

LÉGKÖRI ÜVEGHÁZHATÁSÚ GÁZOKKAL KAPCSOLATOS KUTATÁSOK AZ ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI SZOLGÁLATNÁL

ATMOSPHERIC GREENHOUSE GAS RESEARCH AT HUNGARIAN METEOROLOGICAL SERVICE

Haszpra László*

Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, 9400 Sopron, Csatka Endre u. 6–8. haszpra.l@gmail.com

Összefoglalás. A tanulmány az Országos Meteorológiai Szolgálat egyik nemzetközileg is kiemelkedően sikeres és termékeny kutatási területének négy évtizedét tekinti át a kezdetektől napjainkig.

Abstract. The paper reviews the four decades of one of the Hungarian Meteorological Service's internationally successful research fields from the beginning to present.

Bevezetés. Az ókori görögök számára a levegő tovább már nem bontható őselem volt. Ma már tudjuk, hogy számtalan gáz és mikroszkopikus részecske elegye. A fő gázkomponenseken (nitrogén, oxigén, argon) kívül a többi gáz csak nyomnyi mennyiségben van jelen a légkörben, együttesen sem teszik ki a levegő 0,05 % térfogatszázalékát, hatásuk mégis meghatározó a Föld környezeti viszonyai szempontjából. Egy részük fizikai tulajdonságaiknál fogva befolyásolja a légkörön keresztüli energiaátvitelt, így meghatározó szerepük van az éghajlat alakításában, más részük kémiai, biokémiai folyamatok révén a bioszféra létfeltételeit határozza meg, de kölcsönhatásba léphetnek az élettelen környezettel is. Az ipari forradalom kibontakozásával számtalan emberi forrás jött létre, melyek összességükben olyan mennyiségben juttatnak gázokat és részecskéket a levegőbe, ami már számottevően módosítja a természetes nyomanyag-koncentrációkat. Mivel a bioszféra az evolúció során a természetes viszonyokhoz alkalmazkodott, a levegő összetételének emberi eredetű gyors módosulása az élő környezet számára hátrányos, bizonyos anyagok (pl. korrózió anyagok) pedig az épített környezetet is károsítják. A változások okának és hatásának vizsgálata tehát létfeltételeink alakulása szempontjából alapvető fontosságú.

A 19. század elején már világos volt, hogy a Nappól érkező energia nem elegendő ahhoz, hogy a Földet a tapasztalt hőmérsékleten tartsa. Joseph Fourier (1768–1830) feltételezte, hogy a légkör valamiképpen lassítja a hő távozását bolygónkról, amely így melegebb, mint légkör nélkül lenne (Fourier, 1827). Néhány évtizeddel később már sikerült azonosítani az első olyan anyagokat (vízgőz, szén-dioxid), amelyek elnyelik a hőmérsékleti kisugárzást (Foote, 1856; Tyndall, 1863) és részben visszasugározzák a felszín felé, ezzel a Nap mellett mintegy kiegészítő energiaforrásként szolgálva. Bár a légkörnek a kertészetek üvegházaihoz való hasonlítása fizikailag helytelen, a hőmérsékleti sugárzást elnyelő gázok az üvegházhatású gáz elnevezést kapták. A 19. század végén már felmerült, hogy a széntüzelés következtében a szén-dioxid a légkörben felhalmozódhat és ezzel globális éghajlatváltozást okozhat (Arrhenius, 1896). A kor tudományos ismeretei mellett azonban feltételezték, hogy ez nagyon lassú folyamat, évszázadok telhetnek el

az észrevehető változások megjelenéséig. Az 1950-es években, a légköri nukleáris robbantások utóhatásainak vizsgálata során derült csak ki, hogy ez a felhalmozódás sokkal gyorsabb, és feltétlenül foglalkozni kell vele (Revelle and Suess, 1957). Egy gyors, globális éghajlatváltozás kockázatát felismerve az 1960-as években a Meteorológiai Világszervezet (WMO) a globális háttér-levegőszennyezettség-mérő hálózat alapállomásai számára már feladattá tette a légköri szén-dioxid koncentráció folyamatos nyomon követését (WMO, 1974). Ma pedig már az üvegházhatású gázok mennyiségét ugyanolyan mérendő alapvető éghajlati jellemzőnek (essential climate variable) tekinti, mint például a légnyomást (Bojinski et al., 2014; <https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables>).

