

## Calibration and field test of a new, automated open system to measure soil CO<sub>2</sub> efflux in sandy grassland

### Homoki gyepek CO<sub>2</sub> kibocsátásának vizsgálata új, nyílt rendszerű automata mérőeszközzel

Papp Marianna<sup>1\*</sup>, Balogh János<sup>2</sup>, Pintér Krisztina<sup>2</sup>, Fóti Szilvia<sup>1</sup>, Koncz Péter<sup>1</sup>, Marian Pavelka<sup>3</sup>, Eva Darenova<sup>3</sup>, Nagy Zoltán<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> MTA-SZIE Növényökológiai Kutatócsoport, Szent István Egyetem, Gödöllő

<sup>2</sup> Szent István Egyetem Növénytan és Ökofiziológiai Intézet, Gödöllő

<sup>3</sup> Czech Globe, Globális Klímaváltozás Kutatóközpont, Cseh Tudományos Akadémia, Brno (Cseh Köztársaság)

Postai cím: Papp Marianna, MTA-SZIE Növényökológiai Kutatócsoport,

Szent István Egyetem, 2100 Gödöllő, Páter K. u. 1.

\*E-mail: [papp.marianna@mkk.szie.hu](mailto:papp.marianna@mkk.szie.hu)

## 1. Bevezetés

A talajból kibocsátott szén-dioxid (CO<sub>2</sub>), a talajlégzés (R<sub>s</sub>), az ökológiai rendszerek szénforgalmának egyik legnagyobb részarányú komponense, így meghatározó a rendszer CO<sub>2</sub>-mérlegének alakításában is (Nagy et al., 2011). A talajlégzés folyamatos, változó mértékű CO<sub>2</sub>-áramot jelent a talaj felől az atmoszféra felé. Folyamatos mérésével olyan részletes adatsor nyerhető, amelynek időbeli felbontása nem is hasonlítható az alkalomszerű mérésekéhez. Ilyen mérési adatok elemzése segítségével jobban értelmezhetővé válik R<sub>s</sub> környezeti változókra adott válasza, illetve csökkenthető annak bizonytalansága (Savage et al., 2013). A nagyobb időbeli felbontású mérések szükségességét (Ruehr et al., 2009) a talaj CO<sub>2</sub>-kibocsátásának napi változékonysága, a ható tényezőkre adott esetenkénti gyors válaszok (pl. csapadékeseményeket követő változások) is indokolják.

A talajok CO<sub>2</sub>-kibocsátásának mérésére többféle módszer is alkalmazható (Lellein Kovács, 2008; Luo and Zhou, 2006). Ezek közül elsősorban a dinamikus gázcsesemérő kamrák és a grádiens rendszerek a legelterjedtebbek. A dinamikus (nyílt és zárt) kamrák előnye, hogy a kibocsátást közvetlenül a talaj felszínén mérik, s ez a grádiens rendszerek módszertanához képest kevesebb becslési bizonytalansággal jár. A kereskedelmi forgalomban kapható kamrás rendszerek egyik hátránya, hogy beszerzésük nagyon költséges. Másrészt, a gázcsesemérő kamrák viszonylag nagy

mérete miatt (belső átmérőjük 10 cm, vagy annál nagyobb pl. LI-8100, EGM-4) nehezen alkalmazhatók zárt gyepekben, mivel a növényzet föld feletti részeit rendszeresen vágni kell ahhoz, hogy légzési aktivitásuk ne zavarja a talajból eredő CO<sub>2</sub>-áram elkülönítését. A zöld növényi részek eltávolítása nemcsak nehézkes, hanem zavarást is okoz, ami a mérési eredményekben is jelentkezhet. További nehézség lehet a működésbiztonság kérdése, hiszen zárt rendszerű eszközök esetében a kamrák zárását, nyitását mozgó alkatrészek biztosítják (Pavelka et al., 2004). Ezek terepi körülmények közötti meghibásodása (pl. akadály gátolja a fedél mozgatását) észrevétlenül hibás mérést eredményezhet. Éppen ezért célul tűztük ki egy olyan, terepi körülmények között is megbízhatóan működő, automata mérőrendszer (SRS = soil respiration system) kifejlesztését, ami a lehetséges legkisebb zavarás mellett képes méréseket végezni gyepekben. A saját rendszer megbízhatóságát, illetve mérési pontosságát laboratóriumi körülmények közötti kalibrálással, valamint terepi körülmények közötti méréssel teszteltük. A terepi körülmények közötti tesztelés során adatainkat az R<sub>s</sub> mérésére általánosan használt rendszer (LI-6400) eredményeivel vetettük össze. Az összevetés azért volt szükséges, hogy a kifejlesztett rendszer működésének megbízhatóságáról a jellemzően többhetes karbantartás nélküli periódusokban is meggyőződhesünk.

