

Die CO₂-Konzentration der Bodenluft in einer Rasenfläche – Spiegel des biologischen oder des physikalischen Bodenzustands?

Fründ, H.-C.

Zusammenfassung

Die CO₂-Konzentration der Bodenluft gilt als empfindlicher Indikator für durch Bodenverdichtung und/oder Nässe verursachte Bodenbelüftungsstörungen. Es wird eine Untersuchung vorgestellt, bei der von März bis Oktober 2017 kontinuierlich die CO₂-Konzentration in sieben Zentimeter und zwanzig Zentimeter Bodentiefe erfasst wurde. Die Messwerte werden mit dem Temperaturverlauf, den Niederschlagsereignissen und der von Juli bis Oktober gemessenen Bodenfeuchte in Beziehung gesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die CO₂-Konzentration der Bodenluft vor allem durch die Bodenfeuchte beeinflusst wird. Ein Niederschlagsereignis wirkt sich mit einer Verzögerung von drei bis fünf Tagen auf die CO₂-Konzentration der Bodenluft aus. Die CO₂-Konzentration der Bodenluft erreichte in der Rasenfläche Maximalwerte über 3 Vol.-% CO₂. Eine Trampelpfad-Verdichtung wurde im Frühjahr durch höhere CO₂-Konzentration der Bodenluft angezeigt. Der Effekt verschwand aber im weiteren Untersuchungsverlauf. Die Nähe eines Baumes wirkte sich deutlich auf die Bodenfeuchte und die CO₂-Konzentration der Bodenluft aus.

Summary

The CO₂ concentration in the soil air is regarded as a sensible indicator of aeration disturbances in the ground due to compaction or wetness. A study made from March to October 2017 registered steadily the CO₂ concentration in the soil in a depth of 7 cm as well as a depth of 20 cm. The measurement data are related to the temperature profile, the precipitation as well as the ground humidity measured from July to October. The results reveal that the CO₂ concentration in the soil air depends principally on the soil humidity. A rainfall can influence the CO₂ concentration in the soil air three to five days later. The CO₂ concentration in the soil air below a lawn can reach more than 3 Vol.-%. A soil compaction from trampling was indicated in spring with a higher concentration of CO₂ in the soil air. However, this effect disappeared later on. The proximity of a tree has an evident impact on the soil humidity as well as the CO₂ concentration of the air in the soil.

Résumé

La concentration en gaz carbonique dans l'air directement au-dessus du sol est un indicateur révélateur de façon précise les difficultés de ventilation de ces sols dues aux tassements et à l'humidité. Dans ce texte on présente un test dans lequel on a mesuré sans interruption de mars à octobre 2017 la concentration en gaz carbonique dans un sol à 7 cm de profondeur et aussi à 20 cm de profondeur. Les valeurs mesurées ont été mises en corrélation avec la courbe de température, les précipitations et l'humidité du sol révélées de juillet à octobre. Les résultats montrent que la concentration en gaz carbonique dans l'air au-dessus du sol est surtout influencée par l'humidité du sol. Les précipitations ont un effet retardateur de trois à cinq jours sur le taux de concentration en gaz carbonique des sols humides. La concentration en gaz carbonique dans l'air dessous d'une surface gazonnée ne dépasse pas 3 Vol.-% au maximum. Au printemps une concentration plus élevée en gaz carbonique dans l'air au dessus du sol a révélé un tassement du sentier. Ce tassement a disparu plus tard au cours du test. La proximité d'un arbre a un effet certain sur l'humidité du sol et aussi sur la concentration d'humidité dans le sol.

