

A légköri szén-dioxid-koncentráció méréseinek újabb eredményei

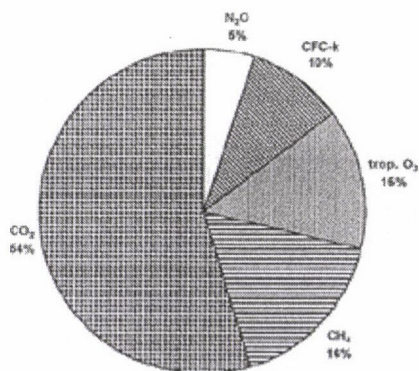
Bolygónk meglehetősen hűvös hely lenne a légkör üvegházhatása nélkül, azaz a nélkül a folyamat nélkül, melynek során a földfelszín infravörös tartományba eső hőmérsékleti kisugárzását a légkör egyes alkotóelemei elnyelik és a felszín felé visszasugározzák. A légkör nélküli Föld -19°C -os becsült átlaghőmérsékletét körülbelül $+15^{\circ}\text{C}$ -ra emelő üvegházhatás mintegy két-harmadáért a vízgőz felelős. Hozzávetőleg 13 billió tonnás légköri mennyiségét az emberiség közvetlenül nem tudja befolyásolni. A többi üvegházhatású gáz mennyisége jóval kisebb, így mennyiségük számottevően módosítható, befolyásolva így a Föld éghajlatát.

A légköri szén-dioxid-koncentráció a múltban

Az 1. ábrán látható, hogy az antropogén eredetű üvegházhatás több mint felét a szén-dioxid (CO_2) adja. A légkör szén-dioxid-tartalmát a közelmúltig kizárólag természetes folyamatok szabályozták. Az elmúlt félmillió évben kémiai folyamatok és a bioszféra fejlődése következtében a CO_2 koncentrációja a jelenlegi szint mintegy tízszereséről, jelentős ingadozásokkal csökkent a mai szint közelébe (Rutten, 1971). A legutóbbi jégkorszak jellemzően 200 ppm-es légköri szén-dioxid kon-

1. ábra

Az emberi eredetű éghajlati kényszer (radiative forcing) megoszlása az egyes üvegház hatású gázok között (Schimel et al., 1996 adatai alapján)



Rovatunk a Központi Környezetvédelmi Alap támogatását élvezve

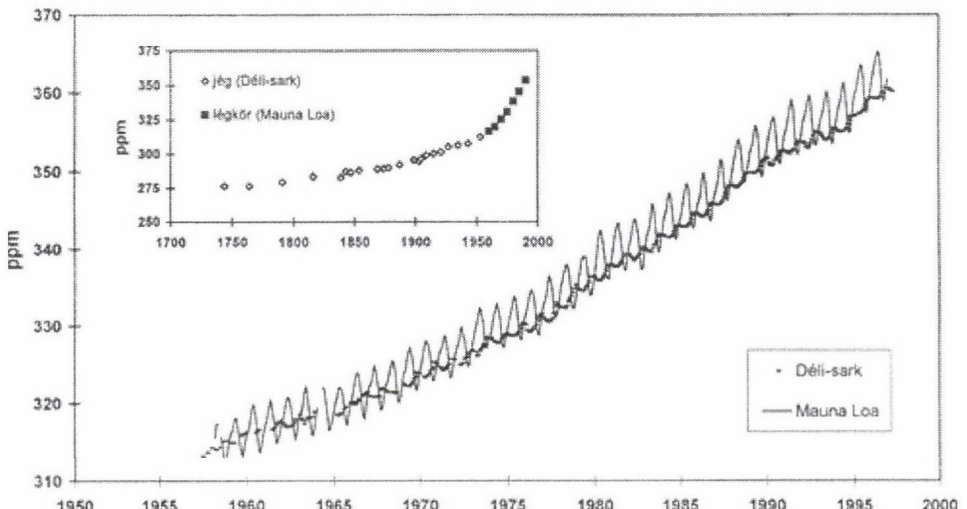
centrációja (helyesebben: térfogati keverési aránya) a pleisztocén végén hozzávetőleg 280 ppm-re nőtt (Barnola et al., 1987). Ezt követően, földtörténeti értelemben csaknem napjainkig, a koncentráció nagyjából állandó maradt (Neftel et al., 1988). Az emberi tevékenység hatása csak a 18. században vált számottevővé (Neftel et al., 1994). Ekkortól egyre nagyobb területeken irtják ki az erdőt, mezőgazdasági művelés alá vonva azokat. Az ipari forradalom kibontakozásával egyre nagyobb mennyiségű szén-dioxid kerül a levegőbe a fosszilis tüzelőanyagok elégetése révén is. Az emberi tevékenység mára jól látható változásokat okozott a légkör CO_2 -tartalmában: napjainkra a koncentráció mintegy 365 ppm-re növekedett (2. ábra).