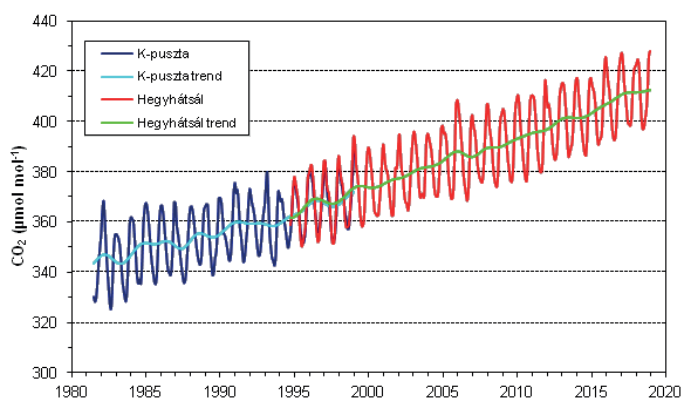
A kezdetek. Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) Központi Légkörfizikai Intézetében folyó nemzetközileg is sikeres levegőkémiai kutatásoknak köszönhető, hogy 1978-tól több mint egy évtizeden keresztül a WMO az OMSZ-nál, Mészáros Ernő vezetésével az OMSZ kutatóira építve tartotta háttér-levegőszennyezettség-mérésekkel foglalkozó továbbképző tanfolyamait (Mészáros, 1978). A tanfolyam szemléltető eszközeit a WMO biztosította. Mivel a légkör szén-dioxid tartalmának mérése ekkor már beletartozott a háttér-levegőszennyezettség-mérő állomások mérési programjába, így az oktatáshoz az OMSZ-nak egy Siemens Ultramat 3 típusú szén-dioxid mérő berendezést is a rendelkezésére bocsátottak. Annak érdekében, hogy a légkörkutatói szempontból különösen értékes eszköz ne csak a tanfolyamok ideje alatt hasznosuljon, a műszer 1981-ben az akkor létesült K-pusztai háttér-levegőszennyezettség-mérő állomásra került, ahol az év június 5-től folyamatos méréseket végzett (1. ábra). Ezzel Magyarország a Német Szövetségi Köztársaság (5 mérőállomás) és Olaszország (1 mérőállomás) után a harmadik olyan országgá vált Európában, amely bekapcsolódott a légköri üvegházhatású gázok mérésébe, kutatásába.

Az aktív vegetáció közelsége, ciklikus fotoszintézise/respirációja jelentős napon és éven belüli ingadozást okoz a szén-dioxid koncentrációban, ami nehezíti a hosszabb távú tendenciák felismerését. Az 1980-as évek végéig a nemzetközi üvegházgáz-kutatás a távoli óceáni

*Az OMSZ munkatársa volt 1979–2018 között.



1. ábra: A WMO által adományozott Siemens Ultramat 3 típusú szén-dioxid mérő műszer az OMSZ K-pusztai háttérlevegőszennyezettség-mérő állomásán



2. ábra: A szén-dioxid koncentráció alakulása K-pusztán és Hegyhátsálon a kora délutáni órákban (12-16 h) a 10 méteres magasságban végzett mérések szerint

szigetekre, sarkvidéki területekre, magas hegycsúcsokra telepített, mindenféle közvetlen emberi vagy természetes szén-dioxid forrástól távol lévő mérőállomások adataira támaszkodott, kerülve a bioszferikus „zaj” okozta módszertani problémákat. Kiderült azonban, hogy a korábban egyensúlyban lévőnek feltételezett bioszféra tényleges szén-dioxid forgalmának ismerete nélkül nem határozható meg a légkör szén-dioxid mérlege (Tans *et al.*, 1989). Ehhez viszont folyamatosan végzett mérésekre volt szük-

ség a vegetációval borított területeken is, ami hirtelen felértékelte az akkor még csak néhány helyen létező ilyen mérést, egyebek között az OMSZ által K-pusztán végzett méréseket is. Ettől az időszaktól kezdve juthattak el a korábban kevésbé értékesnek vélt hazai kutatási eredmények a vezető nemzetközi folyóiratokba, nemzetközi konferenciákra (Haszpra, 1995).

Az Amerikai Egyesült Államok Országos Óceán- és Légkörkutató Hivatala (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA) az 1960-as évek végétől kezdte kiépíteni globális üvegházgáz mérőhálózatát, amelyet az új tudományos ismeretek alapján az 1990-es évek elején a kontinentális területekre is igyekezett kiterjeszteni. Ehhez megfelelő partnerként jött szóba Európában az ilyen mérésekkel már régóta foglalkozó magyar Országos Meteorológiai Szolgálat. Az együttműködés anyagi hátterét pedig a magyarországi rendszerváltás után, 1989-ben létrehozott Magyar-Amerikai Tudományos és Technológiai Közös Alap biztosította.

