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal változtatta meg a hőmérsékletet. A legtöbb ember július 7-én haladt át ezen a barlangjáraton, ugyanis két túra indult az Óriás-terembe 6-6 fővel, valamint a Két-tóhoz 5 fővel. A 17 személy áthaladása 4,5 órán át tartó folyamatos hőingást okozott. A járat szűk keresztmetszete azonban segíti a rendszer gyors helyreállítását. Mind a két helyen 20 perc alatt emelkedett a maximumára a hőmérséklet, a Leylánál $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, a Mandulánál $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, ezután 40 perc alatt csengett le.

Cseppkövekben rendkívül gazdag a Galéria, amely 70 m hosszú, 1–8 m széles, s magassága 4–13 m. Miklós (1978) ebben a teremben $9,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot regisztrált 1975 nyarán. Az irodalomban az nem szerepel, hogy a terem mely keresztmetszetében, milyen magasságban történt ez a mérés. A 2012-es mérés alapján

ezt az értéket még pontosabban tudtuk meghatározni a terem különböző pontjain. Az Alsó- és Felső-Galériában elhelyezett műszerek (7. ábra) adatai alapján (12. ábra) látszódik, hogy a barlang levegője termenként stabilan rétegződik. Az Alsó-Galériában elhelyezett szenzorok G1 ($9,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, tszf. 443 m), és G2 ($8,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, tszf. 440 m) közül az utóbbit helyeztük alacsonyabb helyre, ami látható az adatsoron is (12. ábra). A Felső-Galériában kifeszítettünk egy kötelet és annak mentén fűztük fel a G3, G5 szenzorokat, melyek hőmérséklete: $9,65\text{ }^{\circ}\text{C}$, tszf. 453 m. A G4-es szenzort a medvecsontok mellett helyeztük el, melyet 449 m-es magasságban rögzítettünk ($9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Az Óriás-terem felé tovább haladva helyeztük el a G6 és G7-es szenzort, 456 és 460 m-es magasságban ($9,8$ – $9,9\text{ }^{\circ}\text{C}$).

A csoportok okozta hőmérséklet-emelkedés alapján elmondható, hogy a szűk



12. ábra – Az Alsó-Galéria (G1, G2), és a Felső Galéria (G3, G4, G5, G6, G7) hőmérsékleti adatai 2012.06.30. – 07.08.

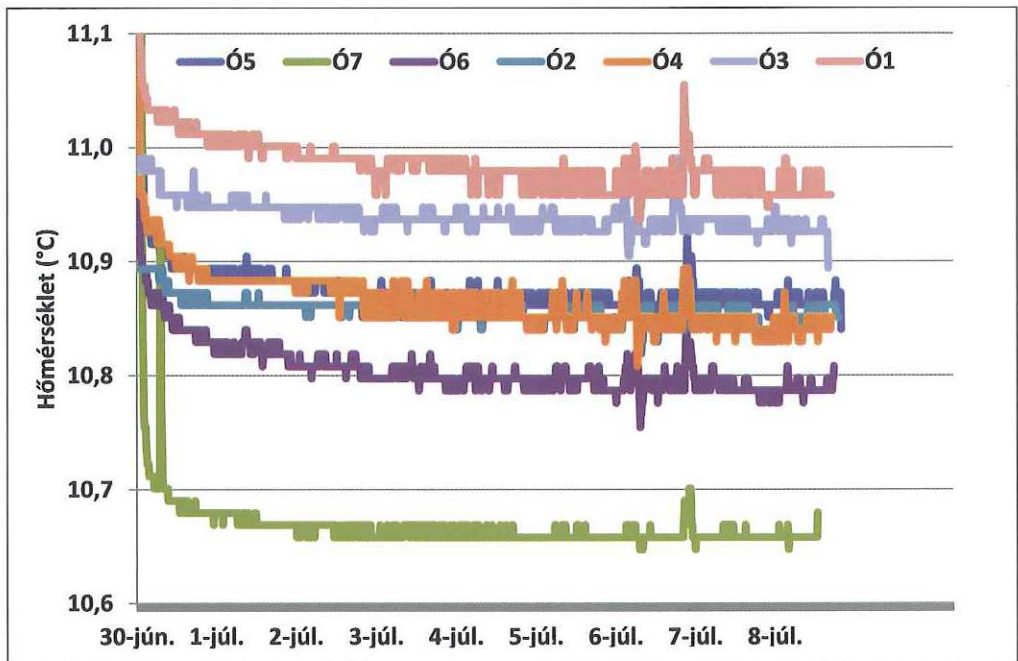
járatú Mandula után elhelyezett szenzornál (G1) még tapasztalható a Mandula által felgyorsított légtömeg, mivel a napi ritmus minimálisan észlelhető. A csoportok is itt kerültek a legközelebb a szenzorhoz, így látszódik az áthaladásuk 0,1 °C-os hőingással. A Galéria hatalmas térfogata ellenére is változások láthatók, a július 7-i 3 csapat hatása. A hőmérsékleti anomália 0,15–0,3 °C között változik.