Einleitung

Böden zeichnen sich durch ein Porensystem aus, in dem feste Substanz, Wasser und Luft nebeneinander existieren und in einem ständigen Wechselspiel miteinander stehen. In diesem „Drei-Phasen-System“ sind die engen und mittleren Poren des Bodens (< 20 µm) in der Regel mit Wasser gefüllt, während die Grobporen > 50 µm die Bodenluft (Gasphase) enthalten. Die Zusammensetzung der Bodenluft kann erheblich von der der atmosphärischen Luft abweichen. Dabei spielt der Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre eine entscheidende Rolle für die ökologischen Funktionen im Boden. Die meisten Bodenorganismen (Pflanzenwurzeln, Pilze, Tiere, viele Bakterien) betreiben eine aerobe Atmung mit Verbrauch von Sauerstoff und Produktion von CO₂. Der dafür benötigte Sauerstoff muss ständig aus der Atmosphäre durch die Bodenporen nachgeliefert werden. Andererseits muss das im Boden produzierte CO₂ abgeführt werden, denn zu hohe Konzentrationen wirken schädigend (STANGE et al., 2013). In der atmosphärischen Luft hat Sauerstoff einen konstanten Anteil von 21 Volumenprozent und Kohlendioxid einen Anteil von 0,05 Volumenprozent. In der Bodenluft sind die Konzentrationen von Sauerstoff und CO₂ sehr variabel. Je nach der Menge an luftdurchlässigen Poren und der Atmungsintensität im Boden kann die Sauerstoffkonzentration bis auf nahe Null heruntergehen und die CO₂-Konzentration bis auf mehr als 10 Volumenprozent ansteigen (BLUME et al., 2010; GOUTAL et al., 2012; MORHARD, 2004).

Die Zusammensetzung der Bodenluft ist deshalb ein sehr guter Indikator für den ökologischen Bodenzustand. Wird ein Boden zum Beispiel durch Befahren oder Betreten verdichtet, so reduziert sich die Menge der luftleitenden Grobporen und der Gasaustausch mit der Atmosphäre verlangsamt sich. Mehrfach wurde die Bodenverdichtung durch Forstmaschinen anhand erhöhter CO₂-Konzentrationen in der Bodenluft nachgewiesen (AMANN und SCHÄFFER, 2008; EBELING et al., 2016; FRÜND und AVERDIEK, 2016).

Bodenverdichtung ist nicht der einzige Faktor, durch den in der Bodenluft Sauerstoff ab- und Kohlendioxid zunehmen kann. Bei einer sehr hohen Atmungsrate im Boden (z. B. wenn organische Abfälle vergraben wurden) kann die Transportleistung der luftführenden Poren

unter dem Bedarf bleiben mit der Folge absinkender Sauerstoff- und ansteigender CO₂-Konzentrationen. Wenn der Boden (z. B. nach Regenfällen) sehr viel Wasser enthält, füllen sich auch die Grobporen mit Wasser und stehen nicht mehr für den Gasaustausch zur Verfügung. Die dann eintretende Veränderung der Bodenluft-Zusammensetzung wird von einigen Biologen als Auslöser dafür gesehen, dass Regenwürmer manchmal nach Regenfällen den Boden verlassen.

In der hier vorgestellten Untersuchung soll das Zusammenwirken dieser verschiedenen Einflussfaktoren betrachtet werden. Dazu wurde auf einer Rasenfläche die CO₂-Konzentration der Bodenluft in zwei Tiefen (7 cm, 20 cm) von März bis Oktober 2017 kontinuierlich gemessen. Die Messwerte werden mit dem Temperaturverlauf, den Niederschlagsereignissen und der Bodenfeuchte in Beziehung gesetzt.

Im Einzelnen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie ist das Zusammenwirken von Niederschlägen, Bodenfeuchte und Temperatur auf die CO₂-Konzentration der Bodenluft?
- Ist die CO₂-Konzentration in der Bodenluft unter Rasen generell höher als in einem Waldboden?
- Wie wirkt sich die Nähe eines Baumes auf die Verhältnisse in der Rasenfläche aus?



Abb. 1: Untersuchungsfläche am 21.03.2017. Die Positionen der CO₂-Sensoren sind als weiße Punkte im Mittelgrund erkennbar. A bis D markiert die vier Sensorreihen. Die Sensoren der Reihe A sind bis auf einen bereits vergraben. Der winterliche Trampelpfad im Bereich der Sensorreihe D ist als leichte Verdunklung der Grasnarbe erkennbar. Der „Wald“-Vergleichsstandort am hinteren Gartenrand ist durch W markiert.

(Alle Abb. und Tab. von H.-C. Fründ.)

- Wie wirkt sich ein Trampelpfad im Rasen auf die CO₂-Konzentration der Bodenluft aus?

Material und Methoden

Untersuchungsstandort ist eine 1954 angelegte Rasenfläche in einem Hausgarten in Osnabrück (Abbildung 1).