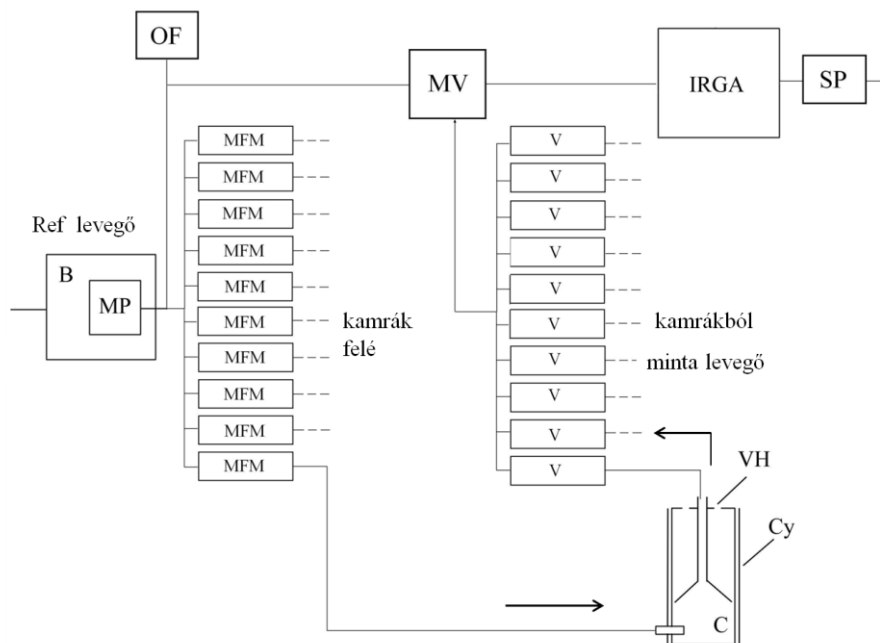
## **2. Anyag és módszer**

### **2.1. Mérőműszer leírása**

A kifejlesztett SRS rendszer jelenleg 10 db talajlégzés-mérő kamrával működik, ami figyelemreméltó mintavételi ismétlésszámot jelent más hasonló rendszerekhez viszonyítva.

A rendszer (1. ábra) tartalmaz egy SBA-5 (PPSystems, Egyesült Királyság) típusú infravörös gázanalizátort (IRGA), két pumpát (MP, P), tömegáramlás-mérőket (MFM, type D6F-01A1-110, Omron Co., Japán), szelepeket (V1-10) és 10 db talajlégzés-mérő kamrát. A fő pumpa (MP: Eheim 400, Eheim, Németország) egy 2 literes puffer tartályban van elhelyezve. A kamrák magassága 10,4 cm, átmérője 5 cm és alapterületük 19,6 cm<sup>2</sup>. A kamrák stabilizálása és a direkt sugárzástól való védelem érdekében a műanyag kamrák (C) fehér fémhenger-borítást kaptak 2 mm-es légréssel. A kamrák tetején 4 db szellőző nyílás van, melyek össz felülete 0,95 cm<sup>2</sup>. A szellőző nyílásokon keresztül a csapadék is bejut a kamrákba.

A fő pumpából a referencia levegő két irányba ágazik: az egyik közvetlenül az IRGA-hoz jut, a másik a tömegáramlás-mérőkön keresztül a kamrákba kerül 220-240 ml min<sup>-1</sup> áramlással. A kamrákba beáramló referencia levegő a talaj felszíne felett 1 cm-rel érkezik be. A kamrákból a pumpa 160-180 ml min<sup>-1</sup> áramlással mintázza a levegőt, mely az IRGA-hoz jut.



1. ábra: Automata talajlégzés-mérő rendszer (SRS) sematikus rajza. Jelmagyarázat: B=puffer térfogat, MP=fő pumpa, SP=mintavevő pumpa, OF=túlfolyó, MFMI-10=tömegáramlás-mérők, MV=fő szelep, V1-10=szelepek, VH= szellőző nyílások, C=kamra mintavevő tölcserrel, Cy=fém cylinder, IRGA=gázanalizátor

A műszer nyílt rendszerű (open steady-state system). A kamrákat gyűrűk használata nélkül, közvetlenül a talajfelszínre helyezzük el kb. 3-5 mm-es mélységig (avarszint), ezáltal a talaj mélyebb rétegeinek zavarása kikerülhető (Wang et al., 2005). A mérőrendszer egy intézeti fejlesztésű szoftver segítségével működik (CRBasic, Campbell Sci., Egyesült Királyság), ami a CR5000 (Campbell Sci., Egyesült Királyság) adatgyűjtőt vezérli, ellenőrzi az egyes kamrákra eső mérési időt, vált a kamrák között, méri a tömegáramlás-mérőkről, IRGA-ról és egyéb szenzorokról (talajhőmérséklet és -nedvességtartalom, 5TM, Decagon Devices, Egyesült Királyság) érkező jeleket, továbbá tárolja az adatokat. A kamrák és a környezeti levegő közötti nyomáskülönbség mérését nyomásszenzor biztosítja (SDP1000-L05, Sensirion AG, Staefa, Svájc), emellett az adatgyűjtőre kapcsolt lég- és talajhőmérséklet-mérő szenzorok,

talajnedvesség-mérő (thermocouples CS616, Campbell Sci., Egyesült Királyság) működnek a műszer-együttesben.