A Galéria keleti végéből, beomlott több tonnás sziklatömbök között lehet feljutni a 63 m hosszú, 14 m magas és 16 m széles Óriás-terembe. Mennyezetéről több helyen gyökerek lógnak alá. Jelenleg ez a terem a barlang legszárazabb része, de a múltban nem lehetett így, mert hatalmas, ma száraz cseppkőképződmények díszítik.

Ismét az 1975-ös méréssel összehasonlítva, az Óriás-teremben 10,4 °C-ot rögzítettek, a 2012-es adatok alapján (13. ábra) ez az

érték 10,67–11 °C között változik, amely intervallum magasabb értékekkel rendelkezik, mint a korábbi években rögzített. Ez az eltérés azt jelezheti, hogy a nyári nagy meleg hatására a talaj és a vékony mészkőréteg jobban átmelegedett, ami problémát okozhat, mert az extrém magas hőmérséklet és a kevés csapadékkal rendelkező nyarak a barlang legnagyobb kiterjedésű egybefüggő cseppkőlefolysának – egy természeti kinccsé vált képződménynek – a Télierdőnek a degradációját is elindíthatják.

A mérés érdekessége még, hogy a barlang legnagyobb termében tartózkodó 12 fő, ha csak minimális hőmérséklet-emelkedést is okozott, mégis láthatóvá válik az adatsoron, annak ellenére, hogy a szenzorok nem a csoport közvetlen környezetükben helyezték el, hanem a barlangterem két távolabbi pontjában egy horizontálisan kifeszített 20 m-es kötélén lógtak.



13. ábra – Az Óriás-terem hőmérsékleti adatai (Ó1–Ó7) 2012.06.30. – 07.08.

4.4. Hajnóczy-barlang járatainak jellemzése

A Hajnóczy-barlang egy felszín közeli barlang, hiszen az Óriás-terem és a Bejárat közeli szakaszok felett található a legkevesebb felszíntakaró (2–10 m). A fedőréteg mégis pufferként hat, hiszen a repedéseken keresztül nem érzékelhető a felszín direktmódosító hatása (14. ábra). Az Óriás-terem 10,8 °C-os átlagos hőmérséklete (4. ábra) télen a felszínt felmelegíti, mint ahogy az a hőkamerával készült képeken is látható (Surányi, 2008). A nyári felmelegedés sem érzékelhető valamely repedésen keresztül, csak az átmelegedett fedőréteg hőátadása révén.

A járatok hőmérsékleti adatain (4. ábra) is látszódik, hogy a felszíni hőmérséklet-változás módosító hatása miként érvényesül az egyes barlangszakaszokon. A vizsgálati

időben a felszínen a napi átlaghőmérséklet –6–29 °C között változik.

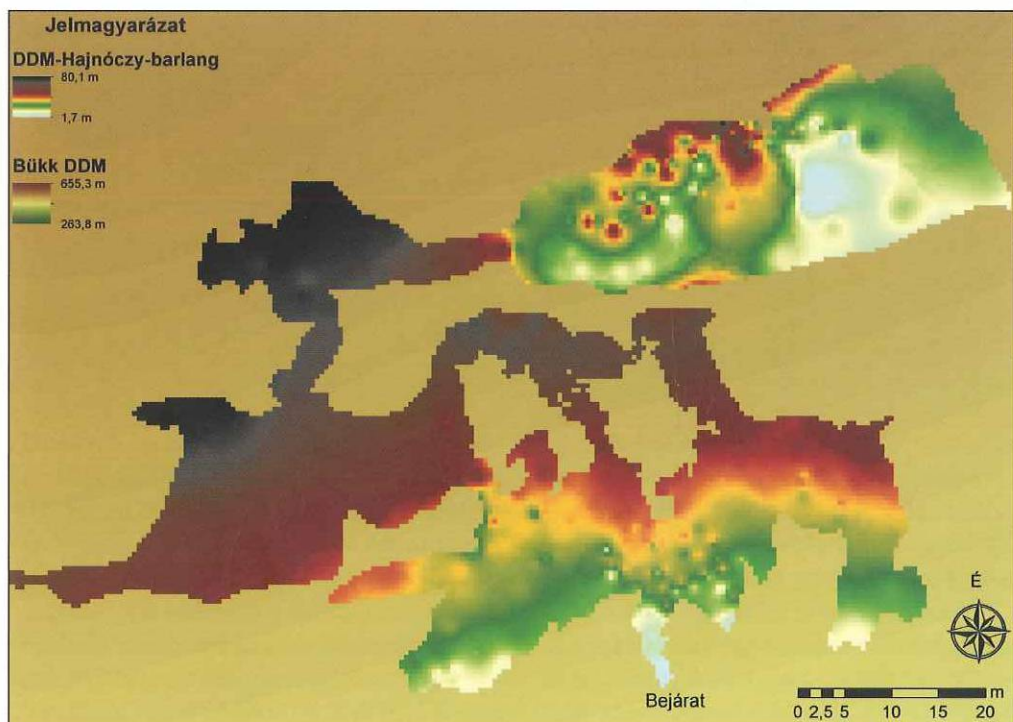
A barlang légkörzését módosító hatásokat (ΔT - hőmérséklet-változás) figyelembe véve három szakaszra oszthatjuk a barlangot:

Az első szakasz a bejárat zóna, ahol az éves ΔT 3,3–9,7 °C között mozgott, itt a hűlési szakaszról beszélhetünk (4. ábra).

