

## TEREPI MÉRÉSEK A GELLÉRT-HEGY BELSEJÉTŐL A SZÁRAZ-ANDOKIG

Weidinger Tamás(1), Nagy Balázs(2), Mádlné Szőnyi Judit(3),  
Bodor Petra(3), Salavec Péter(1), Tordai Ágoston(1)

(1) ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

(2) ELTE Természetföldrajzi Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

(3) ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter st. 1/C

e-mail: weidi@caesar.elte.hu

### Bevezetés

A különböző felszín típusok energiaháztartásának megértéséhez méréseken át vezet az út. A felszíni energiamérleg ismerete fontos a légköri energetikában, a parametrizálási eljárások fejlesztésében, de a numerikus modellszámítások tesztelésénél is.

Számos érdekes helyen folytak mikrometeorológiai mérések hazai és külföldi kollégákkal együttműködve az elmúlt években is, mint például Svédországban (Weidinger et al., 1999), Dániában (Schelde et al., 2012), Lengyelországban (Pogány et al., 2012), vagy a utahi sivatagban (Weidinger et al., 2009). A cikkben két ideai mérési programmal és az adatfeldolgozás első eredményeivel ismertetjük meg az Olvasót.

Az első mérési programra 2016 februárjában került sor a Magyar Száraz Andok Kutatási Program harmadik expedícióján (Nagy, 2016; atacama.expedicio.eu/hu). A közös mérés terve már korábban megszületett, a 2014-es Meteorológus TDK Nyári Iskolán (Nagy et al., 2014) egy késő esti beszélgetés során. A mérések a Föld legmagasabb vulkáni hegyén (Ojos del Salado) folytak 5800 m (~485 hPa) magasan (*1. ábra*). A hosszú távú kutatási cél az éghajlatváltozás hatásainak detektálása a magashegyi felszínformák és a permafrost változásában. A „száraz” szó nem véletlen, hiszen alig van csapadék („sivatag a magasban”); itt a legmagasabb a Földön a hóhatár, 7000 m körüli (Mari et al., 2014.). A mi feladatunk a meteorológiai elemek napi meneteinek elemzése, az energiamérleg komponensek meghatározása, s annak felmérése, hogy alkalmazhatók-e műszereink magashegyi körülmények között (*lehet-e majd – a helyiakkal együttműködve – hosszú távú mérési programot szervezni*). Kutatásaink segítik a „hegy” különböző szintjein (*1. ábra*) 2012-ben telepített talaj- és léghőmérséklet, illetve légnedvesség mérő műszerek adatfeldolgozását is (Nagy et al., 2016). Expedíciós méréseink 2016. február 10–15. között folytak.

A másik mérés egy most zajló OTKA kutatáshoz kapcsolódik a Budai Termálkarszt területén (Mádlné Szőnyi, 2012). Itt a pályázati cél a hipogén karsztosodási folyamatok<sup>1</sup> tanulmányozása, különös tekintettel a mikrobák szerepére. A Budai Termálkarszt „természetes laboratóriumként” szolgál a mélységi eredetű folyamatokhoz köthető karsztképződés (oldódás és anyagkiválás) modellezésére. A kutatás egyik színtere a Gellért-hegy mélyében húzódó alagút (Gellért-táró), amelyet 1969–1978 között épített Kessler Hubert a források befogására. Az alagút a Gellért rakparttal közel párhuzamosan fut közvetlenül a felszín alatt. Korábbi kutatások rámutattak, hogy a Gellért-hegyi barlangok kialakulásában a mikrobák által segített kénsavas barlangképződési folyamat a domináns (Eröss, 2010; Leél-Őssy, 2011).

Az alagútban kialakított kutakból származó termálvíz ~32–36 °C-os, a forrásbarlangokban a természetes úton felszínre jutó vizek karbonát kiválást valamint vörös és fehér biofilmek kiválását eredményezik (Borsodi et al., 2012), melyeket e kutatás eredményeként a felszín alatti vízáramlások okozta megcsapolódási jelenségként értékelhetünk (Mádl-Szőnyi & Tóth,

<sup>1</sup> Kontinentális karbonátokban a mélyből származó fluidumok, gázok oldó hatására kialakuló karszt (Goldscheider et al., 2010).

2015). E lokális folyamatok megértése szempontjából is fontos, hogy e vizek jelentős része a budai és a távolabbi kiemelt karbonátos hegységekben szivárog be csapadékvízként és kezdi meg felszín alatti útját, de a pesti oldalról, – ahol a karbonátok már elfedetten találhatóak, – a fedőrétegekből járulékos mennyiségben NaCl-os víz is jut hozzájuk mielőtt a felszínre lépnek (Mádl-Szőnyi & Tóth, 2015).

A táróban egy in situ kísérlet folyik az OTKA projekt keretében, melynek célja a forrás-barlangokban természetes módon bekövetkező termásvíz megcsapolódás és a hozzá köthető biológiai és kémiai eredetű oldási és kiválási folyamatok ellenőrzött körülmények közötti megértése (Mádlné Szőnyi, 2012). E kísérlet egyik fő kérdése a biológiai és a kémiai kiválási és oldási folyamatok háttérének elemzése. A Gellért-táró közepén egy csatorna (~5 cm mély, ~20–28 cm széles és > 400 m hosszú) fut, mely a túlfolyó termásvizek szabályozott elvezetésére szolgál. A Duna magas vízállása esetén a túlfolyó mentén található zsomp vízszintje megemelkedik, a víz kifolyik a csatornába. Az in situ kísérlet első fázisában, a Duna alacsony vízállása mellett, a kiválásoktól megtisztított csatornába a zsombból termásvíz szivattyúzás zajlott (~10 L perc<sup>-1</sup>), miközben a csatorna hossz-szelvénye mentén a fizikai-kémiai paraméterek (pH, T, fajlagos elektromos vezetőképesség, oldott oxigén, redox potenciál), oldott gázok (CO<sub>2</sub> és <sup>222</sup>Rn), valamint további radionuklidok (<sup>226</sup>Ra, <sup>234</sup>U+<sup>238</sup>U, <sup>222</sup>Rn), fő- és nyomelemek változásának elemzése zajlott. E kísérleti vizsgálatra két alkalommal, 2016. március 23-án és április 21-én került sor (Bodor et al., 2016).

Természetesen a modellezéshez ismerni kell a vízhőmérsékletet és a mikroklimatikus jellemzőket (hőmérséklet, nedvesség, energetikai viszonyok) is. Ezt segítette a mérési programunk. A 2 m-es műszer-oszlopot a zsomp mellé telepítettük (4. ábra). Két hőmérséklet-relatív nedvesség műszert (Votcraft USB mérő-adatgyűjtő) is elhelyeztünk, egyet a zsompnál és egyet attól 100 m-re a táró oldalánál. A program elején mobil mikroklíma méréseket is végeztünk a zsomp-tól 300 m-es távolsáig (hőmérséklet, légnedvesség, vízhőmérséklet). A folyamatos mikroklíma mérések 2016. április 23. és július 19. között folytak.