A rendszeren belüli kis légsebesség, a kis térfogatú kamrák, a kamra kivitelezése (kis átmérő és térfogat, a kamra tetején kialakított szellőző nyílások, a belső mintatölcsér alkalmazása) kicsi (0,05–0,12 Pa) értéken stabilizálják a túlnyomást, ezzel elkerülve a fluxusok alulbecslését, ami a túlnyomásos rendszerek hibája lehet (Fang and Moncrieff, 1996; Luo and Zhou, 2006). A mérőrendszer részeit (adatgyűjtő, IRGA, szelepek, légáramlás-mérők, pumpák stb.) a terepi alkalmazáshoz zárt időjárásálló dobozban helyeztük el. A terepi mérések során a mérési és szünet periódusok időtartama programozással állítható.

## 2.2. Kalibrálás

Az új műszer kalibrálása kalibráló tartályon történt (Pumpanen et al., 2004) Brno-ban 2011-ben (Czech Globe Kutató Központ, Cseh Tudományos Akadémia, Brno). A henger alakú kalibráló tartály belső átmérője 1,13 m, belső magassága 1,08 m volt. A tartály belső térfogata 1,08 m<sup>3</sup> 1,00 m<sup>2</sup>-es kalibráló területtel, melynek perforált felső részére 0,12 m rétegben tiszta kvarc homokot helyeztek. A tartályból a mintalevegő egy pumpa segítségével jutott az infravörös gázanalizátorba (LI-820, LI-COR, U.S.A., 0-20000 ppm tartomány) és onnan vissza a tartályba. Az adatgyűjtést DL-3000 (Delta-T Devices, Egyesült Királyság) adatgyűjtő végezte. A tartály CO<sub>2</sub>-koncentrációját 15 percenként mértük. A tartályon belüli CO<sub>2</sub>-koncentráció időbeli változásából számítottuk a homokrétegen keresztül eltávozó CO<sub>2</sub>-mennyiségét (Pumpanen et al., 2004).

## 2.3. Terepi mérések

Vizsgálataink helyszíne Bugacon található, mely a Kiskunsági Nemzeti Park területéhez tartozik (é.sz. 46°69', k.h. 19°6', tszf:114 m). Az 550 ha-os legelő talaja csernozjom típusú humuszos homok, magas szerves szén-tartalommal (Balogh et al., 2011).

Tíz év átlagát tekintve az évi átlag csapadékmennyiség 562 mm, évi átlaghőmérséklet 10,4°C. A területen több mint 80 különböző növényfaj található, melyek közül domináns a *Poa angustifolia*, *Carex stenophylla*, *Cynodon dactylon* és a *Festuca pseudovina* (Koncz et al., 2014). Az utóbbi 20 évben a homokpusztagyepet extenzív legelőként használják alacsony legelési nyomással. Az eddy kovariancia állomással történő folyamatos szén-forgalmi mérések és az alkalmankénti talajlégzés-mérések egyaránt 2002-ben kezdődtek el (Balogh et al., 2011; Nagy et al., 2007).

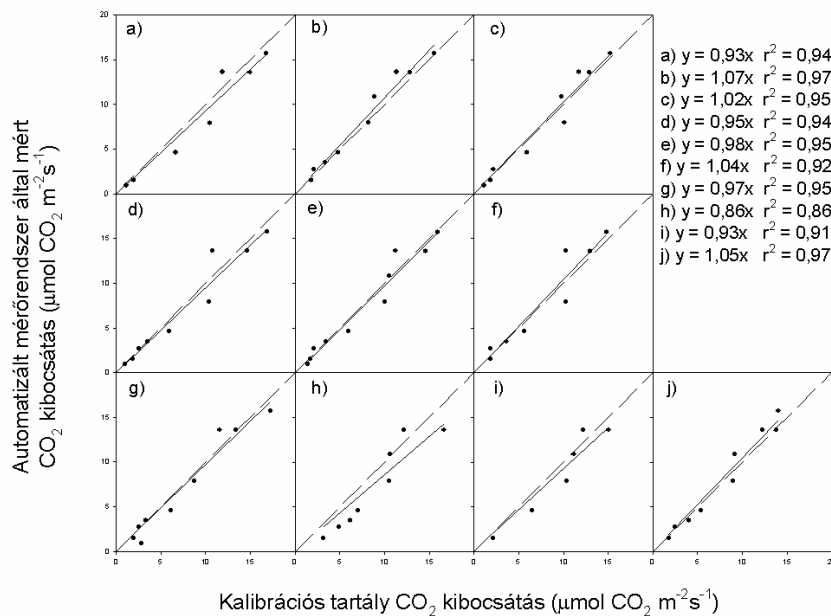
A terepi tesztelés alapjául szolgáló alkalmankénti talajlégzés-méréseinkhez (2011-től kezdődően kéthetente) LICOR-6400 típusú infravörös gázanalizátort és a hozzá tartozó talajlégzés-mérő kamrát használtuk. Ezeket az adatokat vetettük össze a folyamatos

méréshez használt, az intézetünk által kifejlesztett és fent bemutatott, automatizált nyílt kamrás talajlégzés-mérő rendszer adataival. A mérőrendszer 2011 júliusától működik folyamatosan a területen. A mérőrendszer kétóránként kapcsolt be és mért egy-egy órát, egy kamrán egy mérés átlagosan 3 percig tartott. A terepi méréseket egy 5m x 5m-es területen végeztük, amelyen belül a mérőrendszer kamráit kb. kétheti gyakorisággal áthelyeztük a nagyobb térbeli lefedettség érdekében.