Ehhez a szakaszhoz a bejárat és az azt követő 14 m-es szakaszon található Bejárat, Háztető vizsgálati pontjai tartoznak.

Itt az átlagos hőmérséklet 5,7–7,5 °C között változik, a vizsgálati pontok tengerszint feletti magassága 457–454 m,

A második az örvénylési szakasz, ahol a felszíni napi hőingás, illetve az évszakok változása is megjelenik, az éves ΔT értéke 1–0,8 °C.



14. ábra – A Hajnóczy-barlangot fedő kőzet és a talaj vastagsága a járatok és termek fölött

Ezek a vizsgálati pontok szűkebb keresztmetszetűek, ide tartozik a Lapos-terem, Nagy-terem és Leyla között, Leyla, Mandula. Ez a bejárattól számított 14–64 m közötti szakasz.

Az átlagos hőmérséklet 8,0–8,7 °C között változik, a járatok magassága 439–430 m között található.

– A melegedési szakasz a ΔT 0,3–0,1 °C közötti változással.

A bejárattól 64–73 m-re található Galéria, Galéria és Óriás-terem között, Óriás-terem tartozik ide.

Az átlagos hőmérséklet 9,7–10,8 °C, a járatok magassága 453–476 m.

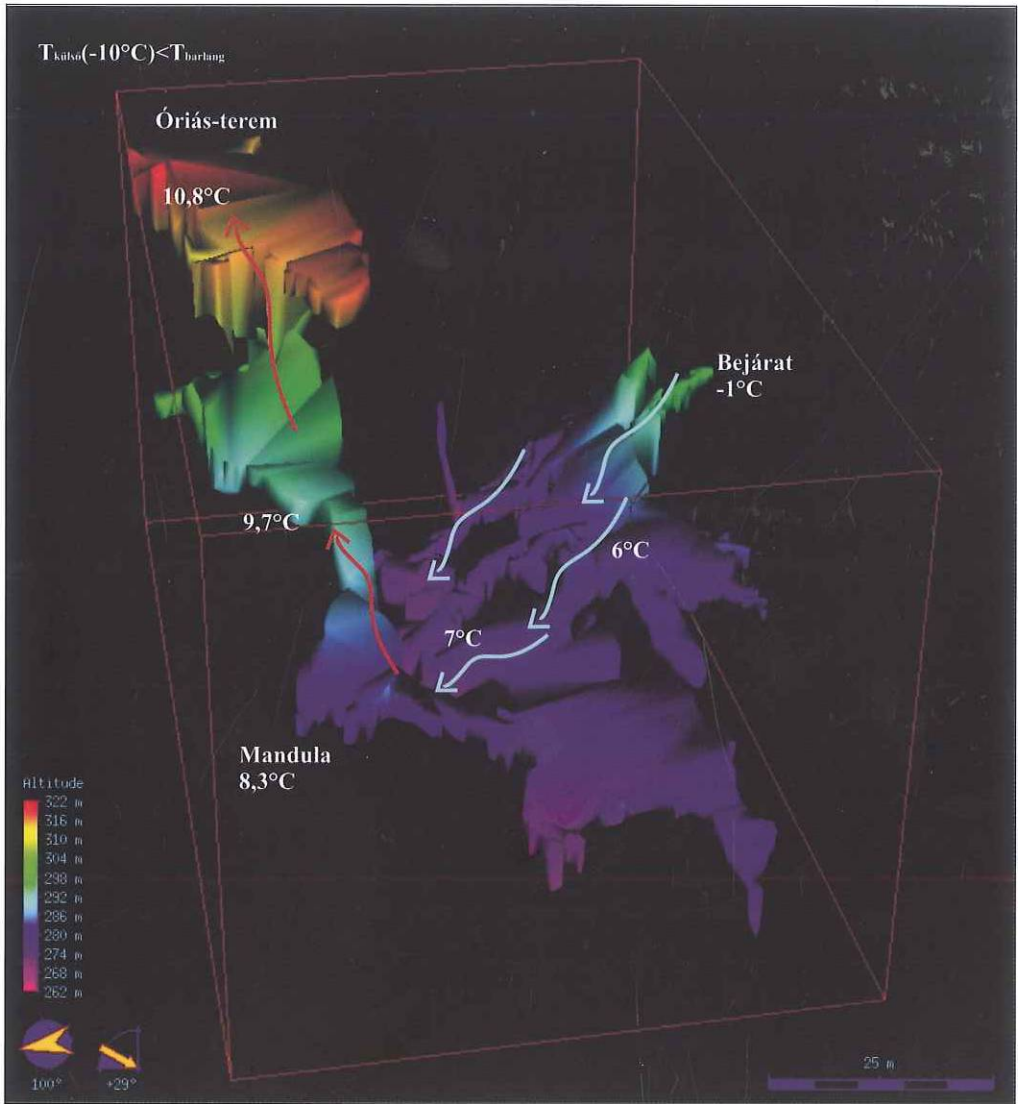
A Hajnóczy-barlang évszakos vizsgálata alapján elmondható, hogy a téli-nyári légkörzés fordulását a tartósan 10 °C alatti napi hőmérséklet idézi elő. A vizsgált időszakban ez 2012.11.27.-i időponttól kezdődik. A felszíni tartós lehűlés egyre erőteljesebben hat a barlangi levegőre a Bejáraton keresztül a Mandula vonaláig (15. ábra) (Muladi, Mucsi, 2014). A Mandulától felfelé haladva az Óriás-teremig a levegő rétegzettsége alapján egy gyenge feláramló hatás jellemző.