A légköri szén-dioxid-koncentráció alakulása napjainkban

A légkörben lévő szén-dioxid üvegházhatásával Tyndall angol fizikus már 1861-ban megjelent tanulmányában foglalkozott (Tyndall, 1861). Tyndall elméletét továbbfejlesztve Arrhenius, Nobel-díjas svéd kémikus vetette fel a múlt század végén (Arrhenius, 1896), hogy a fosszilis tüzelőanyagok elégetésekor keletkező, üvegházhatású szén-dioxid a légkörben felhalmozódhat és ezzel éghajlatváltozást okozhat. Közleménye annak idején nem váltott ki különösebb érdeklődést.

A CO_2 légköri felhalmozódására vonatkozó elméletet a mérési módszerek pontatlansága miatt hosszú ideig nem sikerült igazolni. Az 1950-es évek közepén született meg az a nagy pontosságú, éppen a CO_2 üvegházhatásán, azaz infravörös sugárzást elnyelő képességén alapuló mérési eljárás, amelyet mind a mai napig használunk. Az első ilyen berendezéseket az 1957/1958-as Nemzetközi Geofizikai Év során telepítették a Déli-sarkon és a hawaii Mauna Loa Observatóriumban. A légköri CO_2 koncentrációjának

2. ábra



A szén-dioxid légköri térfogati keverési arányának alakulása Neftel (1994), Keeling és Whorf (1994) és Thoning et al. (1994) adatai alapján

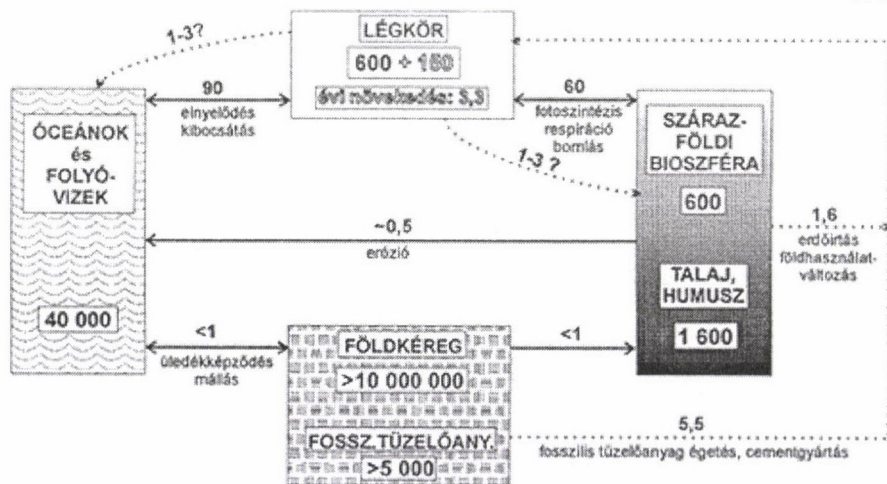
korábbi időszakokra vonatkozó adatai a sarkvidéki jégtakaróba fagyott levegőzárványok elemzéséből származnak (lásd pl. Barnola et al., 1987; Neftel et al., 1988).

A mérések egyértelműen bizonyították a CO₂ légköri felhalmozódását (2. ábra). A 60-as évek végétől, 70-es évek elejétől egyre több helyen kezdtek meg a légköri CO₂ koncentrációjának folyamatos mérését. Ez a mérés kötelező feladatává vált a Meteorológiai Világszervezet háttérlevegő-szennyezettségmérő alapállomásainak (WMO, 1974).

A CO₂ légköri tartózkodási ideje elegendően hosszú ahhoz, hogy többé-kevésbé egyenletesen keveredjen el a Föld teljes troposzférájában. Koncentrációja a forrásterületektől eltekintve mindenütt nagyjából azonos, csekély eltéréssel az antropogén forrásokban bővelkedő északi és a kevésbé szennyezett déli félgömb között. Éppen ezért a mérőállomásokat minden CO₂-forrástól/nyelőtől távoli óceáni szigetekre, magas hegycsúcsokra, sarkvidéki területekre telepítették, hogy ott helyi zavaró hatások nélkül mérhessék a globális légkörben lezajló változásokat. Ezek az állomások regisztrálták is a változásokat, és kimutatták, hogy a légköri szén-dioxid-koncentráció növekedése egészen a közelmúltig egyre gyorsult: 1970 és 1990 között közel ugyanannyit emelkedett, mint az ezt megelőző 100 évben összesen (2. ábra). A növekedés üteme jelenleg kb. 0,4%/év. Ha ez a növekedési ütem fennmaradna, akkor az ipari forradalom kezdete előtti szén-dioxid-szint a jövő század közepére megduplázódna.