### 3. Eredmények

#### 3.1 Kalibrálás

A kalibráló tartályon végzett kalibrálás eredményei kamránként elkülönítve (1-10 db) a 2. ábrán láthatóak.

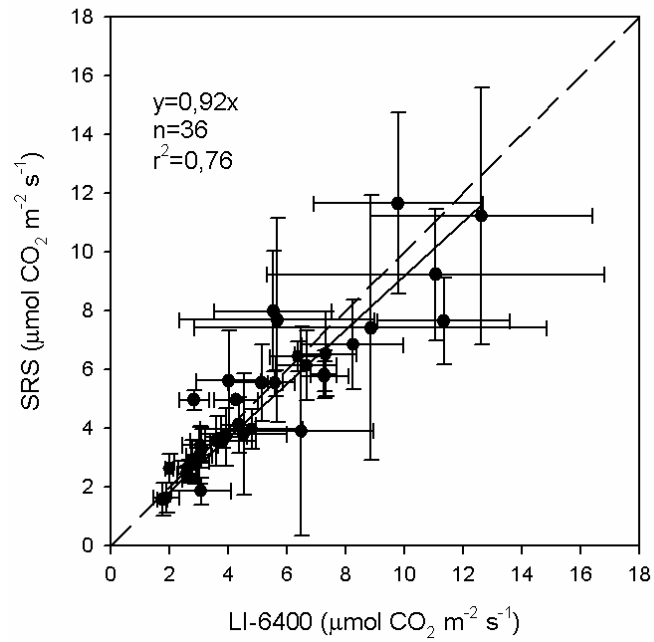


2.ábra: Az új mérőrendszerrel mért  $CO_2$ -kibocsátás adatok a kalibráló tartály  $CO_2$ -kibocsátása függvényében, kamránként (1-10). Függőleges tengely: új mérőrendszerrel mért  $CO_2$ -kibocsátás ( $\mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ ). Vízszintes tengely: kalibrációs tartály  $CO_2$ -kibocsátása ( $\mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ ).

A kalibrációt az egyes kamrák esetében (1-10 kamra) külön-külön végeztük el. A kamránkénti mérésekre történt illesztések eredményei alapján elmondható, hogy az SRS által mért CO<sub>2</sub>-kibocsátás és a kalibrációs tartály CO<sub>2</sub>-kibocsátása szoros korrelációt mutat. Az összefüggés determinációs együttható értékei ( $r^2$ ) 0,86 és 0,97 között változtak, ezzel is igazolva az SRS mérések megbízhatóságát. A regressziós együttható értéke átlagosan 0,022-vel ( $\pm 0,067$ ) tért el az 1-től, ennek alapján a mért CO<sub>2</sub>-kibocsátás értékekre egyéb (kamránkénti) korrekciót nem alkalmaztunk.

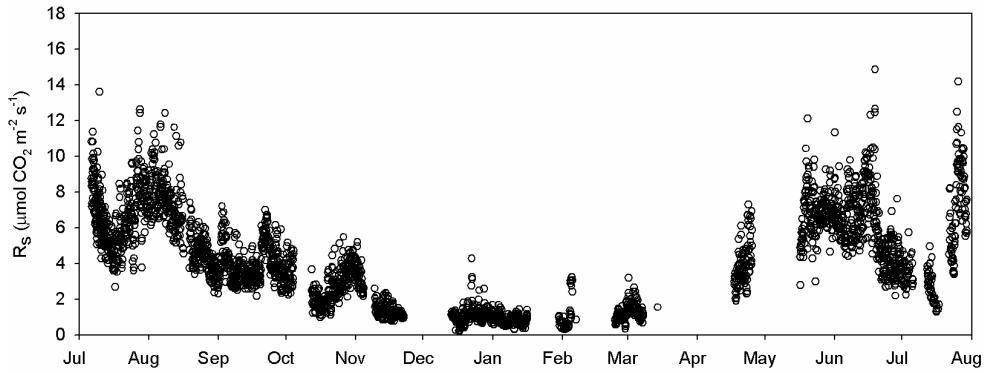
### 3.2 LICOR-6400-as talajlégzés-mérő rendszer és az SRS összevetése

A LICOR-6400-as infravörös gázanalizátorral mért terepi talajlégzés értékek és az automata rendszer által rögzített fluxusok összevetését a 2012-2013-as vizsgálati időszakban összesen 36 mérési alkalom adatai alapján végeztük el, mind a négy évszakot lefedően. A 3. ábrán az összehasonlításban résztvevő, egyes mérési ciklusból származó adatok átlaga (LICOR  $n=5$ , SRS  $n=5$ ) és szórása látható. Páros t-próba alapján az egyes mintavételi időpontokhoz tartozó LICOR és SRS adatok között nincs szignifikáns különbség ( $p=0,26$ ). A mérésátlagokra történő lineáris illesztés során kapott determinációs együttható [ $r^2=0,76$  ( $p<0,05$ )] is a két független rendszer általi becslés közötti szoros összefüggésre utal, illetve az újonnan kifejlesztett mérőműszer megbízhatóságát bizonyítja. A kapott meredekség (0,92) azt mutatja, hogy az SRS a LICOR-6400-as rendszerhez képest némileg alulbecsli a CO<sub>2</sub>-kiáramlást. A magasabb értéket a LICOR rendszer esetében a kamra talajra helyezésekor a fizikai zavarás eredményezheti (az SRS-nél a kamrák hozzávetőlegesen két hétig azonos helyen vannak, zavarás nélkül), továbbá a talajlégzés számottevő térbeli variabilitása (Fóti et al., 2014) is okozhatja.