A cikkben elsőként a műszerezettséggel és az adatbázis-építéssel foglalkozunk, majd a két mérési program első eredményeivel ismerkedünk. Kitérünk a mérések megbízhatóságára és az energiamérleg számításában rejlő bizonytalanságokra is.

### **Műszerezettség, adatbázis-építés**

Hazai és EU-s támogatásoknak köszönhetően, az elmúlt években kiépült egy mobil mikro-meteorológiai mérőrendszer az ELTE Meteorológiai Tanszéken, ami a Synop mérések mellett alkalmas a sugárzási mérleg komponensek (rövid- és hosszuhullámú, PAR, infra-hőmérséklet), a felszín és a talaj energiaháztartásának meghatározására, profilmérésekre (szél, hőmérséklet, nedvesség, CO<sub>2</sub>) és direkt árammérésekre (impulzus szenzibilis hő, ózon). Ezekből állítottuk össze a két expedíciós mérés műszerparkját. Mindkettőben szerepel az alap-állapotjelzők mérése mellett az energiamérleg meghatározása (1. táblázat). Közösen fejlesztettünk adatgyűjtő és feldolgozó programot is.

A mikrometeorológia – amikor a felszínközeli légtér folyamatairól van szó – a meteorológia szerves része, más esetekben, mint pl. az Andokban a geomorfológiai és a permafrost hosszú távú változásainak vizsgálatánál, vagy a Gellért-táróban folyó hidrogeológiai kutatásokban az adott tudományterület *segédtudományaként* szerepel. Segíti a jelenségek megértését, magyarázatát. Mindkettő fontos szerep.

A műszereket Campbell CR23X adatgyűjtőre kötöttük. A mintavételezési idő 5 s volt, s 5 perces átlagolással dolgoztunk. Mind a nyers, mind a kalibrált adatokat (fizikai mennyiségek) rögzítettük. Ez különösen az utófeldolgozásnál bizonyult hasznosnak, amikor például technikai hiba miatt kimaradt valamilyen mérés, s azt tudtuk, legalább részben pótolni.

1. táblázat: A Száraz-Andokban, illetve a Gellért-táróban végzett 2016-os mikrometeorológiai mérések műszerezettsége.

Meteorológiai elem	Típus, gyártó/forgalmazó	Andok	Gellért	Megjegyzés
		Mérési szint (m)		
Globálsugárzás ( <i>Gr</i> ) [ $W m^{-2}$ ]	Schenk, Gy. sz.: 1043 Starpyranometer Philipp Schenk GmbH	1	–	CNR1-hez kalibrálva.
Sugárzásegyenleg ( <i>Rn</i> ) [ $W m^{-2}$ ]	Q7 REBS Net Radiometer, Gy. sz.: Q95-308) Campbell Scientific	0,6	1	Gyári kalibráció + szélkorrekció, (CNR1- hez is hozzámérve).
Fotoszintetikusan aktív sugárzás (PAR) [ $\mu mol s^{-1} m^{-2}$ ]	Kipp & Zonen PQS-1 PAR Quantum Sensor Gy. Sz.: 60756 (bejövő) Gy. Sz.: 60755 (visszavert)	1; 1	–	Gyári kalibráció + egymáshoz mérve, 2 szenzor: bejövő és visszavert PAR.
Felszínhőmérséklet ( <i>T<sub>surf</sub></i> ) [ $^{\circ}C$ ]	Campbell Scientific IRTS-P Precision Infrared Temperature Sensor (termoelemes)	1	0,6	Referencia: Campbell CR23X panel és belső hőmérője, Gellért-táróban az oldalsó falra irányítva.
Talajhőáram ( <i>Gs</i> ) [ $W m^{-2}$ ]	2 db Campbell Scientific HFP01SC Self-Calibrating Soil Heat Flux Plate: Gy. Sz.: 00 1561 Gy. Sz.: 00 1527	–0,15 –0,15	–0,02 –0,3 (zsomp)	Gyári és saját kalibráció 6 vagy 12 óránként. Gellért-táróban egyik lapka a zsomp alján.
Talajhőmérséklet ( <i>Ts</i> ) [ $^{\circ}C$ ]	4 db Campbell Scientific Model 107 Thermistor Probe	–0,05 –0,10 –0,20 –0,35	0 csat. –0,02 törm. –0,3 zsomp	Gellért-táróban (3 db): a zsomp-ban (–30 cm), a csatornában, illetve a törmelék alatt elhelyezve.
Talajnedvesség ( <i>Sw</i> ) [trf%]	2 db Campbell Scientific CS616 Water Content Reflectometer	–0,1 –0,35	–	Gyári átszámítási táblázat a talajtípus figyelembevételével.
Levélnedvesség	Campbell Scientific 237-L Leaf Wetness Sensor	Talajon	–	Páralecsapódás (Andok) észleléséhez.
Szélirány ( <i>Dir</i> ) [ $^{\circ}$ ], szélsébség ( <i>U</i> ) [ $m s^{-1}$ ]	Young Model 05103L Wind Monitor	1,8	–	Korábban szonikus anemométerrel összemérve; együtt járnak.
Szélsébség ( <i>U</i> ) [ $m s^{-1}$ ]	Vaisala WA25	0,6	–	
Lég hőmérséklet ( <i>T</i> ) [ $^{\circ}C$ ]	Vaisala HMP45A/D humidity and temperature probe	0,6	0,5	Gyári árnyékolók, Andokban technikai hiba miatt nem mért. Talajhőmérőkkel összemérve.
Relatív légnedvesség ( <i>Rh</i> ) [%]		1,2	2	
CO <sub>2</sub> [ppmv] és H <sub>2</sub> O [ppmv] koncentráció	LI-COR LI-840A CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O Gas Analyzer	–	2 0,5	Szeleppel vezérelve a két szint között. Korábban (2015) hitelesítve referencia gázokkal.

Törm. –törmelék között, csat. – A Gellért-táróban levő csatornában, elárasztás idején vízben.