A virágkor. A vegetációval borított területeken a mérések területi reprezentativitásának növeléséhez indokolt a méréseket minél nagyobb felszín feletti magasságban végezni. A NOAA 1992-ben Észak-Karolinában hozta létre az első ilyen állomást egy rádióadó-torony felműszerzésével (Bakwin *et al.*, 1995). Az amerikai együttműködésben hasonló magastornyos mérőhely kialakítása volt a cél Magyarországon is. K-pusztán nem volt mód magas mérőtorony építésére, és anyagi okokból egyébként is célszerűbbnek látszott az országban már létező magas tornyokat megvizsgálni abból a szempontból, hogy alkalmasak-e üvegházgáz monitoring céljára. A környezeti adottságok miatt a választás a Magyar Műsorszóró Vállalat (ma: Antenna Hungária Rt.) 117 m magas hegyhátsáli adótornyára esett, ahol a mérések 1993-ban indultak meg (Haszpra, 1993). K-pusztán az ottani eszközök elhasználódásáig, 1999 nyaráig folytak szén-dioxid koncentráció mérések. Az 5 éven át tartó párhuzamos mérésekből kiderült, hogy a koradélutáni órák koncentráció adatait tekintve, a légkör megfelelő átkeveredésének köszönhetően, a két mérőhely adatsora jó közelítéssel összeilleszthető (2. ábra).

Az amerikai együttműködésnek köszönhetően a hegyhátsáli állomás mindmáig stabil tagja a NOAA globális mérőhálózatának, melynek állomásain hetente vesznek levegőmintákat. A NOAA mintegy 50 mérőhelyből álló globális hálózatában Hegyhátsál képviseli a kontinentális Európát (3. ábra), ezért kiemelkedő jelentősége van a globális és regionális üvegházgáz-mérleg számításokban. A levegőmintákat a NOAA boulderi (Colorado, USA.) központi laboratóriuma számos nyomgázra elemzi (Haszpra, 2018), és a mérési adatok a magyar kutatóknak is a rendelkezésükre állnak.

1997-től az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékének közreműködésével, részben japán együttműködésben, megindult a felszín/bioszféra és a légkör közötti szén-dioxid forgalom közvetlen mérése (Barcza *et al.*, 2003; Barcza *et al.*, 2020), majd a 2000-es évek elejétől Európai Unió kutatási projektek (CarboEurope, CarboEurope-IP) keretében a metán, a dinitrogén-oxid és a kén-hexafluorid folyamatos mérése is. A komoly összegű

uniós kutatástámogatások 2001–2008 között rendszeres repülőgépes méréseket is lehetővé tettek a torony fölött 3000 m-es magasságig.

A CAATER projekt keretében, 2002 őszén, a Német Repülési Központ (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) Falcon 20E kutatórepülőgépe is programjába iktatta a mérőállomást, méréseket végezve a felszín közelétől a tropopauzáig (4. ábra).

Az OMSZ hazai kutatási együttműködéseinek bővülésével kapcsolódott be a munkába a Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézete (MTA ATOMKI) a légköri szén-dioxid fosszilis eredetű hányadának meghatározását lehetővé tevő radiokarbon (^{14}C) mérésekkel (Major *et al.*, 2018), illetve az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont (MTA CSFK) szén-monoxid koncentráció, továbbá felszín-légkör dinitrogén-oxid anyagáram mérési programmal (Haszpra *et al.*, 2018). A mérőállomás teljes mérési programja a fennállásának 25. évfordulója alkalmából megjelent tanulmányban, a Légkör 2018. évi 2. számában olvasható (Haszpra, 2018).

A légkör üvegházhatásának erősödése és az ez által gerjesztett éghajlatváltozás globális probléma, ezért a hazai kutatások is a nemzetközi kutatási trendekbe illeszkednek. A koncentrációk követése az éghajlati rendszerben működő visszacsatolásokat próbálja minél pontosabban feltárni, és ugyanezt a célt szolgálják a bioszféra és a légkör közötti anyagáram-mérések is. Ezekre a mérésekre támaszkodnak a természetes és emberi kibocsátás meghatározására szolgáló számítások is, amelyek a belátható jövőben már elsőbbséget élvezhetnek a statisztikai alapú számításokkal szemben, legalábbis a mérőállomásokkal egyre jobban lefedett Európai Unióban (Pinty *et al.*, 2019). A természetes változékonyság miatt hosszú adatsorokra van szükség ahhoz, hogy a véletlen ingadozások mögött a tendenciák, összefüggések feltárhatóvá válhassanak. Ezért monitoring állomásokat csak évtizedes időtartamokra érdemes létesíteni. Az adatsorok értéke a hosszukkal exponenciálisan nő. A hegyhátsági adatsor Európa második leghosszabb adatsora, a kontinentális (nem óceáni, nem arktikus, nem magashegyi) területeken pedig messze a leghosszabb, ezért tudományos értéke kiemelkedően magas. Az adatsorok növekvő hossza egyre újabb és komplexebb kutatásokra ad lehetőséget, ezért feltételezhető, hogy egyre több tanulmányhoz nyújtanak majd alapot.