Der Rasen wird nicht gedüngt und in der Vegetationszeit alle sieben bis vierzehn Tage gemäht. Das Mähgut verbleibt in der Regel als Mulch auf der Fläche. Östlich der Rasenfläche steht eine ca. zwölf Meter hohe Schwarzkiefer (*Pinus nigra*), deren Krone über die Rasenfläche ragt. Als „Wald“ wurde ein Teilbereich am hinteren Rand des Hausgartens untersucht, der von einer benachbarten Birke (*Betula pendula*) beschattet wird und auf dem sich ca. drei Meter hohe, fünf Jahre alte Ahornbäume (*Acer pseudoplatanus*) befinden (Abbildung 2).

Die Laubstreu auf dem Boden wird dort im Herbst durch anderswo abgeharktes Eichen- und Roßkastanienlaub vermehrt.

Der Boden ist eine Braunerde aus lehmigem Sand (SI3) auf Grundmoräne. Der pH ist 5,1. Der Ah-Horizont ist über 10 cm mächtig. Wegen intensiver Regenwurmmaktivität läuft der Ah undeutlich nach unten aus. Auf der Bodenoberfläche befindet sich eine ca. zwei Zentimeter mächtige Lage aus Rasenfz und Moos.



Abb. 2: Vergleichsstandort W.

Für die Messung der CO₂-Konzentration in der Bodenluft wurden Messeinheiten mit einem NDIR-Sensor verwendet. Sie sind in FRÜND und AVERDIEK (2016) näher beschrieben. Auf der Rasenfläche wurden vier Messreihen (A bis D) eingerichtet. In jeder Reihe befanden sich sieben Sensoren im Abstand von einem Meter. Die Sensortiefe wechselte jeweils zwischen 7 cm und 20 cm (Nr. 1, 3, 5, 7 in 7 cm; Nr. 2, 4, 6 in 20 cm Bodentiefe). Reihe A war ungefähr ein Meter und Reihe B etwa drei Meter vom Rand des Rasens entfernt. Die Kronenprojektion der benachbarten Kiefer endete bei Reihe B. Reihe D befand sich auf einem im März deutlich erkennbaren Trampelpfad, der im Winter für den Transport von Kompost und Brennholz zwischen Haus und Garten begangen und mit einer Schubkarre befahren wurde. Um Bodenbeeinträchtigungen zu vermeiden, wurden während der Installation der Sensoren Bretter untergelegt (in Abbildung 1 bei Reihe A zu sehen). Für die Installation des Sensors in 7 cm Bodentiefe wurde eine kleine Grube ausgehoben, ca. 20 cm x 10 cm x 7 cm tief. An einer Stirnwand dieser Grube wurde mit einem kleinen Bodenbohrer (9,5 mm Durchmesser) in einem Winkel von ca. 13° zur Bodenoberfläche ein Loch vorgestochen. Die Sonde des Sensors wurde dicht schließend in das vorgebohrte Loch eingeführt, so dass die Perforation sich in ungefähr 7 cm Bodentiefe befand. Anschließend wurde die Grube mit dem Sensorgehäuse wieder mit Boden verfüllt und mit einer Paste aus nassem Lössboden eingeschlammmt. Über dem Messpunkt lag so eine ungestörte Bodenoberfläche (Abbildung 3).

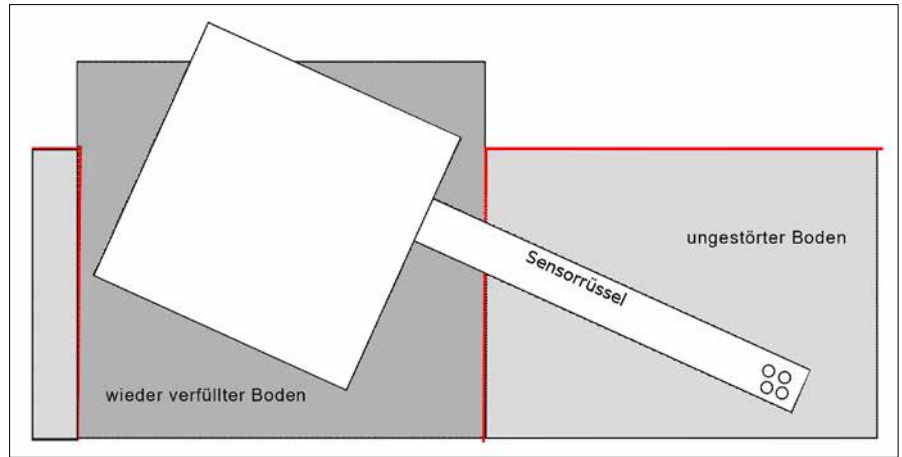


Abb. 3: Position der CO₂-Sonden in 7 cm Bodentiefe.