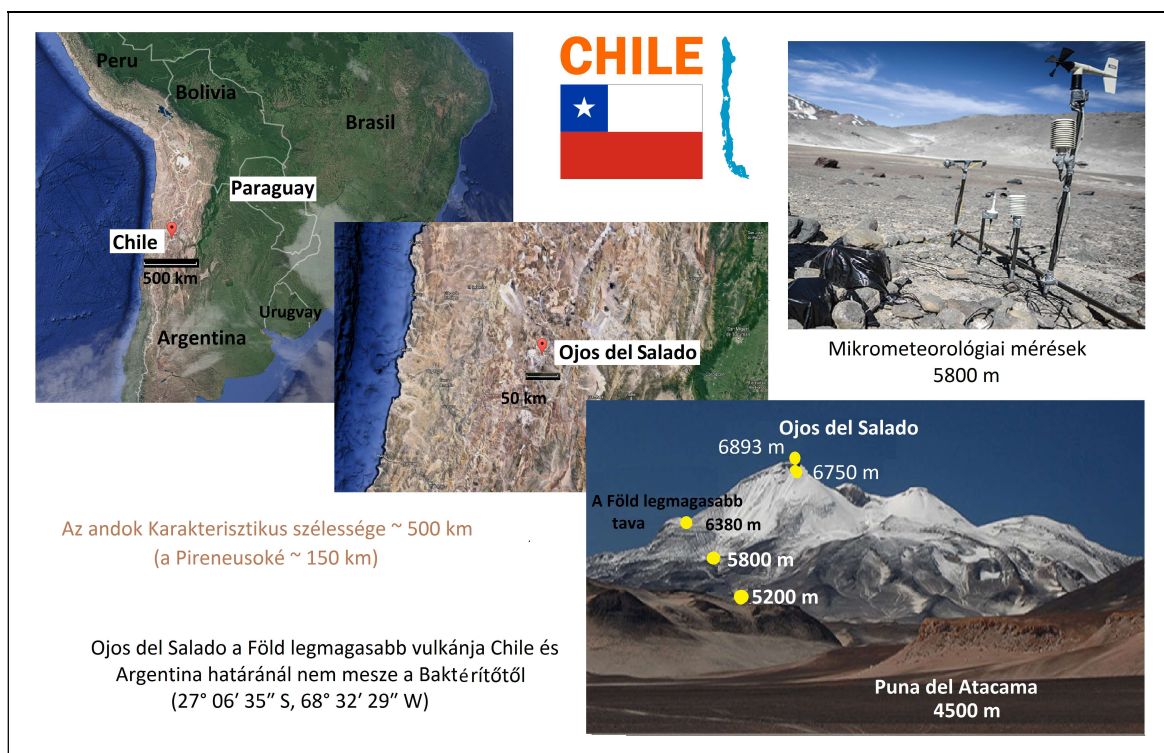
Így jártunk az Andokban. Nem mért a két Vaisala szenzor. Így hogyan becsülhetjük a hőmérséklet-különbséget? A felszíni hőmérsékletet nagy pontossággal mértük infra-hőmérővel. Rögzítettük az 1 m-es magasságban levő műszertest hőmérsékletét is. Ez természetesen nappal fölé-, éjszaka alámér. Rendelkezésre állt egy terepi műszer (folytonos mérések) órás hőmérséklet-nedvesség adatsora (*egy közös mérési nap volt!*). Ehhez már hozzákalibrálhattuk a műszertest hőmérsékletét, így hozzávetőlegesen 1–2 °C-os pontossággal ismertük a hőmérsékletet 1 m-es szinten is. A napi hőmérsékleti ingás a talajon elérte a 45 °C-ot. Ehhez kell viszonyítani a pontosságot!

A műszereket még otthon kalibráltuk. A talajhőmérőknél az eltérés 0,2 °C-on belüli volt míg a léghőmérsékletnél 0,1 °C alatti. Az egyes műszertípusok (talajhőmérséklet, Vaisala, Voltcraft) között az eltérés nem haladta meg a 0,6 °C-ot. A műszerek stabilan együtt jártak. Ugyanez igaz a relatív nedvességre is.

A két adatbázis Excel-ben készült. Megőriztük (i) az összes nyers adatot, (ii) a kalibrált és ellenőrzött 5 perces adatokat (pl. a talajhőáram-mérő hitelesítési időszakainak beinterpolálása), majd (iii) elkészítettük a mikrometeorológiában szokásos félórás átlagértékeket. Az adatfeldolgozáshoz Basic makrókat használtunk. Az akkumulátorról, illetve tápegységről (Gellért-tároló) működtetett rendszer adatkimarás nélkül üzemelt.

### Mikrometeorológiai mérések a Száraz-Andokban

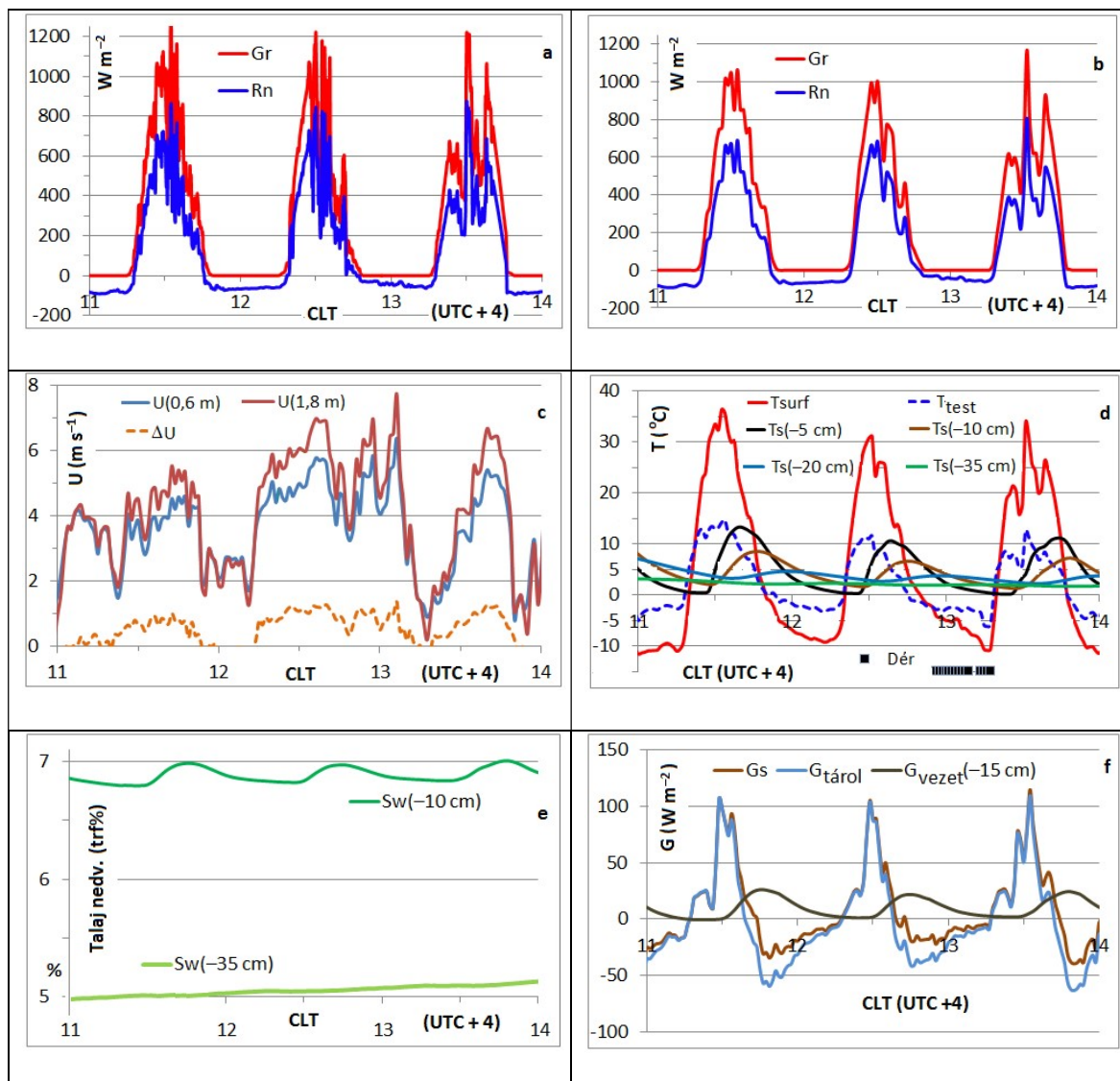
A III. Magyar Atacama expedícióra Nagy Balázs vezetésével került sor 2016. január-februárban. A közel kéthetes terepi tartózkodás során többek között geomorfológiai és geofizikai méréseket végeztek, kicserélték és kimentették a különböző magasságokban telepített talajhőmérséklet, illetve légnedvesség- és léghőmérséklet-mérő műszereket (1. ábra sárga színnel jelölt mérési helyek). A 18 műszerből álló mikrometeorológiai mérőpark (1. táblázat) február 10–15. között üzemelt. Ennyi birt az akkumulátor feltöltés nélkül.