A nyári hónapokban a Bejáratnál 10,9 °C-ra áll be a hőmérséklet, a felszíni meleg nem hat ezen a szakaszon. Az Óriás-terem esetében a vertikális rétegzettség hatására megmarad a gyenge feláramló légmozgás (16. ábra), de a felszíni napsugárzás hatása csak a talaj hőátadásával történik meg, a vizsgált szakaszokon a nagyobb repedések hatása nem befolyásolja a hőmérsékletet (14. ábra). Ugyanakkor a felmerül a kérdés, hogy a nyári hónapokban honnan pótlódik a Hajnóczy-barlang levegője? Erre a 2012-es nyári mérés során kaptunk választ a kibővített vizsgálati helyszínek segítségével. A mért adatok alapján a Lapos-terem keleti végében látható a nyári hónapokban a napi hőingás (10. ábra) a D1-es pont irányából, itt feltételezhető egy olyan repedés, amely

kapcsolatban áll a felszínrel (16. ábra).

Több elmélet is született annak kapcsán, hogy a Galériánál talált medvecsontok hogyan kerülhettek a barlang azon szakaszára. Egyes feltételezések szerint a magasabb helyzetű, felszín közeli járatokból mosódott be az állat (Kordos, 1984). A Hajnóczy József Barlangkutató Csoport is kísérletet tett az egykori barlang bejáratának felkutatására. Az 1983-as kutatási jelentésükben leírják, hogy az Óriás-terem egy felsőbb szakaszán próbálkoztak, melynek kapcsán feltárták a Szabó András-termet (Mucsi, 1984). A megváltozott klíma miatt azonban a további kutatást felfüggesztették az Óriás-teremben és Galériában kialakult nagyméretű cseppkőképződmények megóvása érdekében. A Galéria és az Óriás-terem jelenlegi állapotát tekintve a mérések során nem érzékeltünk olyan repedést, amely a barlangon belüli felszíni kapcsolatot mutatná (Muladi, Mucsi, 2014).

A Hajnóczy-barlangban, a 2012-es nyári kutatótábor ideje alatt végeztük el az aperiodikus hatású vizsgálatokat a barlangban túrázó csoportok által okozott hőmérséklet-változásról. A bejárat szakaszon 6 fős csoportok esetén 0,1–0,3 °C között változik a hőmérséklet (3. táblázat). Az örvénylési szakaszon 4–6 fő esetén 0,1–0,5 °C között változik a csoportok nagyságától függően, a járatok szűk keresztmetszete segítette a levegő gyorsabb helyreállítását (3. táblázat). A Leylánál és Mandulánál is 40 perc alatt lecsengett a csoportok által okozott hőmérséklet-növekedés. A barlangi szakasz már a nagy termeket foglalja magában, azonban a Galéria szakaszán is érzékelhető a csoport okozta hőmérséklet-emelkedés, ami 0,1–0,3 °C között változik (3. táblázat). Bár az Óriás-teremben csak minimálisan látszódik, de a 12 fős csoport felborítja az egyensúlyi állapotot (13. ábra).