A növekedés üteme nem egyenletes és jobban ingadozik, mint az antropogén CO₂-kibocsátás. Az okokról azonban ezek a mérések nem sokat mondtak. Ehhez, a korábbi koncepcióval ellentétben, éppen hogy közelebb kellett menni a potenciális forrásokhoz és nyelőkhöz (vegetációval borított kontinentális területek), valamint meg kellett indítani az izotóp-összetétel méréseket, hogy a fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből származó CO₂ megkülönböztethető legyen a biológiai eredetűtől (Tans, 1991).

3. ábra



A szén/szén-dioxid körforgalom Bolin et al. (1977) és Schiemel et al. (1996) adatai alapján. Az egyes rezervoárok széntartalma Pg C (10^{15} g szén), a fluxusok pedig Pg C/év mértékegységben

Az intenzív ipari tevékenység megjelenéséig a szén-, illetve CO₂-körforgalomban részt vevő szférák (atmoszféra, bioszféra, hidroszféra, litoszféra stb.) nagyjából egyensúlyi állapotban voltak. A bioszféra/talaj és az óceánok által elnyelt, illetve kibocsátott szénmennyiség globálisan, hosszabb időszakra átlagolva, nagyjából kiegyenlítette egymást (3. ábra). Ebbe a kvázi-egyensúlyi állapotba avatkozott be az ember a fosszilis tüzelőanyagok egyre nagyobb mértékű felhasználásával és a természeti környezet átalakításával, az erdőirtásokkal. Bár a légkörbe irányuló antropogén CO₂-fluxus alig 5%-a a légkör-bioszféra-óceán anyagáramnak, ez a viszonylag csekély mennyiség mégis jól érzékelhetően megváltoztatta/megváltoztatja a légkör összetételét. A mérések alapján meglehetősen pontosan ismert az antropogén CO₂-kibocsátás légkörben maradó része (átlagosan kb. 57% — Tans et al., 1990). Az óceánokba, illetve a bioszférába kerülő mennyiségek arányára azonban nincsenek igazán megbízható becslések. Annak ellenére, hogy e területen jó ideje intenzív munka folyik, az eredmények mindmáig ellentmondásosak. Mindenesetre az antropogén kibocsátás ingadozásához képest jelentős ingadozás a légköri koncentráció növekedési ütemében arra utal, hogy a légköri CO₂-koncentráció alakulására, közelebbről egyelőre kevésbé ismert folyamatokon keresztül, a bioszféra és az óceánok jelentős befolyást gyakorolnak. Mivel az óceánok a becslések szerint nem képesek elnyelni a légkörből eltűnő teljes szén-dioxid mennyiséget, ezt valamilyen módon valahol a bioszférának kell felvennie. Ez a rejtélyes nyelő a szakirodalomban a „missing sink” elnevezést kapta.

Az Egyesült Államok Nemzeti Óceán- és Légkörkutató Hivatala, a NOAA a 80-as évek elején kezdte meg globális mérőhálózatának kiépítését. A kezdetben mintegy két tucatnyi, az akkori elveknek megfelelően a potenciális forrásoktól és nyelőktől távol elhelyezett mérőhelyen hetenként vettek levegőmintákat, amelyeket a boulderi (Colorado) központi laboratóriumában elemeztek. A CO₂-koncentráción kívül mérték a metán és a szén-monoxid koncentrációját, valamint a CO₂ szén- és oxigén-izotóp összetételét is.

Az összegyűjtött adatok és az egyre pontosabb globális cirkulációs modellek felhasználásával a 80-as évek végén, 90-es évek elején végzett számítások arra utaltak, hogy a légköri koncentráció változását az antropogén tevékenység mellett a kontinentális részek, elsősorban az északi félgömb mérsékelt égővi területei vezérlik (Tans et al., 1990; Enting és Mansbridge, 1991; Conway et al., 1994; Ciais, 1995). Feltételezhető volt, hogy a jelenség mögött az ezeken a területeken lévő ökológiai rendszerek időben változó viselkedése áll. A folyamatok megismerésére gyors ütemben megkezdődött a kontinentális mérőállomások telepítése. E program keretében létesült valamennyi európai NOAA mérőhely, köztük a magyarországi is (Haszpra, 1993). A globálisan homogén, néhány század ppm pontosságú adatokat tartalmazó NOAA adatbázis ma több, mint 50 mérőhelyről gyűjt adatokat. A kutatók, politikai döntéshozók ma elsősorban erre az adatbázisra támaszkodnak. 1992-ben a NOAA Észak-Karolinában megindította az első hosszű távú, mérőtornyos mérését, amelynek célja a légkör és a bioszféra közötti szén-dioxid-áramlás közvetlen, folyamatos nyomon követése (Bakwin et al., 1995).