*Magas hegyek mögött, ... ott laknak ők ...*

1. ábra: Mikrometeorológiai mérések a Száraz-Andokban a 2016-os Ojos del Salado-i expedíció során (Nagy, 2016).

A magas hegységekben, és az örök hó birodalmában végzett meteorológiai és energia-háztartási méréseknek gazdag irodalma van. 2004-ben külön munkaértekezletet szenteltek a témának (Oerlemans & Tijn-Reijmer, 2004). Egyaránt találkozunk néhány napos-hetes expedíciókkal, illetve több éven át tartó folyamatos mérésekkel. Az energiamérleg meghatározásánál egyaránt használják a Monin–Obukhov-elméleten alapuló gradiens, illetve profil-méréseket (szél, hőmérséklet, nedvesség), a Bowen-arány módszert (Favier et al., 2004) és a direkt áramméréseket (általában 10 Hz-es felbontás; Kampfa et al., 2005). Hasonló műszerezettséggel dolgoztunk, mint más gradiens mérések, de pontosabb és részletesebb talaj-méréseket végeztünk. *A Vaisala műszerek viszont nem működtek.* Szerencse, hogy a párolgás itt kicsi (Kampfa et al., 2005).



2. ábra: A meteorológiai állapotváltozók és a felső 15 cm-es talajréteg energia-háztartásának napi menete a Száraz-Andokban 5800 m magasan (Ojos del Salado, 2016. február 11–14.).

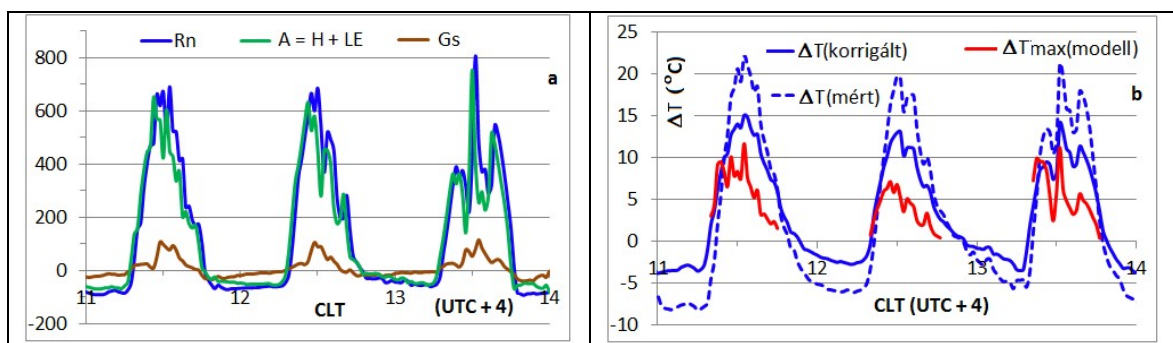
- a) globálsugárzás  $Gr$  és a sugárzási egyenleg  $Rn$  5 perces átlagolással, b) 30 perces átlagolással, c) 0,6 m és 1,8 m-es szinten mért szélesség ( $U$ ) és a szélesség különbség ( $\Delta U$ ), d) hőmérsékleti mérések:  $T_{surf}$  – felszínhőmérséklet infrahőmérővel,  $T_{test}$  – az infrahőmérő-test hőmérséklete (korrigálatlan),  $T_s$  – talajhőmérséklet 5, 10, 20 és 35 cm-es mélységben,  $Dér$  – a levélnedvesség-mérő adata szerint, e) talajnedvesség 10 cm és 35 cm mélységben, f) a talaj energiaháztartása:  $G_s$  – a talajba jutó hőáram,  $G_{tárol}$  – a felső 15 cm-es talajréteg hőtárolása,  $G_{vezet}$  – a mélyebb talajrétegekbe jutó hő (–15 cm-ről).



A meteorológiai elemek napi menetét a 2. ábrán szemléltetjük. A globálsugárzás 5 perces átlagai a déli órákban meghaladják az  $1200 \text{ W m}^{-2}$ -t, míg a sugárzás egyenleg megközelítheti a  $900 \text{ W m}^{-2}$ -t. Az ég változóan felhős volt különösen a délutáni órákban. Nagy a különbség a felhős és felhőmentes időszak sugárzási adataiban. A légkör össztömegének több mint fele a mérőhely alatti rétegben van. A félórás átlagok már kisebbek. Kiegyenlítettebb a menet.

A besugárzás napi menetében megjelenő változások visszaköszönnek a felszínhőmérsékleti adatokban is. Jól látható a talajhőmérséklet maximumainak eltolódása, az amplitúdó mélység szerinti csökkenése. A szélesség 1,8 m-en eléri nappal a  $6\text{--}8 \text{ m s}^{-1}$  értéket; éjszaka lecsökken. Ilyenkor a lefolyó hideglevegő miatt az alsó szint szele magasabb lehet. A korábbi évekhez képes „gyenge” volt a szél.