Die Installation der Sensoren in 20 cm Tiefe erfolgte so, dass zuerst ein Rohr mit 61 mm Außendurchmesser in einem Winkel von 80° zur Geländeoberkante 13 cm tief in den Boden geschlagen wurde. Anschließend wurde mit Hilfe eines 9,5 mm starken Rohrs in einer Führungsschablone ein weiteres Loch bis auf ca. 21 cm Tiefe unter GOK eingeschlagen, in das der Sensorrüssel des CO₂-Sensors eingeführt wurde. Das Loch oberhalb des Sensorgehäuses wurde mit Bodenmaterial eingeebnet. Um den Schaft des Sensorrüssels gewickeltes Isolierband verhinderte einen Gasaustausch-Nebenschluss an der Außenseite des Sensorrüssels. Durch den 80°-Winkel zur Geländeoberkante wird erreicht, dass sich die Messzone des Sensors über einer ungestörten Bodenoberfläche befindet.

Die Temperatur wurde mit 0,1 °C Genauigkeit im Gehäuse der CO₂-Sensoren erfasst. Die Tiefe im Bodenprofil betrug ca. 7 cm bei den in 20 cm Tiefe messenden CO₂-Sensoren und ca. 3 cm bei den in 7 cm Tiefe messenden CO₂-Sensoren.

Die Bodenfeuchte wurde ab Juli mit EC-5 Sensoren der Firma Decagon (jetzt: Meter-Group) gemessen (Abbildung 4).

Die Sensoren messen den volumetrischen Wassergehalt nach dem FDR-Prinzip (Frequency-Domain-Reflectance). An drei Standorten waren jeweils zwei Sonden in 7 cm Tiefe und zwei Sonden in 20 cm Tiefe. Standort K: Rasen nahe Kiefer zwischen den CO₂-Messreihen A und B. Standort N: Rasen zwischen den CO₂-Messreihen C und D. Standort W („Wald“). Der Abstand zwischen den Grablöchern betrug zwei Meter.

Niederschlagsdaten wurden von einer privat betriebenen zwei Kilometer entfernten Wetterstation zur Verfügung gestellt (www.westerbergwetter.de, Herr Hauke Peinz).

Für die Datenauswertung wurden die stündlich erhobenen Messwerte zu Tageskennwerten zusammengefasst. Die CO₂-Messwerte schlugen im September und Oktober mehrmals während der nächtlichen Abkühlung stark nach oben aus. In diesen Fällen täuschte vermutlich Wasserdampf bzw. kondensierende Luftfeuchte eine hohe CO₂-Konzentration vor. Um die störenden Messwertpeaks zu vermeiden, wird das Tagesminimum der CO₂-Konzentration als Tageskennwert verwendet. Bei Temperatur und Bodenfeuchte wurde jeweils der Tagesmittelwert als Tageskennwert berechnet.



Abb. 4: Position von vier Grablöchern für EC5-Sensoren. In jedem Grabloch wurde jeweils ein Sensor in 7 cm und in 20 cm Tiefe horizontal eingestochen. Aufnahme am 5.7.2017.

Ergebnisse

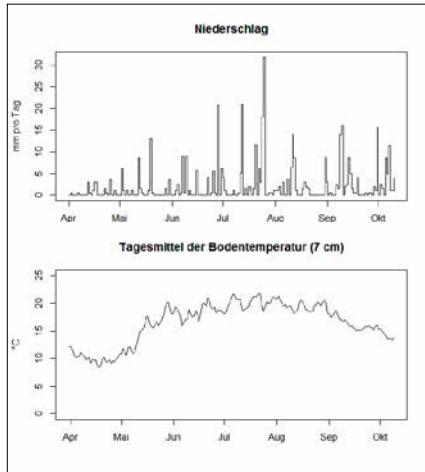


Abb. 5: Niederschlags-Tagessummen und Bodentemperaturen vom 01.04.-10.10.2017.