3.ábra: Az új automata mérőrendszer (SRS) (y-tengely) és a LICOR által mért (x-tengely) átlagos CO<sub>2</sub>-kibocsátás értékeinek (μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) összefüggése, 2012-2013. Az ábrán feltüntetett 36 adat egyes mérési alkalmak átlagát (LICOR n= 5, SRS n=5) és szórását jelöli.

Az SRS által mért talajlégzés értékekből számított mérésátlagok éves menete (4. ábra) jól tükrözi a talajlégzés szezonális dinamikáját.



4. ábra: Az automata mérőrendszerrel mért talajlégzés éves menete Bugacon (2011-2012). Egy kör az egy mérési ciklusban mért értékek átlaga.

A mérések során a legmagasabb CO<sub>2</sub>-kibocsátás értékeket a nyári időszakban tapasztaltuk, csapadékesemények után. A legalacsonyabb értékek a téli időszakban fordultak elő. A 4. ábrán látható adathiányos időszakok a mérőműszer karbantartási folyamatainak, illetve technikai okoknak (pl. hosszabb áramszünet a mérőhelyen) a következményei.

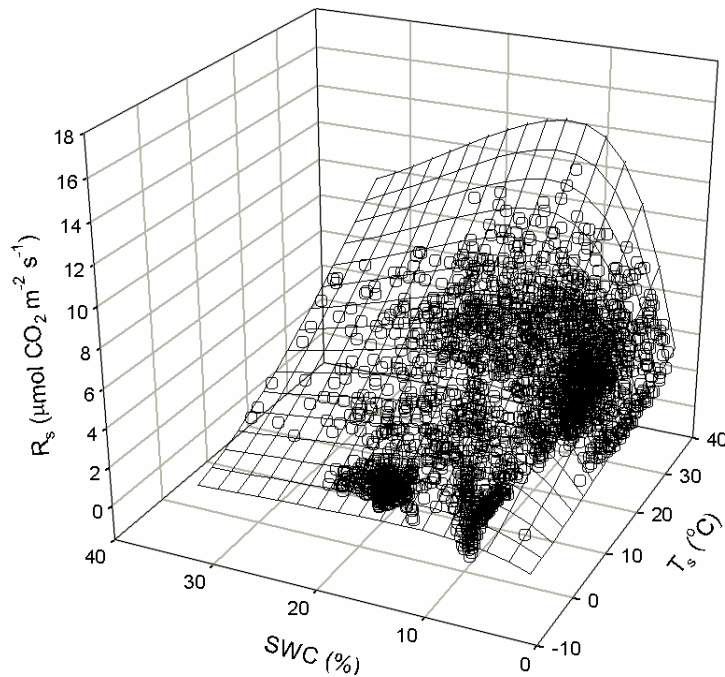
A talajlégzés modellezésére használt Lloyd-Taylor modell módosításával (Balogh et al., 2011) a talajnedvesség-tartalmat is tartalmazó felület illeszthető.

Az illesztés egyenlete:

$$F = a \times e^{b \times \left( \frac{1}{56.02} - \frac{1}{T_s - 227.13} \right) + \left[ -0.5 \times \left[ \ln \left( \frac{SWC}{c} \right) \right]^2 \right]} \quad (1)$$

ahol:  $a$  a 10°C-on mért talajlégzés érték,  $T_s$  az 5 cm-en mért talajhőmérséklet (K),  $b$  az aktivációs energiára utaló paraméter (K),  $SWC$  a talajnedvesség-tartalom (%),  $c$  a talajlégzés szempontjából optimális talajnedvesség-tartalom (térfogat %).





5.ábra: A talajlégzés ( $R_s$ ) abiotikus hatótényezőktől ( $T_s$ : talajhőmérséklet, SWC: talajnedvesség-tartalom) való függése [(1) egyenlet, 2011-2012 adatsor, Bugac]. Egy kör: lásd 4. ábra

A talajlégzés abiotikus környezeti tényezőktől ( $T_s$ , SWC) való függésének vizsgálata során kapott eredmények a következők (5. ábra): a determinációs koefficiens értéke ( $r^2$ ) 0,56, a 10°C-on mért talajlégzés érték (a) 2,99, az aktivációs energiához kapcsolódó paraméter (b) 208,1, az optimális talajnedvesség-tartalom (c) pedig 12,43. Az illesztés minden paramétere szignifikáns ( $p < 0,001$ ) volt.