Száraz az éghajlat. A talajnedvesség 35 cm-en 5trf%. Három nap alatt 0,1trf%-kal emelkedett (*tart az olvadás, a fagyhatár kb. 60 cm-en volt*).  $-10 \text{ cm}$ -en a napi menet amplitúdója már meghaladja a 0,2trf%-ot, az átlagérték 7trf%. A talaj sűrűség 10 cm mélyen  $1,094 \text{ kg m}^{-3}$  volt,  $-35 \text{ cm}$ -en pedig  $1,338 \text{ kg m}^{-3}$ . Mi  $1,2 \text{ kg m}^{-3}$  átlagértékkel számoltunk. Ugyanezek az adatok a száraz talaj fajhőjére:  $795\text{--}895 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ;  $840 \text{ kg J}^{-1} \text{ K}^{-1}$  értékkel számoltunk. A talajparaméterek, a talajhőmérséklet és talajnedvesség profil ismeretében már becsülhető a 15 cm-es talajréteg hőtárolása. A mélyebb rétegekbe jutó hőáramot pedig mértük. Így meghatározható a talajba jutó hőáram ( $G_s$ ). Értéke nappal meghaladja a  $100 \text{ W m}^{-2}$  értéket; éjjel  $-50 \text{ W m}^{-2}$  alatti is lehet (2.f ábra). Jelentős a napi menet.  $R_n$  és  $G_s$  ismeretében megadhatjuk a rendelkezésre álló energiát ( $A = R_n - G_s$ ), ami hasonló futású, mint a sugárzásegyenleg (3.a ábra).



3. ábra: a) A sugárzás egyenleg ( $R_n$ ), a talajba jutó hőáram ( $G_s$ ) és a rendelkezésre álló energia ( $A$ ) napi menete. ( $A = H + LE = R_n - G_s$ , ahol  $LE$  a latens,  $H$  a szenzibilis hőáram).  
b) A felszín és a műszertest  $\Delta T(\text{mért})$ , illetve a felszín és a korrigált műszertesti hőmérséklet közötti különbség  $\Delta T(\text{korrigált})$  napi menete, valamint a rendelkezésre álló energia elszállításához (nincs párolgás,  $H_{\text{max}} = A$ ) szükséges hőmérsékletkülönbség.

Ahogy korábban már említettük, a párolgás kis értékű. Mennyire reális ez a feltételezés? Erre válaszol a 3.b ábra. A felszínhőmérséklet és az infra-hőmérő műszerteste (nappal fölé, éjszaka alábecsül) közötti különbség a déli órákban  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  feletti, hajnalban  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  alatti. A kinti árnyékolt hőmérő óras adatai alapján (1 napnyi közös mérés) bekalibráltuk a „szükség adta hőmérőt”. A maximális hőmérsékletkülönbség már csak  $13\text{--}15 \text{ }^\circ\text{C}$ . A szélesség és a rendelkezésre álló energia ( $A$ ) ismeretében meghatározhatjuk azt a hőmérséklet különbséget, ami akkor lépne fel, ha nem lenne latens hőáram ( $A = H$ ). A számításokat a Monin–Obukhov-féle hasonlósági elmélet alapján, 1 cm-es érdességi magassággal és stabilitástól függő aerodinamikai ellenállással számoltunk Liu et al. (2007) alapján. Eredményeink szerint: a becsült maximális hőmérsékletkülönbségek – rövid időszakoktól eltekintve – kisebbek, mint a „korrekción átesett” adatok ( $\Delta T(\text{korrigált})$ ). A szenzibilis hőáram „el tudja szállítani” a rendelkezésre álló energiát, vagyis „nincs helye a modellben” nagy párolgásnak. ( $A$  talaj-

*nedvesség felhasználásával készített párolgásbecslés a közeli jövő feladata lesz.)* További feladatok között szerepel a felszínközeli réteg hőmérsékleti gradiens és az aerodinamikai ellenállás becslésének javítása, a bizonytalanság számszerűsítése.

Az energiamérleg komponensek műholdas adatok alapján is becsülhetők (Nishida et al., 2003). Ennek mérésekkel való összevetését is tervezzük. Kísérletezünk a WRF modell Dél-Amerikára történő adaptálásával (Ruiz et al., 2010), a mérési adatok időjárási modell-számításokkal történő összevetésével is. E munkát *Breuer Hajnalka* koordinálja. *Mindez érdekes TDK témákat rejt a hallgatók számára.*

### Mikroklima mérések a Gellért-táróban

A következő kutatási téma a barlangklíma. Előzetesen két kérdésre keressük a választ. Milyen kapcsolat van a beltéri és a kültéri levegő között, tudva, hogy a Gellért-tarót egy szellőzőrendszer kapcsolja össze a külső légtérrel? A mérőhelynél futó szellőztető folyosó (merőlegesen a táróra) a 4. ábrán is látható. Az innen érkező „friss levegő” az alsó mérési szint (0,5 m) adataiban is megjelenik. A másik kérdés: a táro energiaháztartása.



4. ábra: Mikroklima mérések a Gellért fürdő alagútjában. Középen a 2 m-es mérőoszlop a két Vaisala hőmérséklet-relatív nedvesség mérő műszer árnyékolóval (0,5 m és 2 m), jobbra a Q7-es sugárzásegyenleg-mérő, illetve távolabb a fal hőmérsékletét mérő infra-hőmérő.

A fent futó csövek szállítják a meleg termálvizet (hőforrás).