A kutatások során eddig a hazai egyetemeken, kutatóhelyeken feltucatnyi PhD értekezés és egy akadémiai doktori értekezés született a mérések eredményeiből, illetve azokra alapítva. A 2000-es évek eleje óta mintegy 40 olyan tudományos publikáció készült, amely vezető nemzetközi folyóiratban jelent meg, és amely kifejezetten a hegyhátsági mérésekre épült. A mérési adatok döntő része bekerül a WMO (<https://gaw.kishou.go.jp/>) és a NOAA (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/obspack/>) nyilvános adatbázisába, így bárki által felhasználhatók. A hegyhátsági mérések beépülnek azokba a globális modellekre alapított kutatásokba is, ahol az egyes résztvevő mérőállomások nevesítésére nagy számuk miatt már nincs mód. A WMO adatbázisáról nincs könnyen hozzáférhető statisztikai adat, de a NOAA ObsPack adatbázisát átlagosan 280-szor töltik le évente.

A globális éghajlatkutatás, az éghajlatvédelmi stratégiák, az IPCC és a WMO jelentései döntő mértékben a globáli-



CIB	(Centro de Investigación de la Baja Atmosfera), mediterrán	2009–
HBP	(Hohenpeissenberg), hegyi	2006–
HUN	(Hegyhátsál) kontinentális	1993–
LMP	(Lampedusa), mediterrán	2006–
MHD	(Mace Head), óceáni	1991–
OXK	(Ochsenkopf) hegyi	2003–
PAL	(Pallas-Sammaltunturi), arktikus	2001–

3. ábra: A NOAA európai mérőállomásai, jellegük és működésük kezdete. Lampedusán 1992-től 2014-ig az ENEA végzett méréseket. A hegyhátsági mérőállomásánál hosszabb vagy hasonló hosszúságú adatsorral Európában három hegyi (Schauinsland, Németország, 1971–; Monte Cimone, Olaszország, 1979–; Plateau Rosa, Olaszország, 1993–) és egy arktikus (Teriberka, Oroszország, 1988–) WMO GAW mérőállomás rendelkezik. A 2000 utáni időszakban, különösen az Európai Unió által szorgalmazott, az európai kibocsátási adatok ellenőrzésére is szolgáló ICOS (Integrated Carbon Observation System) mérőhálózat kiépülése során több mint egy tucatnyi új állomás létesült, köztük számos kontinentális mérőhely is.

san homogén NOAA üvegházgáz-mérőhálózatra épülnek, amelyet az egyéb WMO GAW állomások egészítenek ki. A NOAA hálózaton belül a hegyhátsági állomásnak földrajzi elhelyezkedése és kivételesen hosszú adatsora miatt kiemelt szerepe van. A globális mérőhálózat munkája, az adatokból leszűrhető összefüggések nélkül az éghajlati modellek csupán számítógépes játékok lennének, melyeket sem adatokkal táplálni, sem az eredményeiket ellenőrizni nem lehetne.

Epilógus. A földtudományok és a csillagászat területén a korábban a Magyar Tudományos Akadémia, ma az Eötvös Loránd Kutatói Hálózat kutatóintézeteinek szakterülete a Föld magjától a világegyetem határáig