Abbildung 5 zeigt den Verlauf der Niederschläge und der Bodentemperatur in der Rasenfläche in 7 cm Tiefe im Beobachtungszeitraum 1. April bis 10. Oktober 2017. Es ist zu erkennen, dass der April 2017 relativ kühl und niederschlagsarm war. Im Monat Juli gab es drei Starkregenereignisse, und auch die Monate August bis Oktober waren, abgesehen von einer Trockenphase in der zweiten Augushälfte, relativ regenreich. Ab dem 11. Mai stiegen die Bodentemperaturen in 7 cm Tiefe der Rasenfläche an und blieben vom 13. Mai bis 16. September über 15 °C (Spitzenwert 22,8 °C am 07.07.).

Der Verlauf der CO₂-Konzentration zeigt ein anderes Bild (Abbildung 6).

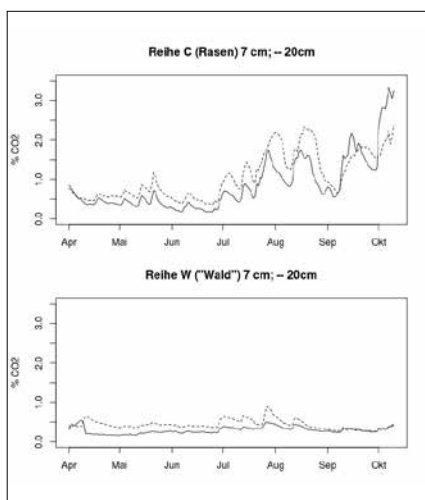


Abb. 6: CO₂-Konzentrationsverlauf in zwei Bodentiefen an den Standorten Rasen (Reihe C) und „Wald“ (W) 01.04.-10.10.2017. Starke durchgehende Linie = 7 cm Tiefe; dünne gestrichelte Linie = 20 cm Tiefe.

Die Werte blieben bis Ende Juni unter 1 % CO₂. Von Juli bis Oktober stiegen die CO₂-Konzentrationen im Rasen mit starken Fluktuationen an bis auf > 3 % CO₂ im Oktober. Anstiege und Maximalwerte der CO₂-Konzentration in der Bodenluft zeigen sich deutlich nach dem Auftreten von Starkregenereignissen Ende Juli, Mitte August und Anfang September. Die CO₂-Konzentration in 20 cm Tiefe war überwiegend – aber nicht immer – höher als in 7 cm Tiefe. Der Unterschied zwischen den Bodentiefen verstärkte sich während der starken Fluktuationen im Juli und August. In dieser Zeit trat der CO₂-Maximalwert in 20 cm Tiefe später auf als in 7 cm Tiefe und erreichte außerdem höhere Konzentrationswerte. Niederschlagsfreie Perioden sind jeweils von einem Absinken der CO₂-Konzentration in der Bodenluft begleitet.

Im Boden unter der Baumpflanzung mit Streuauflage („Wald“) blieb die CO₂-Konzentration durchgehend niedrig (unter 1 % CO₂). Im Juli nach den Starkregen ist dort eine Erhöhung der CO₂-Konzentration besonders in 20 cm Tiefe zu erkennen.

Ab Juli wurde der volumetrische Wassergehalt des Bodens an drei Stellen und in zwei Tiefen erfasst. Die Verlaufskurven in der Rasenfläche bis zum Ende des Beobachtungszeitraums sind in Abbildung 7 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die beiden Sensoren an jeder Position in 7 cm Tiefe in ihren Messwerten etwas stärker voneinander abwichen, als die Sen-

soren in 20 cm Tiefe. Dennoch ergibt sich ein recht einheitliches Verlaufsbild, in dem das Wechselspiel von Regenereignis und Wasserentzug aus dem Boden gut erkennbar ist. Der Bodenfeuchteverlauf am Standort W ähnelte dem am Standort K und wird hier nicht dargestellt. An allen Standorten ist ein Trend abnehmender Bodenfeuchte von August bis September erkennbar, der durch Starkregen Mitte August mehr oder weniger unterbrochen ist. Der Regeneffekt ist in Bodentiefe 7 cm deutlicher als in Bodentiefe 20 cm. Der Austrocknungstrend ist am von der Kiefer überschirmten Standort K deutlicher als in der offenen Rasenfläche (N). Im Gesamtvergleich der drei Standorte ergeben sich deutlich unterschiedliche Bodenfeuchten in der Reihenfolge N > K > W (Tabelle 1).