#### 4. Az eredmények értékelése

A talajlégzés mérésére jelenleg alkalmazott, automata talajlégzés-mérő műszerek sok esetben zárt mérési elven működő eszközök (Luo and Zhou, 2006; Pavelka et al., 2004), melyek nyitó-csukó szerkezettel ellátott kamrákkal rendelkeznek. Amellett, hogy nagyon drágák, további hátrányuk, hogy a kamrák nagy mérete miatt (belső átmérőjük nagyobb, mint 10 cm) füves vegetációban nehezen használhatóak, hiszen folyamatos bolygatásra (vágásra) van szükség ahhoz, hogy a felszín feletti biomassza légzése ne

befolyásolja a mérési eredményeket. A föld feletti vegetáció mérés előtti eltávolítása jelentősen megváltoztathatja a talajlégzés rövid távon mért értékeit, márpedig, hosszú távú mérések esetében a biomasszát rendszeresen el kell távolítani. Az általunk kifejlesztett mérőműszer nagy előnye, hogy kis átmérőjű kamrái ( $d=5$  cm) a lehető legkisebb zavarás mellett alkalmazhatók gyepekben, hiszen méretükből adódóan a fűcsomók között könnyen elhelyezhetők. A kamrák védettek a direkt sugárzástól, a tetejükön elhelyezett szellőző nyílások lehetővé teszik a csapadék talajfelszínre jutását, így a mért talajfolt kiszáradása elkerülhető. A kamrákba pumpált alacsony áramlási sebességű referencia levegő és a mintázott (analízis) levegő be- és kiáramlása révén biztosított a nyomáskülönbség kiküszöbölése (Fang and Moncrieff, 1996).

A kamrák avarszintbe helyezése – ellentétben a sok esetben tapasztalt gyakorlattal –, talajba süllyesztett gyűrűk nélkül történik, ami minimalizálja a talaj, valamint a talaj felszínéhez közel elhelyezkedő gyökerek bolygatását (Wang et al., 2005).

A kalibrációs tartályon végzett mérések igazolták a műszer megbízható működését, így a mérések további korrekciójára nem volt szükség.

Az SRS rendszer és a LICOR-6400-as rendszer összevetése során az SRS esetében a  $\text{CO}_2$ -kiáramlás kismértékű alulbecslését tapasztaltuk, mely a LICOR kamrája által okozott zavarás, valamint a talajlégzés térbeli variabilitásának eredménye lehet. Az eltérés kis mértéke is mutatja a kifejlesztett rendszer megbízhatóságát, ami kiegészítve a kvázi folyamatos mérés előnyeivel (éjszakai mérések, eső alatti és utáni mérések) a manuálisan működtetett eszközökhöz képest még inkább indokolja az SRS használatát. A 10 kamrás rendszer kifejlesztésére a talajlégzés már kis térléptékben is megnyilvánuló nagyfokú variabilitása miatt volt szükség (Fóti et al., 2008, Fóti et al., 2014). A vizsgálatok során megtapasztalható térbeli heterogenitás mértéke egyszerre több tényező (a vizsgálat léptéke, a mintavételi egység nagysága, a mintaelemszám) függvénye (Davidson et al., 2002; Rossi et al., 1992; Stein and Ettema, 2003). Hasonló léptékben, kicsit nagyobb mintavételi egységgel végzett mérések szerint az optimális mintaelemszám 7 és 36 közötti, az aktuális talajnedvesség-tartalom függvényében (Fóti et al. 2014). A szükséges ismétlésszámot adott esetben a 10 kamra már biztosítja is. Máskor, ha nem is lenne elegendő, a kamrák rendszeres áthelyezése révén az időbeli ismétlések során meg tudjuk közelíteni azt, így térben is reprezentatív átlagot nyerhetünk a vizsgált területre nézve.

Az SRS által mért talajlégzés-értékeket a területen korábban a LICOR-6400-as műszerrel manuálisan végzett, többféle időszakból és nagyobb adatmennyiségből származó mérési eredményekkel (Balogh et al., 2011) is összehasonlítottuk. A korábbi talajlégzés-mérések talajnedvesség-tartalom- és hőmérséklet- függésének vizsgálata során kapott illesztés paramétereit ( $r^2=0,47$ ;  $a=3,47$ ;  $b=215,223$ ;  $c=14,19$ ) összevetve az SRS által mért talajlégzés-értékekre történő ugyanazon illesztés paramétereivel elmondható, hogy nincs közöttük jelentős különbség ( $a=2,99$ ;  $b=208,1$ ;  $c=12,43$ ), ezzel

is igazolva az SRS mérések megbízhatóságát. A nagyszámú adatnak köszönhetően viszont a determinációs koefficiens értéke a korábbihoz képest javult ( $r^2=0,56$ ). A kampányszerű mérési alkalmakkal ellentétben a folyamatos adatgyűjtés által lehetővé válik a talajlégzés napi és éves szintű változékonyságának elemzése és okainak feltárása (Darenova et al., 2014).