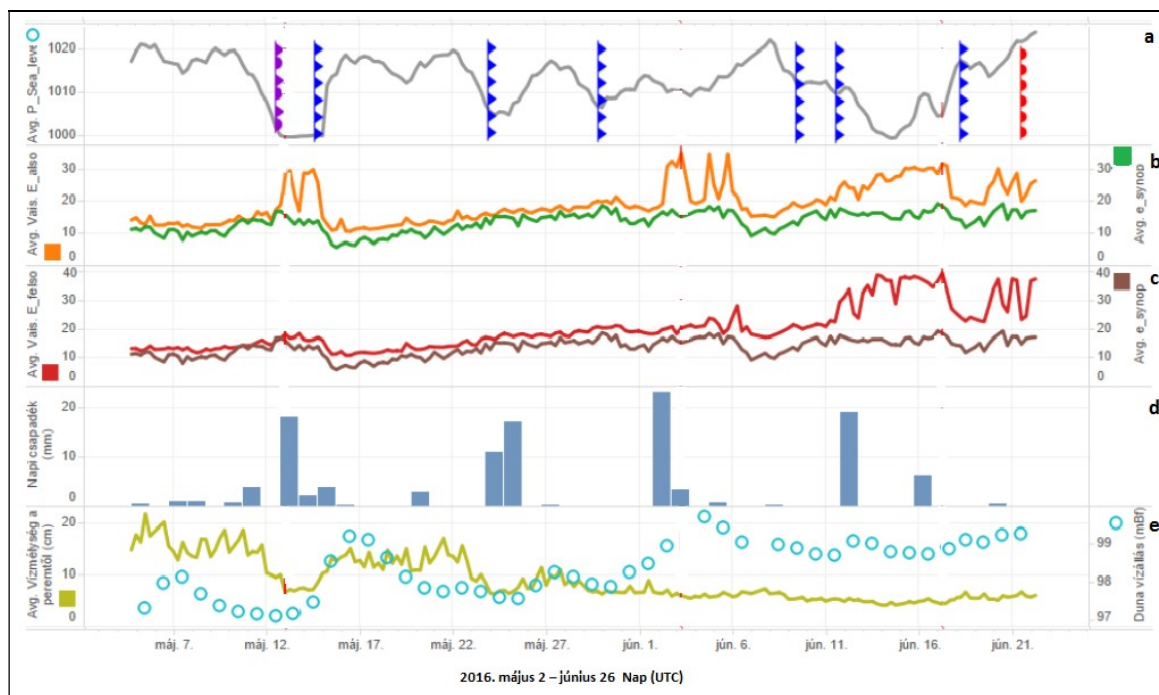
Az „alagút végén a fény” a Gellért fürdő felé mutat.

A felvétel speciális optikával készült (Hegedűs & Csondor, 2016).

A kis képen a Gellért fürdő egyik medencéje.

Elsőként ismerkedjünk meg a kül- és beltéri „időjárás” néhány jellemzőjével! Az 5. ábrán a 2016. május-júniusi adatsorok közül válogattunk. A légnyomás, csapadék és a párányomás a pestszentlőrinci állomás (12843) távirataiból származik, míg a frontokat az időjárási napi jelentések alapján rajzoltuk be. A táro nedves környezetű. A gőznyomás adatok követik a külső levegő változásait, de magasabbak annál. A zomb-nál elhelyezett „vízmerce” két időszakban mutatott a peremhez közeli értéket. Május közepén egy-két napig, illetve június elejétől, amikor a Duna magas vízállása miatt többé-kevésbé folyamatosan jutott víz a csatornába. Mindez jól követhető a gőznyomás adatokban. Az alsó szint (0,5 m) gőznyomása

jól reagál a vízfolyásra (növekvő értékek), illetve a szellőztetésre. Annak leállása növekvő vízgőztartalommal jár. A táró tetején, ahol a melegvíz-csövek futnak, a nedvességtartalom a hosszú vizes periódusban (június második fele) jól láthatóan növekszik (a meleg nedves levegő a könnyebb). Természetesen a magasabb hőmérséklet miatt (összevetve a 0,5 m-es szinttel) az itteni relatív nedvesség a kisebb. A csapadéktevékenység, ahogy várható, nincs hatással a beltéri mikroklímára.



5. ábra: A kül- és beltéri (Gellért-táró) levegő néhány jellemzője 2016. május-június.  
a) a tengerszinti légnyomás (Budapest-Pestszentlőrinc, 12843) és a frontátvonulások ideje és típusa;  
b) a levegő párányomása a táróban 0,5 m-en (narancssárga) és a szabadban (zöld);  
c) a levegő párányomása a táróban 2 m-en (piros) és a szabadban (barna, ua. érték mint előbb), a nagyobb belső gőznyomási értékek miatt itt a skála más mint a b panelon; d) napi csapadék, e) a Duna vízállása, illetve a zomp vízszintje (peremtől vett távolság).

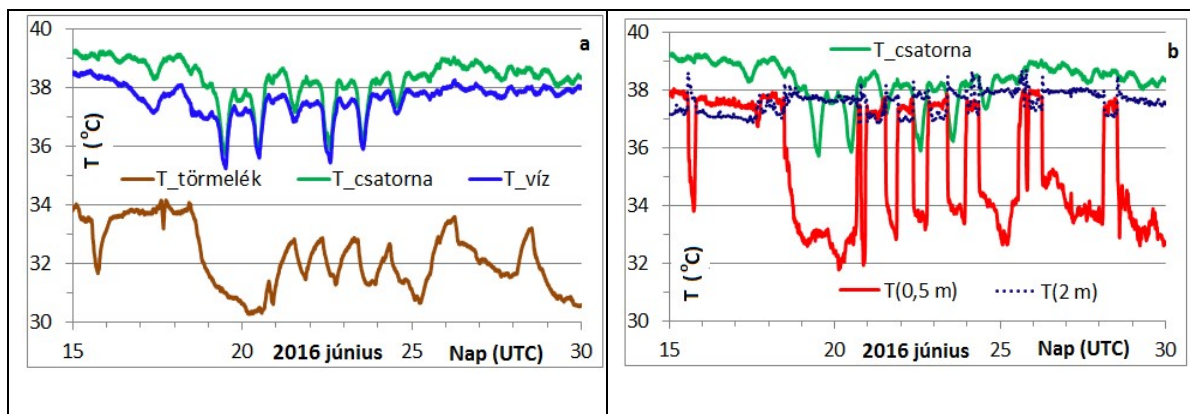
Nézzük meg részletesebben – egy kéthetes időszakban – a táró hőmérsékleti szerkezetét (6. ábra)! A hőmérsékletet, ahogy említettük, két szinten (0,5 m és 2 m) illetve a táró alján három helyen mértük: a törmelékben ( $T_{\text{törmelék}}$ ), a csatornában ( $T_{\text{csatorna}}$ ) és a zomp alján kb. 30 cm mélyen ( $T_{\text{víz}}$ ). A vizsgált időszakban (2016. június 15–30.) a Duna magas vízállása miatt víz folyt a csatornában, ami a zomp és a csatornabeli hőmérséklet közös futásából is látszik. Érdekes, hogy a csatorna vízhőmérséklete a melegebb (az eltérés kívül esik a mérési bizonytalanságon). Jól látszik a ventiláció hatása is a léghőmérsékleti adatokban. Amikor nincs légmozgás, a két szint (0,5 m és 2 m) hőmérséklete szinte együtt fut. A légcserre fel- és lefutó ága követhető a törmelékben végzett méréseken is. Érdekesek a zomp és a csatorna hőmérsékleti adataiban megjelenő hirtelen ugrások. Ezek részben visszatükröződnek a léghőmérséklet adatokban, de nem minden esetben követik azokat. Lehet, hogy a szellőztetés dinamikája mellett egyéb, hidrogeológiai okok is közrejátszanak. Ennek vizsgálata a közeli jövő feladata. Ehhez adottak a  $\text{CO}_2$  mérések, a zomp-ban elhelyezett hőáram-mérő adatai, s a hidrogeológus kollégák szaktudása.