Magyarországra 1977-ben került először légköri mérésekre alkalmas szén-dioxid-analizátor a WMO, a Meteorológiai Világszervezet jóvoltából.

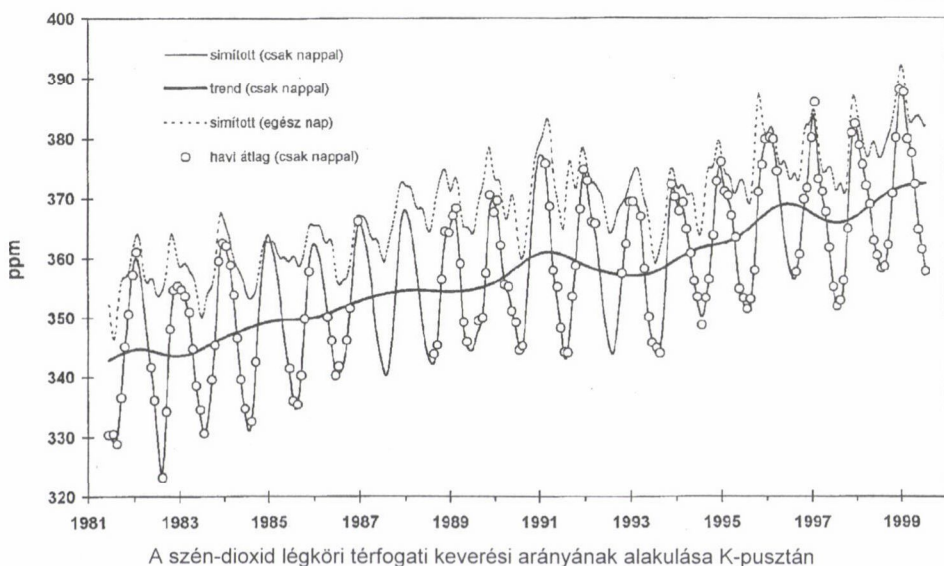
Eredetileg demonstrációs célokat szolgált a WMO által szervezett háttér-levegőszennyezettség mérésekkel foglalkozó nemzetközi tanfolyamokon. A műszer 1981-ben került az Országos Meteorológiai Szolgálat Kiskunságban lévő K-pusztai mérőállomásra (46°58'N, 19°33'E). Ennek köszönhetően ma az egyik leghosszabb mérési adatsort mondhatjuk magunkénak Európában (Haszpra, 1999a). Ráadásul egy olyan földrajzi körzetben, amelyre ma az előzőekben említettek miatt a legnagyobb figyelem irányul.

A K-pusztai adatok hűen követik a globális tendenciát (4. ábra), annak ellenére, hogy a mérőhely a közvetlen antropogén forrásoktól ugyan viszonylag távol, de globális értelemben egy alapvetően sűrűn lakott, erősen iparosított régióban helyezkedik el. Az itteni, a globális átlagnál valamivel nagyobb koncentráció oka az antropogén források közelségén túlmenően az, hogy éjszakánként a légkör függőleges irányú keveredésének gyengülésével a szén-dioxid a talajközelségben felhalmozódik, ami az átlagkoncentrációt megemeli. Az éjszakai koncentráció egyes esetekben az 500 ppm-et is eléri. Ezen mérések térbeli reprezentativitása kicsi. Ez a jelenség a globális alapállomásokon, az állomások telepítési helyének következtében általában nem lép fel. Az éjszakai órák kis térbeli reprezentativitású adatai miatt a más állomások méréseivel való összehasonlításokban csak a nappali órák adatait használjuk, amelyek az intenzív függőleges légköri keveredés miatt jobban jellemzik az alsó troposzféra viszonyait (Haszpra, 1999b).

A források és nyelők zavaró közelsége ellenére a K-pusztai adatokban is megfigyelhető a légköri koncentráció növekedési ütemének ingadozása. Az ingadozás nagyobb és fázisában többnyire megelőzi a távoli óceáni és sarkvidéki állomásokon mért ingadozást. Ez is arra utal, hogy a változásokat a kontinentális bioszféra generálja és ezek a változások némi késéssel érik el a más földrajzi környezetben lévő mérőállomásokat.