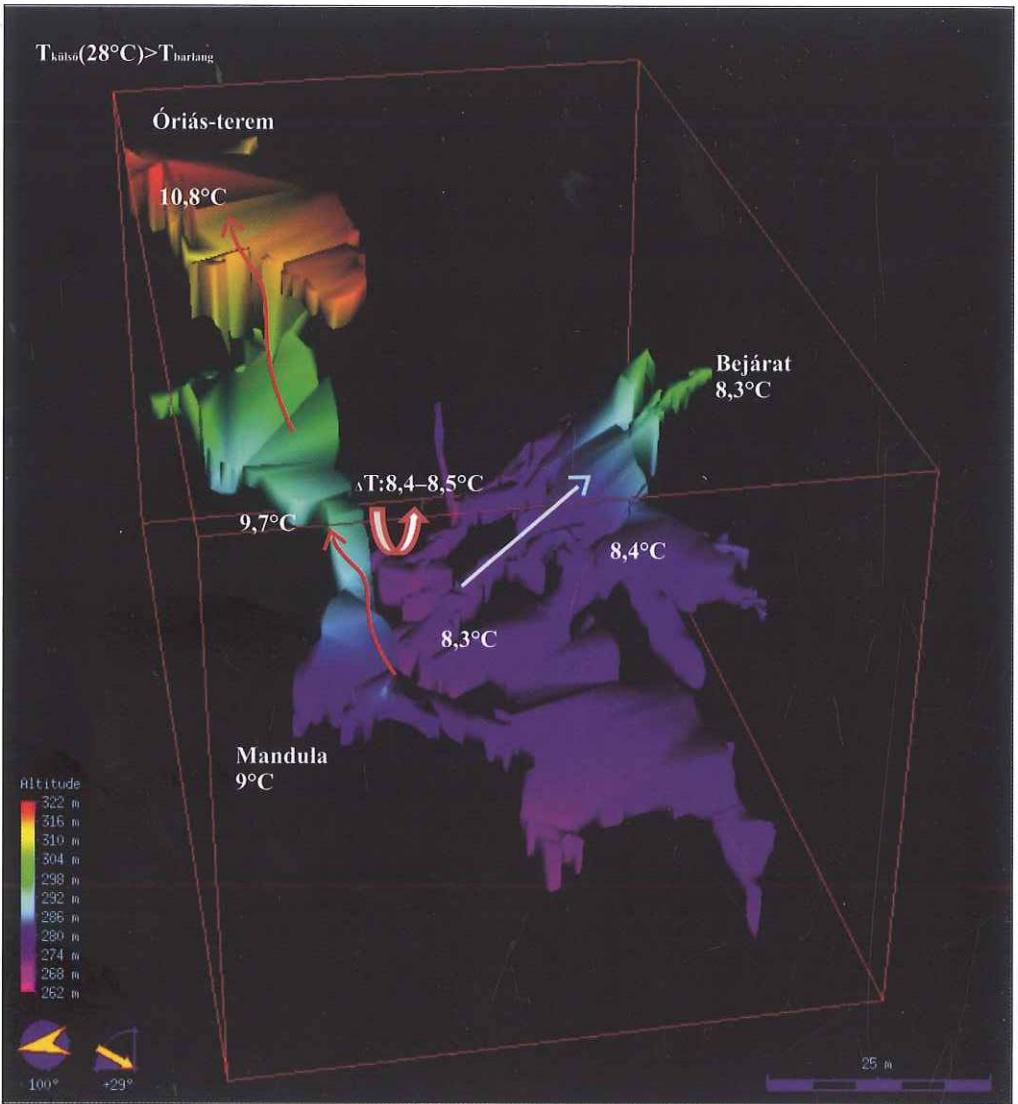


15. ábra – A Hajnóczy-barlang légközrészmodellje a téli hónapokban

5. Összegzés

Munkánk során a barlangklíma vizsgálatához új módszert fejlesztettünk ki az UC Mote Mini vezeték nélküli szenzorhálózat eszközével. A barlangi hőmérsékletmérés-sorozat megkezdése előtt már megbizonyosodtunk arról laboratóriumi és barlangi körülmények között, hogy

a műszerek alkalmasak lesznek a vizsgálathoz. A szenzorok 0,01 °C-os felbontása lehetővé tette mind a természetes, mind pedig az antropogén eredetű legapróbb hőmérséklet-változások kimutatását. A műszerek pontosságának 0,3 °C-os különbségét a mérések megkezdése előtt kalibrációval küszöböltük ki. A műszerek könnyen és gyorsan telepíthetők, szállításuk a bar-



16. ábra – A Hajnóczy-barlang légközrészmodellje a nyári hónapokban

langban megoldható. A szenzoroknak nem okozott problémát a magas páratartalom. A vezeték nélküli szenzorhálózat új típusú eszközével sikeresen megvalósítottuk az adatgyűjtést a barlangban.

A Hajnóczy-barlangban 2011 decemberében kezdtük meg a méréseket, ahová 10 db műszer kihelyezésére került sor. A mintavételi pontokon 10 percenkénti

adatrögzítést folytattunk, így 61.934 db adatot használtunk fel a különböző járatokról feldolgozott elemzésünkhöz.