Standort	Vol-% Wasser in Tiefe	
	7 cm	20 cm
N (offener Rasen)	39 (29...45)	28 (22...34)
K (überschirmter Rasen)	24 (15...36)	20 (16...26)
W („Wald“)	11 (7,5...17)	14 (10...17)

Tab. 1: Kennwerte des volumetrischen Wassergehalts (cm³/cm³ x 100) an den untersuchten Standorten und Bodentiefen im Zeitraum 06.07.-11.10.2017. Angegeben ist jeweils der Medianwert und (in Klammern) der Wertebereich, in dem 75 % aller Messwerte liegen.

Korrelationen zwischen den Messgrößen: Die Tageskennwerte der Bodentemperatur und der CO₂-Konzentration in 7 cm Tiefe zeigten in der Rasenfläche keinen korrelativen Zusammenhang (r =

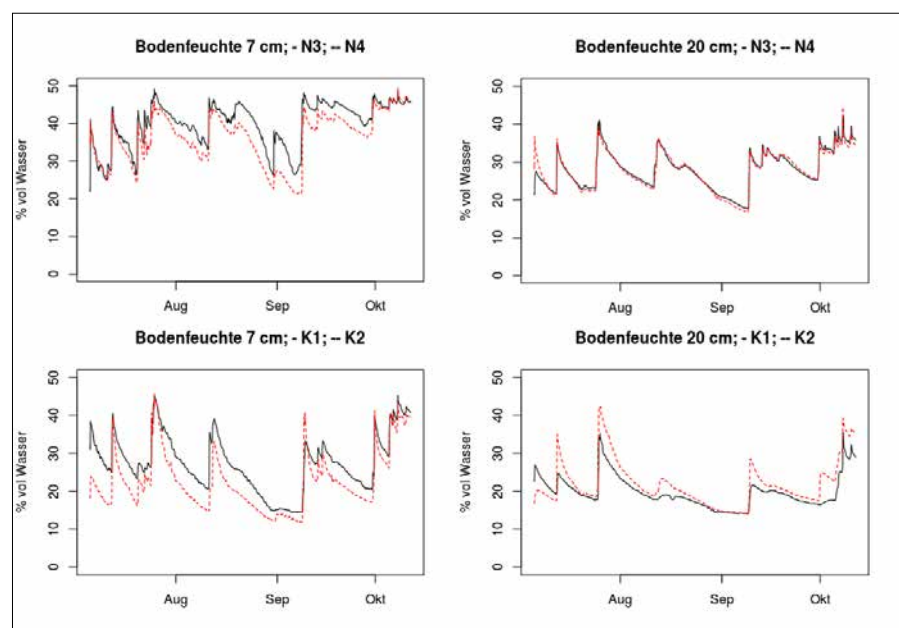


Abb. 7: Verlauf der volumetrischen Bodenfeuchte in 7 cm und 20 cm Bodentiefe am offenen Rasen (N) und dem von der Kiefer überschirmten Rasen (K) vom 06.07.-11.10.2017. Beide FDR-Sensoren an jeder Position sind dargestellt.

0,05), wohl aber im „Wald“ ($r = 0,58$). Ein schwacher aber statistisch signifikanter Zusammenhang zeigte sich zwischen der CO₂-Konzentration der Bodenluft in 20 cm Tiefe und der Bodentemperatur ($r = 0,33$). Im Gegensatz dazu wurde ein enger Zusammenhang zwischen der volumetrischen Bodenfeuchte und der CO₂-Konzentration in der Bodenluft gefunden ($r = 0,81$ in 7 cm Tiefe; $r = 0,71$ in 20 cm Tiefe). Ein Niederschlagsereignis wirkt sich erst mit zeitlicher Verzögerung auf den Boden aus.

Regen vor	Korrelationskoeff. Niederschlag zu ...			
	Wassergehalt		CO ₂ -Konz.	
	7 cm	20 cm	7 cm	20 cm
aktuell	0,19	0,09	0,09	0,04
1 Tag	0,33	0,36	0,21	0,12
2 Tage	0,31	0,35	0,27	0,18
3 Tage	0,28	0,32	0,30	0,22
4 Tage	0,22	0,24	0,25	0,23
5 Tage	0,19	0,27	0,23	0,25

Tab. 2: Pearson-Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen der Niederschlags-Tagessumme und dem Tageskennwert für den Wassergehalt bzw. die CO₂-Konzentration in 7 cm und 20 cm Tiefe am Tag des Niederschlags und bis zu fünf Tage nach dem Niederschlagsereignis. Die Maxima in einer Spalte sind fett gedruckt.