## **Összefoglalás**

Az utóbbi évtizedben zajló kutatások kimutatták, hogy a talajok CO<sub>2</sub>-kibocsátása jelentős napi és szezonális változékonyságot mutat. A manuális mérőrendszerekkel azonban ez nehezen követhető nyomon. Éppen ezért megjelent az igény a nagyobb időbeli felbontású automata mérőrendszerekre, több gyártó készítette el saját fejlesztésű műszerét. Ezeknek a rendszereknek a hátránya, hogy drágák és többnyire zárt rendszerben működnek, ahol a bonyolult kamranyitó-záró mechanika csökkentheti a működésbiztonságot. További hátrányt jelent a kamrák meglehetősen nagy mérete, ami miatt gyepállományokban nehezen alkalmazhatók.

Az általunk kifejlesztett nyílt rendszerű mérőeszköz alkalmasnak bizonyult ezen problémák kiküszöbölésére: a kisméretű kamrák (d= 5 cm) könnyen elhelyezhetők a növények között, nyílt rendszerben nem szükséges kamranyitó-záró mechanikát építeni, és a rendszer olcsón kivitelezhető.

A kifejlesztett 10 kamrás mérőrendszer kalibrálását laboratóriumi körülmények között végeztük el, valamint összehasonlítottuk terepi mérések segítségével egy nemzetközileg is hitelesnek számító mérőrendszerrel. A kapott eredmények szerint a kifejlesztett mérőrendszer alkalmas hosszú időtartamú automata-mérésekre, segítségével nagy mennyiségű adat nyerhető.

**Kulcsszavak:** kalibrált automata talajlégzés-mérő rendszer, folyamatos mérések, összevetés standard rendszerrel, hosszú időtartamú mérések

## **Köszönetnyilvánítás**

Munkánkat a következő kutatási projektek támogatták: OTKA-PD 100575, OTKA-PD 100944, Kutató Kari Kiválósági Támogatás (8526-5/2014/TUDPOL) és AnimalChange (FP7 266018), valamint köszönjük a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj Támogatását (Fóti Szilvia és Balogh János).

## ***Irodalomjegyzék***

- Balogh, J., Pintér, K., Fóti, S., Cserhalmi, D., Papp, M., Nagy, Z., 2011. Dependence of soil respiration on soil moisture, clay content, soil organic matter, and CO<sub>2</sub> uptake in dry grasslands. *Soil Biol. Biochem.* 43, 1006–1013.
- Darenova, E., Pavelka, M., Acosta, M., 2014. Diurnal deviations in the relationship between CO<sub>2</sub> efflux and temperature: A case study. *Catena* 123, 263–269.
- Davidson, E.A., Savage, K., Verchot, L., Navarro, R., 2002. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agric. For. Meteorol.* 113, 21–37.
- Fang, C., Moncrieff, J.B., 1996. An improved dynamic chamber technique for measuring CO<sub>2</sub> efflux from the surface of soil. *Funct. Ecol.* 297–305.
- Fóti, S., Balogh, J., Nagy, Z., Herbst, M., Pintér, K., Péli, E., Koncz, P., Bartha, S., 2014. Soil moisture induced changes on fine-scale spatial pattern of soil respiration in a semi-arid sandy grassland. *Geoderma* 213, 245–254.
- Fóti, S., Balogh, J., Nagy, Z., Ürmös, Z., Bartha, S., Tuba, Z., 2008. Temporal and spatial variability and pattern of soil respiration in loess grassland. *Community Ecol.* 9, 57–64.
- Lelleiné, Kovács E., 2008. Főbb kérdések és megoldások a talajlégzés vizsgálatának témakörében, in: Kröel-Dulay, G., Kalapos, T., Mojzes, A. (Eds.), *Talaj-Vegetáció-Klíma Kölcsonhatások*. MTA ÖBKI, Vácrátót, pp. 135–146.
- Luo, Y., Zhou, X., 2006. *Soil respiration and the environment*. Academic Press.
- Nagy, Z., Pintér, K., Czóbel, S., Balogh, J., Horváth, L., Fóti, S., Barcza, Z., Weidinger, T., Csintalan, Z., Dinh, N.Q., Grosz, B., Tuba, Z., 2007. The carbon budget of semi-arid grassland in a wet and a dry year in Hungary. *Agric. Ecosyst. Environ.* 121, 21–29.
- Nagy, Z., Pintér, K., Pavelka, M., Darenová, E., Balogh, J., 2011. Carbon fluxes of surfaces vs. ecosystems: advantages of measuring eddy covariance and soil respiration simultaneously in dry grassland ecosystems. *Biogeosciences* 8, 2523–2534.