Elkészítettük a járatok hőmérséklet-eloszlásának vertikális metszetét, a vizsgálati idő alatt mért átlaghőmérsékletek alapján. Az adatok alapján bebizonyosodott, hogy a bejárat szakasz esetében még érvényesül a vertikális különbségek okozta hőmér-

3. táblázat – A Hajnóczy-barlang különböző szakaszainak hőterhelése adott csoportlétszám hatására

	Tszf. (m)	A (m ²)	T _{átlag} (°C)	6 fő ΔT (°C)	5 fő ΔT (°C)	4 fő ΔT (°C)	3 fő ΔT (°C)
B1	457	0,58	8	0	0	0	0
B2	454	0,6	9,1	0,3	0,3	0,2	0
B3	454	8	8,25	0,15	0,15	0,12	0,05
B4	431	0,8	9,46	–	–	0,2	0,3
B5	428	0,7	9,46	–	–	0,2	0,3
B6	442	9	8,39	0,12	0,1	0,12	0,07
B7	441	0,7	8,55	0,15	0,2	0,15	0,05
D1	431	3,8	8,45	0,36	0,2	0,1	–
D2	430	3,8	8,3	0,1	0,3	0,1	0,1
D3	435	5,5	8,75	0,1	0,1	0,05	0,05
D4	436	21	8,69	–	–	–	–
L1	434	4,7	8,7	0,1	0,1	0,05	0,06
L2	434	3,14	8,9	0,2	0,13	0,1	0,05
L3	435	3,1	9,07	0,32	0,22	0,14	0,11
L4	435	2	8,95	0,45	0,4	0,2	0,12
M1	437	0,5	9,09	–	–	–	0,1
M2	439	0,6	8,95	0,4	0,4	0,5	0,1
G1	443	51,81	9,1	0	0	0	0
G2	440	20,41	8,9	0,13	0,1	0,1	0,1
G3	453	40,5	9,65	0,27	0,17	0,08	–
G4	449	50,24	9,5	0,43	0,2	0,05	–
G5	453	50,24	9,65	0,1	0,04	0,04	–
G6	456	15	9,8	0,14	0,12	0,09	–
G7	460	1,57	9,9	0,25	0,17	0,18	–

séklet-rétegződés. A barlangon belül, függetlenül a tengerszint feletti magasságtól, egyre melegebb tendencia figyelhető meg. A járatok átlaghőmérséklet adatai alapján bebizonyítottuk, hogy a bejárattól vett távolság nagyobb mértékben befolyásolja a hőmérséklet eloszlását, mint a tengerszint feletti magasság.

Lehatároltuk a járatokban bekövetkező napi, évszakos és éves hőingás és a barlang bejáratától számított távolságuk alapján

a bejárat, az örvénylési és a barlangi légkörzés szakaszát. A vizsgált barlang esetében a konvekciós légáramlás hatására télen hűlési, nyáron pedig a barlangból kiáramló levegő jelentkezik. Minden barlangban egyedi módon alakul a felszíni hatás, amely járatokban más-más intenzitással érvényesül.

A Hajnóczy-barlang esetében a bejárat szakasz 14 m-ig tart (ΔT=3,3–9,7 °C), az örvénylési szakasz a 14–64 m közötti

szakasz ($\Delta T=0,8-1\text{ }^{\circ}\text{C}$), a barlangi szakasz ezen belül helyezkedik el ($\Delta T=0,1-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$). Meghatároztuk, nyári légközés idején, a barlangbejárat teljes keresztmetszetében a szabadba áramló levegő maximális hőfokát, mely $8,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os.

Kimutattuk az évszakos és a napi hőingások mértékét a barlang különböző szakaszain. Az évszakos hőingás vizsgálata során kimutattuk, mikor történik a huzat fordulása. Az évszakok közül a tavaszi és az őszi légközés egy rövidebb átmeneti állapot, amikor minimális a hőingás a barlang minden szakaszán. A napi hőingás-értékeket elemezve megállapítottuk, hogy milyen légköri hatások okozzák a barlangban fellépő hőmérsékletváltozását. Lokalizálni tudtunk olyan pontokat a barlangban, ahol nem a bejáraton keresztül történik a légközés. A járatok fölött elhelyezkedő talaj és mészkő vastagságát megvizsgálva meghatároztuk azt, hogy az adott hasadék vagy repedés permeábilis-e. Ezen pontok vagy járatszakaszok beazonosítása a feltáró barlangkutatók számára nagy jelentőséggel bír.

Meghatároztuk az antropogén hatás mértékét a csoportlétszám és járatok mértékének függvényében. A korábbi antropogén hatással foglalkozó vizsgálatok főként a tömegturizmus számára kiépített barlangokban történtek a szakirodalom szerint. A Hajnóczy-barlang változatos keresztmetszetű járataiban a nyári kutatótábor alkalmával naponta barlangba induló kutatók segítségével, a hőmérsékleti adatok segítségével nyomon követhető a volt barlangban megtett útjuk. Ezek után meg tudtuk határozni a különböző járatszelvényekben jelentkező hőtöbblet nagyságát is, melyet a különböző csoportok okoztak. Vizsgálataink során választ kaptunk arra, hogy nemcsak a szűkjáratokban érzékelhető a csoportok okozta pozitív hőmérsékleti anomália, de a nagyobb terekben is. Az okozott hőmérséklet-emelkedés mellett

a lecsengési időket is fel tudtuk mérni a járatkeresztmetszetek függvényében.