A légköri koncentráció növekedési ütemében tapasztalható globális inga-

4. ábra



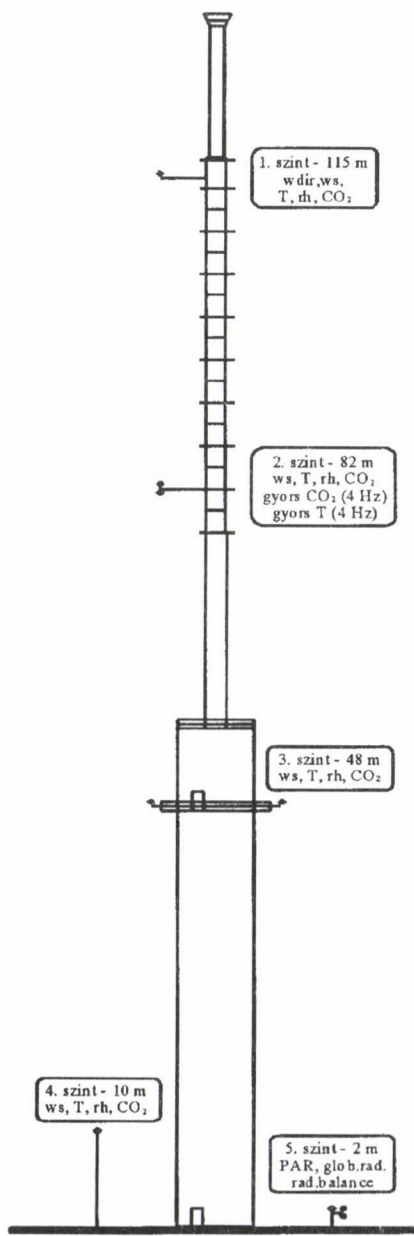
dozások valamelyest korrelációban vannak a manapság oly gyakran emlegetett El Niño jelenséggel (Gaudry et al., 1987; Martin et al., 1994). Valószínűnek tűnik, hogy a szén-dioxidban gazdag hideg tengervíz felszínre törésének átmeneti csökkenése és az El Niño jelenséget kísérő éghajlati zavarra reagáló bioszféra együttesen okozza a légköri szén-dioxid koncentrációjában tapasztalható perturbációkat. A becslések szerint az óceáni cirkuláció, a vízhőmérséklet megváltozása önmagában nem tudná kiváltani a megfigyelt mértékű ingadozásokat (Martin et al., 1994).

1992 táján a légköri CO₂ koncentrációjának növekedési üteme megtorpant, sőt több mérőállomás a koncentráció csökkenését észlelte. Ezt a Pinatubo tűzhányó (15°N) 1991 júniusi kitérő okozta, bár erre az időszakra esett egy gyenge El Niño jelenség és az antropogén CO₂-kibocsátás jelentős csökkenése is a volt Szovjetunióban, valamint a kelet-európai országokban. A közel 30 kilométeres magasságig lövellt vulkáni eredetű szennyeződések világszerte átmeneti éghajlati kilengést okozott. A sztratoszférába került nagymennyiségű aeroszol részecske mintegy fél fokos negatív hőmérsékleti anomáliát eredményezett. Az elsősorban az 1992 nyári-őszi időszakban az északi félgömbön megfigyelt lehülés (Nicholls et al., 1996) számottevően csökkentette a kontinentális ökológiai rendszerek szén-dioxid kibocsátását, miközben a fotoszintézis révén a légkörből kivont mennyiséget valószínűleg nem befolyásolta lényegesen (Conway et al., 1994). Keeling és Whorf (1993) szerint a légköri koncentráció növekedésében észlelt megtorpanás jelentős mértékben annak is köszönhető, hogy a megelőző, átlagosnál melegebb évek során a bioszféra/talaj rendszer a szokásosnál több szén-dioxidot bocsátott ki, s elfedte az antropogén emisszió növekedési ütemének a 70-es évek közepétől megfigyelhető mérséklődését. Így a vulkánkitörés keltette lehülés nagyobb relatív változást okozott, mintha az előző időszakban a bioszféra kibocsátása átlagos lett volna. A volt Szovjetunió és a kelet-európai országok gazdasági összeomlása a légkör CO₂-tartalmának növekedési ütemében megfigyelt csökkenés legfeljebb egynegyedéért lehet felelős (Conway et al., 1994), hasonlóan az 1991–1994 közötti, csaknem folyamatos El Niño jelenséghez.

Az északi és a déli félgömb közötti koncentrációkülönbség átmeneti csökkenése (Conway et al., 1994), a légköri koncentráció növekedési ütemében az északi félgömbön észlelt nagyobb kilengés egyértelművé teszi, hogy az 1992–1993-as jelenség okai az északi félgömbön keresendők, ott, ahol egyébként a vulkánkitörés is történt. A magyarázatok azonban még megerősítésre szorulnak. A számítások mindenesetre azt mutatják, hogy a szárazföldi bioszféra és a légkör közötti szénforgalmat a természetes ingadozások mintegy ±2–5 Gt C/év-vel módosíthatják (Kindermann et al., 1996), azaz a szárazföldi bioszféra esetenként teljesen kompenzálhatja, de akár meg is duplázza az emberi kibocsátás 3,3 Gt C/év-re becsült (Schiemmel et al., 1996) légköri hatását.