4. ábra: A Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Falcon 20E kutatórepülőgépe a sármelléki repülőtéren 2002. október 3-án, a hegyhátsági mérés előtt (középen a szerzővel)

terjed — történelmi okokból kihagyva a földfelszín feletti néhány tíz kilométert, a légkört. Ez az Országos Meteorológiai Intézet (1970-től: Szolgálat) kutatási területe lett. A kutatások elsősorban a hajdani (Központi) Légekfizikai Intézetben folytak, de az OMSZ más intézetei is jelentős kutatási teljesítményt mondhattak magukénak. A Szolgálat létszáma azonban az elmúlt évtizedekben kevesebb, mint ötödére zsugorodott, és ezt elsősorban a kutatási tevékenység sínylette meg. Stílszerűen: akár esik, akár fúj, az operatív szolgáltatásoknak működniük kell. Ez a leépítési folyamat a levegőkémiai, benne az üvegházhatású gázokkal kapcsolatos kutatásokat sem kerülte el. 2020 őszén az OMSZ a hegyhátsági mérőállomás fenntartásáról is lemondott. A mérőállomás azonban olyan szinten beépült a nemzetközi tudományos kutatásba, adatsora olyan tudományos értéket képvisel, hogy fenntartása érdekében jelentős nemzetközi nyomás nehezedik Magyarországra. Ennek következtében a mérőhely, ha nem is az OMSZ égisze alatt, várhatóan még hosszú ideig szolgáltat adatokat, és reméljük, ezeket nemcsak külföldi kutatók fogják hasznosítani.

Irodalom

Arrhenius, S., 1896: On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science Series* 5 41, 237–276.

Bakwin, P. S., Tans, P. P., Zhao, C., Ussler, W. I., Quesnell, E., 1995: Measurements of carbon dioxide on a very tall tower. *Tellus* 47B, 535–549.

Barcza, Z., Haszpra, L., Kondo, H., Saigusa, N., Yamamoto, S., Bartholy, J., 2003: Carbon exchange of grass in Hungary. *Tellus* 55B, 187–196.

Barcza, Z., Kern, A., Davis, K. J., Haszpra, L., 2020: Analysis of the 21-years long carbon dioxide flux dataset from a Central European tall tower site. *Agricultural and Forest Meteorology* 290, 108027, doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108027

Bojinski, S., Verstraete, M., Peterson, T. C., Richter, C., Simmons, A., Zemp, M., 2014: The concept of Essential Climate Variables in support of climate research, applications, and policy. *Bulletin of the American Meteorological Society* 95, 1431–1443., doi: 10.1175/

bams-d-13-00047.1

Foote, E., 1856: Circumstances affecting the heat of the Sun's rays. *The American Journal of Science and Arts* 32, 382–383.

Fourier, J. B. J., 1827: Mémoires sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France* VII, 570–604.

Haszpra, L., 1993: NOAA mérőhely Magyarországon. *Légekör* 38(4), 14–16.

Haszpra, L., 1995: Carbon dioxide concentration measurements at a rural site in Hungary. *Tellus* 47B, 14–22.

Haszpra, L., 2018: 25 éves a hegyhátsági üvegházgáz mérőállomás. *Légekör* 63, 100–101.

Haszpra, L., Hidy, D., Taligás, T., Barcza, Z., 2018: First results of tall tower based nitrous oxide flux monitoring over an

agricultural region in Central Europe. *Atmospheric Environment* 176, 240–251., doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.12.035

Major, I., Haszpra, L., Rinyu, L., Futó, I., Bihari, Á., Hammer, S., Jull, A. J. T., Molnár, M., 2018: Temporal variation of atmospheric fossil and modern CO₂ excess at a Central European rural tower station between 2008 and 2014. *Radiocarbon* 60, 1285–1299., doi: 10.1017/rdc.2018.79

Mészáros, E., 1978: Background air pollution monitoring. Prepared for the World Meteorological Organization and the United Nations Environment Programme training course. *Institute for Atmospheric Physics of the Meteorological Service of Hungary* (manuscript)

Pinty, B., Ciais, P., Dee, D., Dolman, H., Dowell, M., Engelen, R., Holmlund, K., Janssens-Maenhout, G., Meijer, Y., Palmer, P., Scholze, M., Gon, H. D. v.d., Heimann, M., Juvyns, O., Kentarchos, A., Zunker, H., 2019: An operational anthropogenic CO₂ emissions monitoring & verification support capacity – Needs and high level requirements for in situ measurements. *European Commission Joint Research Centre*, EUR 29817 EN, doi: 10.2760/182790

Revelle, R., Suess, H. E., 1957: Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades. *Tellus* 9, 18–27.

Tans, P. P., Conway, T. J., Nakazawa, T., 1989: Latitudinal distribution of the sources and sinks of atmospheric carbon dioxide derived from surface observations and an atmospheric transport model. *J. of Geophysical Research* 94D, 5151–5172

Tyndall, J., 1863: On radiation through the Earth's atmosphere. *Philosophical Magazine Series* 4 25, 200–206, doi: 10.1080/14786446308643443

WMO, 1974: WMO operational manual for sampling and analysis techniques for chemical constituents in air and precipitation. WMO No. 299