Ahogy az Andokban, úgy a táróban is vizsgáltuk az energiamérleget. Első közelítésként a hosszuhullámú sugárzási egyenleggel foglalkozunk ( $Rn_{\text{táró}}$ ). A fűtőcsövek mint hőforrás ( $T(2\text{ m})$ ) működnek. A hőt a táró alja nyeli el, majd vezeti a kőzetbe, de mint minden test adott hőmérsékleten kisugároz. Más hőszállítással pl. párolgás, szenzibilis hőáram –



molekuláris diffúzió, talaj-légkör hővezetés, egyelőre nem foglalkozunk. A sugárzásegyenleg Stefan–Boltzmann-törvény alapján számszerűsíthető. Az emisszivitást ( $\varepsilon$ ) 1-nek vettük. A Q7-es sugárzás egyenlegmérőt 0,6 m magasságban a zsomp felett helyeztük el, de más felszínt (csatorna, törmelék,) is lát. E három felszíntípust a következő súlyozással ( $s$ ) vettük figyelembe: zsomb –  $s_1 = 1,3$ ; csatorna –  $s_2 = 1,0$ ; törmelék –  $s_3 = 1,3$ . A hosszuhullámú sugárzási mérleg:

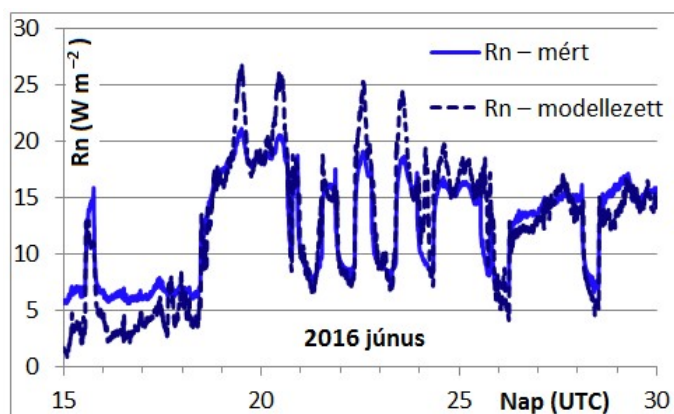
$$Rn_{\text{tároló}} = \sigma [T^4(2\text{m}) - (s_1 \cdot T_{\text{víz}}^4 + s_2 \cdot T_{\text{csatorna}}^4 + s_3 \cdot T_{\text{törmelék}}^4) / (s_1 + s_2 + s_3)].$$



6. ábra: Hőmérséklet-mérések a Gellért-táróban (2016. június 15–30.)

a) Hőmérséklet-mérés a Gellért-táró alján a zsomb-ban ( $T_{\text{víz}}$ ), a csatornában ( $T_{\text{csatorna}}$ ) és a törmelékben a sín mellett ( $T_{\text{törmelék}}$ ), b) a két Vaisala-szenzor hőmérsékleti adatai (0,5 m; 2 m) és a csatornában mért hőmérséklet ( $T_{\text{csatorna}}$ ).

A modell meglepően jól működik (7. ábra). Amikor a zsomp alja és a fent futó csövek között kicsi a hőmérsékletkülönbség, a mért és a modellezett energiamérleg kis értékű,  $5 \text{ W m}^{-2}$  körüli, míg ha a hőmérsékletkülönbség nagy (ventiláció) a sugárzási egyenleg  $15 \text{ W m}^{-2}$  feletti. A fent futó csövekből kisugárzó hő melegíti a táró alját. A fal hőmérsékletében (itt nem közlünk ábrát) csak kis változások vannak.



7. ábra: A mért (Q7 szenzor) és a modellezett hosszuhullámú sugárzási egyenleg a táróban (2016. június 15–30.).

Modellünk nehezen követi a hirtelen hőmérsékletváltozásokat (a víz, illetve a törmelék hőmérséklet-csökkenése). Ilyenkor túlbecsüli a táró aljára jutó energiát (lásd a kiugró csúcsokat a modellben). Megjegyezzük, hogy ilyen esetekben a párolgás hőelvonása teheti zárttá a táró aljának az energiaháztartását. E kérdés vizsgálata a közeli jövő feladata, ahogyan a talajba jutó hőáram és a  $\text{CO}_2$  profilok elemzése is. A következő mérési program 2016 szept-

temberében indul. Ekkor már nem okoz problémát a Duna magas vízállása. Célunk a zompból a csatornába szivattyúzott karsztvízből képződő üledék fejlődésének nyomon követése, a környezeti állapotjelzők (víz, talaj, levegő) mérése. *Ide is várjuk az érdeklődő diákokat.*

## Összefoglaló megjegyzések

Az ELTE Meteorológiai Tanszékén kialakított mikrometeorológiai műszer-együttessel két érdekes helyszínen végeztünk méréseket és határoztuk meg a felszín energiaháztartását.

A Száraz-Andokban 5800 m-es magasságban mértük a globálsugárzást és a sugárzás mérleget 2016 februárjában. Számszerűsítettük a talaj felső 35 cm-es rétegének energiaforgalmát. A félórás sugárzás egyenleg a déli órákban elérheti a  $800 \text{ W m}^{-2}$  értéket, míg a talajba jutó hőáram a  $100 \text{ W m}^{-2}$ -t nappal és  $-50 \text{ W m}^{-2}$ -t éjjel. A rendelkezésre álló energia túlnyomó része szenzibilis hőszállításra fordítódik. Érdekes volt látni a felszín  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ -ot is elérő napi hőingását. (A Baktérítő közelében vagyunk.) „Jó idő volt” 2016. február harmadik pentádjában. Éjjel sem csökkent jelentősen a hőmérséklet  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  alá, s a szélsébség sem haladta meg a  $8 \text{ m s}^{-1}$ -os értéket. Méréseink segítik a több éve folyó talaj- és léghőmérséklet mérések értelmezését, s rámutatnak a hosszú távú mikrometeorológiai mérések megvalósíthatóságára. *Az áramellátás biztosítása is megoldható (napelem, kis szélgenerátor).*

A másik mérési program a Gellért-táróban folyt. Vizsgálataink alapinformációt szolgáltatnak egy szellőztetett, mesterséges hőforrással rendelkező belső térről; hozzájárulnak a hipogén karsztosodási folyamatok mikroklimatikus hátterének megértéséhez. A három-hónapos folyamatos mérések alapján számszerűsítettük a táró hőmérsékleti viszonyait és energiaháztartását. Egyszerű sugárzási modellünk megbízható eredményeket szolgáltatott. Ezt kell majd kibővíteni a párolgás és a hővezetés figyelembevételével. Ehhez a mérési adatok rendelkezésre állnak, s a légmozgás (ventiláció) is számszerűsíthető.