Tabelle 2 zeigt, dass sich die maximale Wirkung des Niederschlags auf die Bodenfeuchte nach einem Tag einstellt. Die maximale Wirkung auf die CO₂-Konzentration tritt dagegen nach drei Tagen bzw. bis zu fünf Tagen in 20 cm Tiefe auf.

CO₂-Bodenluftkonzentration bei verschiedenen Standortbedingungen: Ein Vergleich der CO₂-Bodenluftkonzentrationen an den verschiedenen Untersuchungsstellen ist in Abbildung 8 dargestellt.

Die gestrichelte 1 %-Linie kennzeichnet die CO₂-Konzentration in der oberen Bodenluft, oberhalb derer in Buchenwäldern eine Bodenstörung durch Befahren angenommen werden kann (FRÜND und AVERDIEK, 2016; WELTECKE und GAERTIG, 2011). Der zeitliche Verlauf wurde in drei Zweimonats-Zeiträume zusammengefasst. Deutlich ist zu erkennen, dass besonders im April-Mai und im September-Oktober die CO₂-Konzentration der Bodenluft an den Messpunkten mit Baumeinfluss niedriger war als im offenen Rasenbereich. Das gilt sowohl für den „Wald“ mit einer Streuauflage und sehr lockerem und trockenem Boden als auch für die Untersuchungsreihen A und B auf der Rasenfläche, die unter dem Einfluss der vier bis sechs Meter entfernten Kiefer stehen. Im Vergleich der Messreihen C und D auf offener Rasenfläche fällt der winterliche Trampelpfad (Reihe D) im April-Mai durch deutlich höhere CO₂-Konzentrationen auf. Im Juni-Juli und im August-September ist der Unterschied zwischen Reihe C und Reihe D weitgehend verschwunden. Bei den beiden durch die Kiefer überschirmten Messreihen A und B wurden in Reihe A fast durchgehend niedrigere CO₂-Konzentrationen gemessen als in Reihe B, die 2 m weiter vom Stamm

des Baumes entfernt war. Ab Mitte September nahm bei einem einzelnen Sensor in Reihe A (7 cm Tiefe) die Bodenluft-CO₂-Konzentration kontinuierlich zu bis auf 4,2 % CO₂ am Ende der Beobachtungszeit Mitte Oktober. Das erklärt die vielen Ausreißer im Boxplot der Reihe A für August-September. Ab Ende September fielen im Umfeld dieses Sensors Fruchtkörper des Pilzes Rötlicher Lacktrichterling (*Laccaria laccata*) und einer weiteren unbestimmten Art auf.

Diskussion

Wirkung von Regen und Temperatur auf die CO₂-Konzentration: Die CO₂-Konzentration in der Bodenluft ist Ausdruck eines Fließgleichgewichts zwischen der biogenen CO₂-Produktion im Zuge der Boden- und Wurzelatmung und der Abfuhr über den Konzentrationsausgleich mit der Atmosphärenluft. Die Geschwindigkeit des Konzentrationsausgleichs wird vor allem von der Luftleitfähigkeit des Porensystems im Boden gesteuert. Die Bodenatmung (CO₂-Produktion) als Stoffwechselprozess ist stark temperaturabhängig. Der Q10 gibt an, um welchen Faktor sich die Geschwindigkeit eines Stoffwechselprozesses bzw. einer chemischen Reaktion steigert, wenn sich die Temperatur um 10 °C erhöht. Für die Bodenatmung werden Q10-Werte von 2 bis 2,4 berichtet (OTTOW, 2011). Ein Temperatureinfluss auf die CO₂-Konzentration im Boden der Rasenfläche war in unserem Fall nicht erkennbar.