- Pavelka, M., Acosta, M., Janouš, D., 2004. A new device for continuous CO<sub>2</sub> flux measurement in forest stand. *Ekol.* 23, 88–100.
- Pumpanen, J., Kolari, P., Ilvesniemi, H., Minkkinen, K., Vesala, T., Niinistö, S., Lohila, A., Larmola, T., Morero, M., Pihlatie, M., Janssens, I., Yuste, J.C., Grünzweig, J.M., Reth, S., Subke, J.-A., Savage, K., Kutsch, W., Østreg, G., Ziegler, W., Anthoni, P., Lindroth, A., Hari, P., 2004. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO<sub>2</sub> efflux. *Agric. For. Meteorol.* 123, 159–176.
- Rossi, R.E., Mulla, D.J., Journel, A.G., Franz, E.H., 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecol. Monogr.* 62, 277–314.
- Ruehr, N.K., Knohl, A., Buchmann, N., 2009. Environmental variables controlling soil respiration on diurnal, seasonal and annual time-scales in a mixed mountain forest in Switzerland. *Biogeochemistry* 98, 153–170.
- Savage, K., Davidson, E. a., Tang, J., 2013. Diel patterns of autotrophic and heterotrophic respiration among phenological stages. *Glob. Chang. Biol.* 19, 1151–1159.
- Stein, A., Ettema, C., 2003. An overview of spatial sampling procedures and experimental design of spatial studies for ecosystem comparisons 94, 31–47.
- Wang, W.J., Zu, Y.G., Wang, H.M., Hirano, T., Takagi, K., Sasa, K., Koike, T., 2005. Effect of collar insertion on soil respiration in a larch forest measured with a LI-6400 soil CO<sub>2</sub> flux system. *J. For. Res.* 10, 57–60.

## Calibration and field test of a new, automated open system to measure soil CO<sub>2</sub> efflux in sandy grassland

M. Papp<sup>1\*</sup>, J. Balogh<sup>2</sup>, K. Pintér<sup>2</sup>, Sz. Fóti<sup>1</sup>, P. Koncz<sup>1</sup>, M. Pavelka<sup>3</sup>, E. Darenova<sup>3</sup>, Z. Nagy<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> MTA-SZIE Plant Ecology Research Group, Szent István University, 2100 Gödöllő, Hungary

<sup>2</sup> Institute of Botany and Ecophysiology, Szent István University, 2100 Gödöllő, Hungary

<sup>3</sup> Czech Globe, Global Change Research Centre AS CR, Brno

\*papp.marianna@mkk.szie.hu

### Summary

Soil CO<sub>2</sub> efflux ( $R_s$ ) is one of the largest component of the terrestrial carbon balance, so it has a strong influence on the sink/source characteristics of ecosystems. Due to the dynamic diurnal and seasonal changes of  $R_s$  it is difficult to describe its annual or daily courses by data from occasional (manual) measurements, while automated systems allow to follow the changes of  $R_s$  quasi-continuously. Continuous measurements are decreasing the uncertainties in the response of  $R_s$  to abiotic (e.g. temperature, soil water content) and biotic (e.g. biomass, photosynthetic carbon uptake) drivers due to the large number of measurements. Continuous measurements provide data for periods when occasional measurements are usually not performed (e.g. during nights or rainy days). Due to the high variability of  $R_s$  during these periods it is crucial to include them in estimating the annual  $R_s$  balance. Commercially available automated soil respiration systems have been developed to perform frequent  $R_s$  measurements. Their disadvantages include the disturbance of the vegetation (regular removal), the potential failure of the opening-closing systems of the chambers, and their associated high cost. The main advantages of the new, open (steady state), automated soil respiration system (SRS) are the minor disturbances caused to the soil structure and to the spatial structure of the vegetation and the opportunity to perform long-term, unattended measurements of soil CO<sub>2</sub> efflux at low cost. The system includes 10 chambers (a number that could be increased), which can be used in various spatial configurations within a 5×5 meters quadrat. Moreover, the probability of technical failure is lower than for other continuous systems due to the simple system structure of the chamber design (no

moving parts). The chamber system for soil respiration measurement was successfully calibrated against known CO<sub>2</sub> effluxes in the laboratory, and proved to perform reliably in the field. When the automatic soil respiration system was tested against a standard soil respiration system (LICOR-6400) in the field for two years, the two system gave very similar results (no significant discrepancy from 1:1 line). The SRS served as a reliable tool for continuous, long-term, unattended automatic measurement of soil CO<sub>2</sub> efflux, and allowed the uncertainty of Rs response to its drivers to be reduced due to a) the large number of measurements and b) the fact that measurements were made in periods (nights, during rainsfall) when measurements are not usually carried out.

*Fig. 1.* Schematic diagram of the automated soil respiration system (SRS) (B: buffer volume, MP: main pump, P: sampling pump, OF: overflow, MFM: mass flowmeters, MV: main valve, V: valves, VH: vent holes, C: chamber with a funnel, Cy: metal cylinder, IRGA: infrared gas analyzer).

*Fig. 2.* Linear correlation between the measured CO<sub>2</sub> efflux and the CO<sub>2</sub> efflux of the calibration tank for each chamber (1-10).

*Fig. 3.* Correlation between the soil respiration values measured by SRS and LICOR-6400 (2012-2013, Bugac). The average soil respiration values and standard deviations are shown on the graph (LICOR n= 5, SRS n=5).

*Fig. 4.* The annual course of the soil respiration at Bugac site measured by SRS (2012-2013). One circle is the average of the measurements in one measurement cycle.

*Fig. 5.* Effect of abiotic drivers (T<sub>s</sub>: soil temperature, SWC: soil water content) on (R<sub>s</sub>) soil respiration (2011-2012, Bugac). One circle is the average of the measurements in one measurement cycle.