Az egyszerű koncentráció mérések alátámaszthatják, megerősíthetik a mérsékelt égővi kontinentális ökológiai rendszerek meghatározó jellegére vonatkozó elméleteket. A hatásmechanizmusok tisztázásához azonban hosszú időn keresztül végezett, közvetlen bioszféra/talaj-légkör anyagáram-mérésekre van szükség. Különböző növényállományokra, rövid, expedíciós jellegű méréseket korábban is végeztek. Az egyes ökológiai rendszerek hosz-

5. ábra
A hegyhátsági TV-adótorny műszerezettsége



szabb távú viselkedésével azonban csak a közelmúltban kezdtek foglalkozni. A globális ingadozások megértéséhez a regionális fluxusok időbeli alakulásának, a környezeti tényezőkkel való összefüggésének tanulmányozása visz közelebb. Az első, kifejezetten ilyen célú programot Észak-Karolinában indították (Bakwin et al., 1995) a NOAA kutatói. Az amerikai kutatókkal együttműködve, a Magyar-Amerikai Tudományos és Technológiai Közös Alap és az OTKA támogatásával, 1994 végén hasonló méréseket indítottunk Magyarországon is. Nagyjából ugyanekkor indították az amerikai partnerek második mérőhelyüket Wisconsin államban.

A magyar mérőhely az Antenna Hungaria Rt. közreműködésével, természetbeni támogatásával jött létre. A mérésekhez a hegyhátsági TV-adótornyot használjuk (5. ábra). Itt négy magassági szintben, 10–115 méterig, időben folyamatosan mérjük a szén-dioxid koncentrációját, valamint a fluxus-számításhoz és az adatok értékeléséhez szükséges meteorológiai paramétereket. A függőleges irányú koncentráció-gradienszen alapuló módszer bizonyos időjárási helyzetekben elvi problémákat vet fel. Ezért 1997 nyarán új, közvetlen anyagáram-mérésre alkalmas mérőrendszert is telepítettünk a toronyra.

Az amerikai vizsgálatok eddigi eredményei arra utalnak, hogy az északi félgömb mérsékelt övi kontinentális területei tényleg nettó nyelőként funkcionálnak (Conway et al., 1994), azaz az itt lévő ökológiai rendszerek több szén-dioxidot vesznek fel, mint saját kibocsátásuk. Fan és munkatársai (1998) legújabb eredményei szerint Észak-Amerika mérsékelt égövi területei önmagukban körülbelül 1,4 Pg (10^{15} g) többlet szenet nyelnek el évente, ami a teljes globális bioszféra/óceán szénfelvétel közel fele. Az 1997–1999 közötti időszak magyarországi mérései is nettó szén-dioxid-felvételt jeleznek, ha nem is ilyen mértékűt. A környez-

zeti tényezők (hőmérséklet, csapadékmennyiség stb.) szén-dioxid-felvételre gyakorolt hatásáról azonban ma még nagyon keveset tudunk. Ennek megismeréséhez sokéves mérési programokra van szükség.

A légköri szén-dioxid-koncentráció alakulása a jövőben

A légkör jövőbeni szén-dioxid-koncentrációját az antropogén kibocsátás alakulása, valamint a légkör és a bioszféra/óceán közötti szén-dioxid-áramlás együttesen határozza meg. Az 1997. decemberi, az ENSZ Éghajlati Keretegyezményéhez csatolt Kiotói Jegyzőkönyv aláírásával megszületett az első olyan nemzetközi megállapodás, amely mérsékelheti a légkör szén-dioxid-tartalmának növekedési ütemét. A Jegyzőkönyv 3. cikkelye lehetővé teszi, hogy az egyes országok kibocsátásuk megadásakor figyelembe vegyék az 1990 után telepített erdők („Kyoto forests”) szén-dioxid-felvételét is.