A vizsgált barlang járatait ért hatások alapján elkészítettünk egy komplex légáramlásmodellt. Az egyes járatok évszakos átlaghőmérséklete, valamint a hőingások alapján kimutathatóvá vált, hogy a bejáraton beáramló levegő évszaktól függően meddig módosítja a barlang klímáját, vagy lokálisan hol alakulnak ki olyan anomáliák a hőmérsékletben, amelyek sajátos légáramlást okoznak. A vizsgálataink során kimutattuk, hogy a nyári légközés esetén, a bejáraton keresztül áramlik ki a levegő barlangból, míg a Lapos-terem szakaszán megfigyelhető légáramlás arra enged következtetni, hogy ott egy erőteljesebb szívó hatásra beáramlik a levegő. Ezeket a hatásokat ábrázoltuk a barlangok 3D-s modelljén, vagy hőtérképén.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet mondani Maróti Miklósnak, Csépe Zoltánnak, Bíró Andrásnak, Barta Károlynak, valamint a Hajnóczy József Barlangkutató Sportegyesület kutatásvezetőjének, Varga Csabának és Mező Ákosnak.

Az eszközöket a TÁMOP-4.2.2/08/1/2008-0008 keretében a Nemzeti Fejlesztési Ügynökség támogatta.

Irodalomjegyzék

- Badino, G. (2010): Underground meteorology- „What's the weather underground?”. *Acta Carstologica*, **39/3**, 427–448.
- Bekey Imre Gábor Barlangkutató Csoport (1996): 1995 évi munkájáról, Jelentés, Budapest, 39 p.
- Fodor, I. (1980): Barlangklíma és terápia. In: Hazslinszky,

- T. (Ed.): 70 éves a szervezett magyar karszt- és barlangkutatás 1910–1980. Magyar Karszt és Barlangkutató Társulat, Budapest, 36–42.
- Fodor, I. (1981): A barlangok éghajlati és bioklimatológiai sajátosságai. Akadémia Kiadó, Budapest, 190 p.
- Hevesi, A. (1978): A Bükk szerkezet- és Felszín-fejlesztésének vázlata. Földrajzi Értesítő, 169–209.
- Hevesi, A. (1991): Magyarország karsztvidékeinek kialakulása és formakincse. Földrajzi közlemények, **39/3–4**, 99–120.
- Hevesi, A. (2003): Bükkkvidék. In: Székely, K. (Ed.): Magyarország fokozottan védett barlangjai. Mezőgazda kiadó, Budapest, 99–106.
- Hir, J. (1985): Hajnóczy-barlang üledékei. Karszt és Barlang, **1–2**, 21–40.
- Jakucs, L. (1971): A karsztok morfogenetikája – A karsztfejlődés variációi. Akadémia kiadó, Budapest, 310 p.
- Kessler, H. (1941): Az aggteleki barlang leírása és feltárásának története. Mérnökök Nyomdája, Budapest, 56 p.
- Keveiné, B.I. (2009): A karsztok ökológiai rendszere. JATEPress, Szeged, 121 p.
- Kordos, L. (1970): Klímamegfigyelések a barlangok bejárat zónájában. Karszt és barlang, **1**, 31–34.
- Kordos, L. (1984): Magyarország barlangjai. Gondolat Kiadó, Budapest, 315 p.
- Kordos, L. (2002): A bükki barlangok ősmaradványai. In: Baráz, Cs. (Ed.): A Bükki Nemzeti Park hegyek, erdők, emberek. Bükki Nemzeti Park, Eger, 195–203.
- Lengyel, Z. (2007): ZigBee hálózat analízátor. TDK dolgozat. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 60 p.
- Litschmann, T., Rožnovský, J., Středa, T., Středová, H., Hebelka, J. (2012): Temperature and humidity conditions of Mococho Abyss. Contributions to Geophysics and Geodesy, **42/3**, 227–242.
- Miklós, G. (1978): A Hajnóczy-barlang mikroklímája. Karszt és barlang, **1–2**, 11–18.
- Mucsi, L. (1984): Kutatások és munkálatok az Óriás-terem tetején, Tiszaföldvár. Jelentés a Hajnóczy József Barlangkutató Csoport 1983. évi munkájáról. 1–10.
- Mucsi, L. (1992): Karsztmorfológiai vizsgálatok Odorvár környékén, Különös tekintettel a különböző kőzetadottságú felszínekre, Szegedi Tudományegyetem, Szeged, 94 p.
- Mucsi, L., Balog, A., Juhász, G. (2004): Interaktív, 3D-s barlangi információs rendszer a világhálón. Geodézia és Kartográfia, **56/12**, 3–8.
- Muladi, B., Mucsi, L. (2013): Investigation of daily natural and rapid human effects on the air temperature of the Hajnóczy cave in Bükk mountains. Journal of Environmental Geography, **6/3–4**, 21–29.
- Muladi, B., Mucsi, L. (2014): Investigation of the spatial and temporal trends of the air temperature of the Hajnóczy cave in the Bükk mountains. Geographica Pannonica, **18/3**, 51–61.
- Muladi, B., Csépe, Z., Mucsi, L., Puskás, I. (2012): Application of wireless sensor networks in Mecsek Mountain's caves. In: Stünzi, H. (Ed.): Proceedings of the 13th National Congress of Speleology. ETH, Zürich, 131–136.
- Muladi, B., Csépe, Z., Mucsi, L. (2013a): Barlangklimatológiai mérések két különböző karszterületen elhelyezkedő magyarországi barlangban. In: Veress, M. (Ed.): Karsztfejlődés. XVIII. NYME kiadó, Szombathely, 127–136.
- Muladi, B., Csépe, Z., Mucsi, L., Puskás, I., Koltai, G., Bauer, M. (2013b): Climatic features of different karst caves in Hungary. In: Filippi, M., Bosák, P. (Eds.): 16th International Congress of Speleology. Czech Speleological Society, Prague, 432–438.
- Sensiron (2011a): Datasheet SHT21 Humidity and Temperature Sensor IC. The sensor company, **3**, 1–14.
- Sensiron (2011b): Datasheet Filter Cap SF2 For Humidity and Temperature Sensor SHT2x. The sensor company, **2**, 1–5.
- Smith, A.C., Wynn, P.M., Barker, P.A. (2013): Natural and anthropogenic factors which influence aerosol distribution in Inleborough Show Cavw, UK. International Journal of Speleology, **42/1**, 49–56.
- Stieber, J. (2014): Klímaelemek, azok mérési módszerei és mérésének eszközei. In: Dolgos, M. (Ed.): Kutatásvezetői ismeretek. MKBT Oktatási Szakosztály, Budapest, 342–366.
- Surányi, G. (2008) A magyar állami természetvédelem hivatalos honlapja – Barlangkutatási jelentések.
- Townson, R. (1797): Travels in Hungary. London.