Mindkét bemutatott kutatási program sok érdekességet, tudományos kalandot rejteget, s diákköri dolgozatok kiindulópontja lehet.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak az OTKA NK101356 és a GINOP-2.3.2-15-2016-00007 program támogatásáért, amelyek lehetőséget teremtenek korszerű mikrometeorológiai mérésekre és diákköri témák kiírására. Az Atacama Expedíció segítette a pilótanélküli eszközökkel való magashegyi repülés lehetőségeinek vizsgálatát. Köszönetet mondunk mindkét mérési program résztvevőinek. A talaj fizikai sajátosságainak meghatározásáért *Szalai Zoltánt* (ELTE), a talajba jutó hőáram méréséhez nyújtott segítségért pedig *Nagy Zoltánt* (OMSZ) illeti elismerés. Nem feledkezhetünk meg a Gellért-fürdő munkatársairól sem, akik mindenben segítették a táróban végzett munkánkat.

## Hivatkozások

*atacama.expedicio.eu/hu* – Magyar Száraz Andok Kutatási Program.

Bodor, P., Anda, D., Müller, I., Óváry, M., Jurecska, L., Horváth, Á., Mádl-Szőnyi, J., 2016: In situ examination of changes of physicochemical parameters along a canalized outflow of a thermal spring. Manuscript.

Borsodi, A-K., Knáb, M., Krett, G., Makk, J., Márialigeti, K., Erőss, A., Mádl-Szőnyi, J., 2012: Biofilm Bacterial Communities Inhabiting the Cave Walls of the Buda Thermal Karst System, Hungary. *Geomicrobiol. J.*, 29(7): 611–627.

Erőss, A., 2010: Characterization of fluids and evaluation of their effects on karst development at the Rózsadomb and Gellért Hill, Buda Thermal Karst. PhD thesis. ELTE, Dept. of Physical and Applied Geology. Budapest, Hungary. 171p.

- Favier, V., Wagnon, P., Chazarin, J.-P., Maisincho, L., Coudrain, A., 2004: One-year measurements of surface heat budget on the ablation zone of Antizana Glacier 15, Ecuadorian Andes. *J. Geophys. Res.*, 109: D18105. doi:10.1029/2003JD004359.
- Goldscheider, N., Mádl-Szőnyi, J., Erőss, A., Schill, E., 2010: Review: Thermal water resources in carbonate rock aquifers. *Hydrogeol. J.*, 18: 1303–1318.
- Hegedűs, A., Csondor, K., 2016: OTKA projekt beszámoló. Kézirat.
- Kampfa, S.K., Tylerb, S.W., Cristián A. Ortizc, C.Á., Muñozc, J.F., Adkinsd, P.L., 2005: Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile. *J Hydrol.*, 310: 236–252.
- Leél-Őssy, Sz., 2011: A Budai Vár-barlang és környezetének földtani viszonyai. In: *A Budai Vár-barlangra vonatkozó tudományos és történeti ismeretek összegzése*. A Duna-Ipoly Nemzeti Park Igazgatóság és a Budavári Önkormányzat megbízásából készítette a DIR Kft, Budapest, 5–50.
- Liu, S., Lu, L., Mao, D., Jia, L., 2007: Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions. European Geosciences Union*, 11(2): 769–783.
- Mari, L., Nagy, B., Heiling, Zs, Nemerkenyi, Zs., 2014: Pszeudokarszt a Száraz-Andokban? – az Ojos del Salado olvadásához köthető felszinformái. *Karsztfelődés*, XIX: 231–241.
- Mádlné Szőnyi, J., 2012: Detailed research Plan to OTKA NK 101356. Evaluation of hypogenic karstification focusing on microbially mediated processes – interdisciplinary research. Manuscript OTKA Project. 10p.
- Mádl-Szőnyi, J., Tóth, Á., 2015: Basin scale conceptual groundwater flow model for an unconfined and confined thick carbonate region. *Hydrogeol. J.*, 23: 1359–1380.
- Nagy, B., 2016: Adatvadászok: Ojos del Salado 3.0. *Földgömb*, 34(303): 20–34.
- Nagy, B., Mari, L., Kovács, J., Nemerkenyi, Zs., Heiling, Zs., 2014: Adatok a magashegyi sivatag felszíne alól – avagy víz és jég a Föld legszárazabb magashegységén, az Ojos del Saladón. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 25: 123–128.
- Nagy B., Kovács J., Mari L., Ignéczi Á., Szalai Z., Timár G., 2016: A krioszféra peremén: az aktív réteg vizsgálata az Ojos del Salado magashegyi sivatagában (Száraz-Andok, Chile). *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 27: 112–118.
- Nishida, K., Nemani, R.R., Running, S.W., Glassy, J.M., 2003: An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *J. Geophys. Res.*, 108: D9, 4270, doi:10.1029/2002JD002062.
- Oerlemans, J., Tijm-Reijmer, C.H. (eds.), 2004: Automatic Weather Stations on Glaciers Lessons to be learned. Extended abstracts. Workshop, 28–31 March 2004, Pontresina (Switzerland), Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht, Utrecht University, The Netherlands, 116p.
- Pogány, A., Weidinger, T., Bozóki, Z., Mohácsi, Á., Bienkowski, J., Józefczik, D., Eredics, A., Bordás, Á., Gyöngyösi, A.Z., Horváth, L., Szabó, G., 2012: Application of a novel photoacoustic instrument for ammonia concentration and flux monitoring above agricultural landscape – results of a field measurement campaign in Choryń, Poland. *Időjárás*, 116: 93–107.
- Ruiz, J.J., Saulo, C., S-Paegle, J.N., 2010: WRF Model Sensitivity to Choice of Parameterization over South America: Validation against Surface Variables. *Mont. Weather Rev.*, 138: 3342–3355.
- Schelde, K., Cellier, P., Bertolini, T., Dalgaard, T., Weidinger, T., Theobald, M.R., Olesen, J.E., 2012: Spatial and temporal variability of nitrous oxide emissions in a mixed farming landscape of Denmark. *Biogeosciences*, 9(8): 2989–3002.
- Weidinger, T., Ács, F., Mészáros, R., Barcza, Z., 1999: Energy budget components in a forest clearcut: analysis of measurements results. *Időjárás*, 103: 145–160.
- Weidinger, T., Istenes, Z., Hargitai, H., Tepliczky, I., Bérczi, Sz., 2009: Micro-meteorological station at the Mars analog field work Utah. April, 2008. 40th Lunar and Planetary Science Conference, 1282.pdf.