Ma a bioszféra nettó szén-dioxid-felvétele valószínűleg elsősorban a magasabb légköri szén-dioxid-koncentráció okozta „CO₂-trágyázásnak”, a szintén az emberi tevékenységgel kapcsolatos megnövekedett nitrogénbevitelnek, illetve — főleg Észak-Amerikában — jelentős területeken az erdőségek visszatelepülésének/visszatelepítésének köszönhető (IGBP Terrestrial Carbon Working Group, 1998). A talaj/bioszféra rendszer azonban rendkívül érzékeny a környezeti feltételek változására, így szén-dioxid felvétele nem tekinthető állandónak. Míg a fotoszintézis révén beépített szénmennyiség a légköri szén-dioxid koncentrációjának logaritmusával arányos, addig a respirációval a légkörbe juttatott szénmennyiség a hőmérséklet exponenciális függvénye. Egyes számítások szerint elképzelhető (Scholes, 1999), hogy a globális felmelegedés előrehaladtával, már a nem túl távoli jövőben csökkenni kezd a bioszféra nettó szén-dioxid-felvétele, amit az antropogén szén-dioxid-kibocsátás erőteljes visszafogásával kellene ellensúlyozni. Mivel ezen a területen még nagyon sok a tisztázatlan, a jövőbeni döntéseket befolyásoló fontos kérdés, az Európai Unió 1999-ben indult 5. Kutatási-Fejlesztési Keretprogramja kiemelten foglalkozik a szárazföldi ökológiai rendszerek és a légkör közötti szén-dioxid-átvitellel.

A légkörbe bocsátott szén-dioxid másik nyelője az óceán. Stacionárius esetben a légkör és a világóceán CO₂-tartalma egymással egyensúlyban van. A légkör változó szén-dioxid-tartalmára azonban az óceán, lassú átkeveredése miatt, csak nagyon lassan reagál. Míg a légkör CO₂-tartalma az elmúlt 200 éven mintegy 80 ppm-mel növekedett, addig átlagos parciális nyomása az óceánban még csak 8 ppm-mel (Siegenthaler és Sarmiento, 1993). A globális éghajlatváltozás az óceáni CO₂-felvételt is fékezheti. A felszíni vízréteg felmelegedése egyrészt csökkenti a szén-dioxid beoldódási sebességét, másrészt a stabilabb rétegződés kialakulásával lassítja a mélyebb rétegekkel való keveredést.

Az ember által a légkörbe juttatott szennyezőanyagok többsége a kémiai folyamatoknak köszönhetően rövidebb-hosszabb idő alatt elbomlik, átalakul, eredeti formájában véglegesen eltűnik. A szén-dioxidnak nincs ilyen jellegű nyelője. A szénképződés, a karbonátos kőzetekbe való beépülés olyan lassú, hogy a litoszférából a fosszilis tüzelőanyagok elégetésével felszabadított szén az emberi civilizáció időléptékével mérve végleg a légkör-

óceán–bioszféra–talaj rendszerben marad. E szférák közötti eloszlását a kialakuló környezeti viszonyok szabják meg.

Mindaddig, amíg a légkör CO₂-koncentrációját vezérlő folyamatokat, kölcsönhatásokat nem ismerjük pontosan, nem adható megbízható előrejelzés az üvegházhatás, és így az éghajlat, jövőbeni alakulására sem. Ugyanakkor, ismereteink hiányosságaira hivatkozva nem odázhatjuk el a korlátozó intézkedések meghozatalát sem, hiszen a légkör–óceán–bioszféra–talaj további terhelése beláthatatlanul súlyos környezeti, ezen keresztül pedig gazdasági-társadalmi problémákhoz vezethet.

IRODALOM:

- Arrhenius, S.*, 1896: On the influence of the carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Mag.*, 41, 237–275.
- Bakwin, P.S., Tans, P.P., Zhao, C., Ussler, W. III. and Quesnell, E.*, 1995: Measurements of carbon dioxide on a very tall tower. *Tellus*, 47B, 535–549.
- Barnola, J.M., Raynaud, D., Korotkevich, Y.S. and Lorius, C.*, 1987: Vostoc ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂. *Nature*, 329, 408–414.
- Bolin, B., Degens, E.T., Duvigneaud, P. and Kempe, S.*, 1977: The global biogeochemical carbon cycle. In: *The global carbon cycle*. SCOPE 13 (eds.: *Bolin, B., Degens, E.T., Kempe, S. and Ketner, P.*). John Wiley & Sons, Chichester – New York – Brisbane – Toronto.
- Ciais, P., Tans, P.P., White, J.W.C., Trolier, M., Francey, R.J., Berry, J.A., Randall, D.R., Sellers, P.J., Collatz, J.G. and Schimel, D.S.*, 1995: Partitioning of ocean and land uptake of CO₂ as inferred by ¹³C measurements from the NOAA/CMDL global air sampling network. *J. Geophys. Res.*, 100D, 5051–5070.
- Conway, T.J., Tans, P.P., Waterman, L.S., Thoning, K.W., Kitzis, D.R., Masarie, K.A. and Zhang, N.*, 1994: Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory Global Air Sampling Network. *J. Geophys. Res.*, 99D, 22831–22855.
- Enting, I.G. and Mansbridge, J.V.*, 1991: Latitudinal distribution of sources and sinks of CO₂: Results of an inversion study. *Tellus*, 43B, 156–170.
- Fan, S., Gloor, M., Mahlman, J., Pacala, S., Sarmiento, J., Takahashi, T. and Tans, P.*, 1998: A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science*, 282, 442–446.
- Gaudry, A., Monfray, P., Polian, G. and Lambert, G.*, 1987: The 1982–1983 El Niño: a 6 billion ton CO₂ release. *Tellus*, 39B, 209–213.
- Haszpra L.*, 1993: NOAA mérőhely Magyarországon. *Légkör*, 38/4, 14–16.
- Haszpra, L.*, 1999a: Measurements of atmospheric carbon dioxide at a low elevation rural site in Central Europe. *Időjárás*, 103, 93–106.
- Haszpra, L.*, 1999b: On the representativeness of carbon dioxide measurements. *J. of Geophysical Research*, 104D, 26953–26960.
- IGBP Terrestrial Carbon Working Group, 1998: *The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol*. *Science*, 280, 1393–1394.
- Keeling, C.D. and Whorf, T.P.*, 1994: Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In: *Trends '93: A Compendium of Data on Global Change*. ORNL/CDIAC-65. (eds.: *Boden, T.A., Kaiser, D.P., Sepanski, R.J. and Stoss, F.W.*). CDIAC, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. 16–26.
- Kindermann, J., Würth, G., Kohlmaier, G.H. and Badeck, F.-W.*, 1996: Interannual variation of carbon exchange fluxes in terrestrial ecosystems. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 10, 737–755.
- Martin, F., Valero, F. and Garcia-Miguel, J.A.*, 1994: On the response of the background atmospheric CO₂ growth rate to the anomalies of the sea-surface temperature in the Equatorial Pacific Ocean. *Atmospheric Environment*, 28, 517–530.