- Varga, Cs. (2003): Hajnóczy-barlang. In: Székely, K. (Ed.): Magyarország fokozottan védett barlangjai. Mezőgazda Kiadó, Budapest, 200–204.
- Zelinka, J., Stieber, J. (2014): A barlangrendszer és környékének klímája. In: Gruber, P., Gaál, L. (Eds.): A Baradla–Domica barlangrendszer. Aggteleki Nemzeti Park Igazgatóság, Jósvafő, 211–231. http://www.termeszetvedelem.hu/_user/browser/File/barlangkutat%C3%A1si%20jelent%C3%A9sek/2008/ariadne_cholnoky_2008.pdf, letöltés ideje: 2015.12.20.

A KÖTET – 2016-ban PhD-fokozatot szerzett – SZERZŐI



Andrási Gábor (1986, Szekszárd) az Szegedi Tudományegyetem TTIK Földrajz szakára 2006-ban nyert felvételt. Kiss Tímea egyetemi docens témavezetése mellett, a Dráva hidro-morfológiájával kezdett foglalkozni. 2009-ben Földrajz BSC diplomát, majd 2011-ben Geográfus (MSc) diplomát szerzett. A PhD-képzést 2011-ben kezdte, tovább folytatva a Dráva vizsgálatát. 2015-től Szarvason a NAIK ÖVKI-ben végez kutatói tevékenységet. Kutatásaiból nyolc tudományos publikáció született, egy nemzetközi és hét hazai konferencián vett részt.

Balizs Dániel (1986, Kecskemét) terület- és településfejlesztő geográfus. Diplomáját a Szegedi Tudományegyetemen szerezte 2010-ben. Doktori kutatását a Gazdaság- és Társadalomföldrajz Tanszéken folytatta, jelenleg tudományos segédmunkatárs az MTA-CSFK Földrajztudományi Intézetében. Tudományos érdeklődése az etnikai földrajz, ezen belül főként az asszimiláció témaköre felé irányul; érdekli még a turizmus kutatásokat, ezen belül az alternatív turizmus ágai iránt is.



Gulyás Péter (1977, Mezőtúr) közgazdasági szakokleveles geográfus. Egyetemi diplomáját a Szegedi Tudományegyetemen szerezte 2000-ben. Tudományos tevékenysége mellett több mint egy évtizedig dolgozott a Magyar Turizmus Zrt-nél. Szívügyének tekinti az Alföld regionális problémáinak kutatását, különösen a turisztikai témákat. Doktori kutatásait is e témában végezte az egyetem Gazdaság- és Társadalomföldrajzi Tanszékén az Alföld vidékturizmusára vonatkozóan.

Csépe-Muladi Beáta (1988, Csongrád) geográfus, geoinformatikus. Diplomáját a Szegedi Tudományegyetemen szerezte. Doktori kutatásában három karszterületen, különböző morfológiai adottságokkal rendelkező barlangban vizsgálta a barlangklíma sajátosságait, az évszakos légáramlás változásait és az aperiodikus hatásokat. Munkája során a barlangklíma vizsgálatához új módszert fejlesztetett ki.