- Neftel, A.H., Oeschger, H., Staffelbach, T. and Stauffer, B.*, 1988: CO₂ record in the Byrd ice core 50,000–5,000 years BP. *Nature*, 331, 609–611.
- Neftel, A., Friedli, H., Moor, E., Lötscher, H., Oeschger, H., Siegenthaler, U. and Stauffer, B.*, 1994: Historical CO₂ record from the Siple Station ice core. In: *Trends '93: A Compendium of Data on Global Change*. ORNL/CDIAC-65. (eds.: *Boden, T.A., Kaiser, D.P., Sepanski, R.J. and Stoss, F.W.*). CDIAC, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. 11–14.
- Nicholls, N., Gruza, G.V., Jouzel, J., Karl, T.R., Ogallo, L.A. and Parker, D.E.*, 1996: Observed climate variability and change. In: *Climate change 1995* (eds.: *Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, A., Kattenberg, A. and Maskell, K.*), 133–192.
- Rutten, M.G.*, 1971: *The origin of life by natural causes*. Elsevier, Amsterdam – London – New York.
- Siegenthaler, U. and Sarmiento, J.L.*, 1993: Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature*, 365, 119–125.
- Schimel, D., Alves, D., Enting, I., Heimann, M., Joos, F., Raynaud, D., Wigley, T., Prather, M., Derwent, R., Ehhalt, D., Fraser, P., Sanhueza, E., Zhou, X., Jonas, P., Charlson, R., Rodhe, H., Sadasivan, S., Shine, K.P., Fouquart, Y., Ramaswamy, V., Solomon, S., Srinivasan, J., Albritton, D., Isaksen, I., Lal, M. and Wuebbles, D.*, 1996: Radiative forcing of climate change. In: *Climate change 1995* (eds.: *Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, A., Kattenberg, A. and Maskell, K.*), 65–132.
- Scholes, B.*, 1999: Will the terrestrial carbon sink saturated soon? *Global Change Newsletter*, 37, 2–3.
- Tans, P.P.*, 1991: An observational strategy for assessing the role of terrestrial ecosystems in the global carbon cycle: Scaling down to regional levels. In: *Scaling processes between leaf and landscape levels* (eds.: *Ehleringer, J. and Field, C.*). Academic Press, San Diego.
- Tans, P.P., Fung, I.Y. and Takahashi, T.*, 1990: Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, 247, 1431–1438.
- Thoning, K.W., Tans, P.P. and Waterman, L.S.*, 1994: Atmospheric CO₂ records from sites in the NOAA/CMDL continuous monitoring network. In: *Trends '93: A Compendium of Data on Global Change*. ORNL/CDIAC-65. (eds.: *Boden, T.A., Kaiser, D.P., Sepanski, R.J. and Stoss, F.W.*). CDIAC, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. 28–40.
- Tyndall, I.*, 1861: On the absorption and radiation of heat by gases and vapours and on the physical connection of radiation absorption and conduction. *Philosophical Mag.*, 22, 167–194., 273–283.
- WMO, 1974: WMO operational manual for sampling and analysis techniques for chemical constituents in air and precipitation. WMO No. 299.