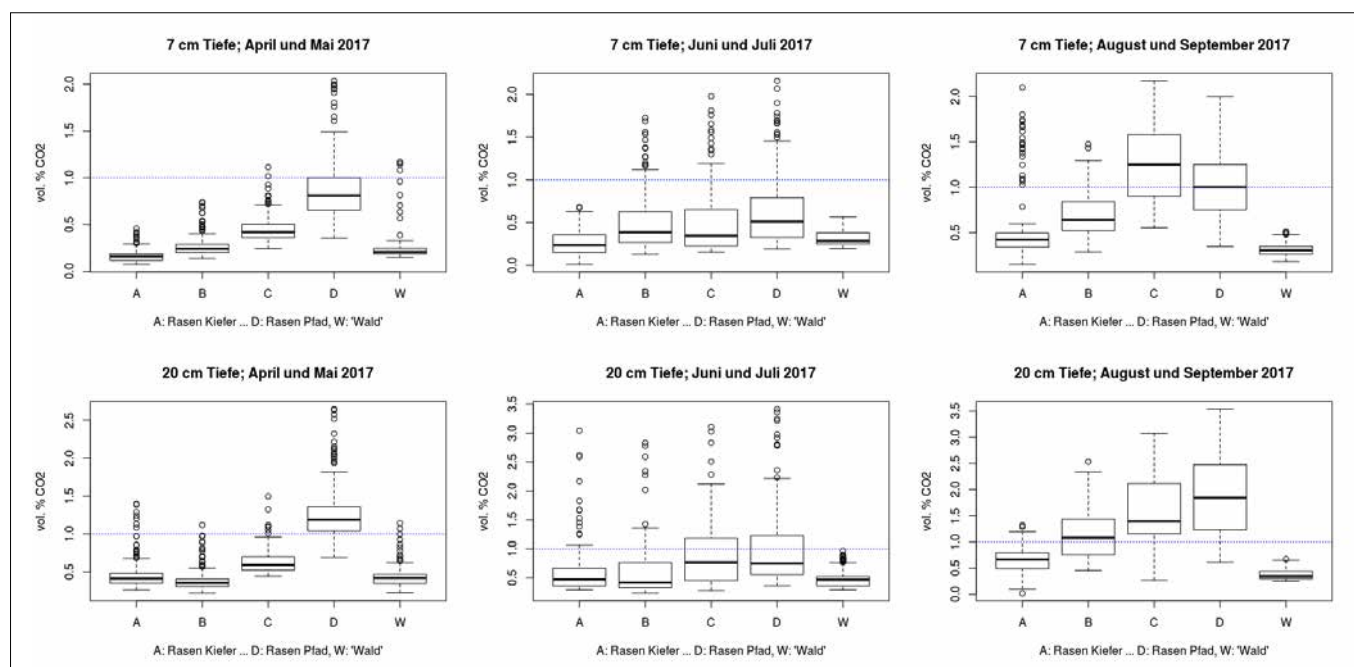


Abb. 8: Vergleich der CO₂-Bodenluftkonzentration in den fünf Untersuchungsreihen in drei Zweimonatszeiträumen. Die Boxplots zeigen den Median und die Quartile. Ausreißer sind als Punkte dargestellt. Die gepunktete waagerechte Linie kennzeichnet den Wert 1 % CO₂.

Dies spricht dafür, dass Schwankungen der CO₂-Produktion in der vorliegenden Beobachtungsreihe keinen wesentlichen Einfluss auf die Konzentration des CO₂ in der Bodenluft hatten. Das lenkt den Blick auf die zweite Stellgröße, die CO₂-Abfuhr in die Atmosphäre. Der Austausch zwischen Bodenluft und Atmosphäre geschieht als Diffusion durch die luftführenden Grobporen im Boden. Je größer die Luftleitfähigkeit des Porensystems ist, desto schneller werden Konzentrationsdifferenzen zwischen Bodenluft und Atmosphäre ausgeglichen. Sind die Poren mit Wasser gefüllt, ist die Diffusionsgeschwindigkeit ungefähr um den Faktor 10.000 reduziert. Aber auch die Menge der Grobporen im Boden ist variabel: Wird ein Boden durch Betreten oder Befahren verdichtet, so werden vor allem die groben Poren zusammengedrückt und reduziert. Andererseits werden Grobporen durch das Wurzelwachstum und die Tätigkeit bodenwühlender Tiere (Regenwürmer, Ameisen u. a.) neu geschaffen. Auch Schrumpfungsrisse in austrocknenden Böden tragen zur Entstehung neuer Grobporen bei.

In der untersuchten Rasenfläche steigt die CO₂-Konzentration der Bodenluft regelmäßig nach ergiebigen Regenfällen. Der Anstieg dauert in der Regel drei Tage im oberen Tiefenbereich und fünf Tage in 20 cm Bodentiefe. Danach fällt die CO₂-Konzentration wieder ab, wenn es nicht zu erneuten Niederschlägen kommt. Demnach scheint die CO₂-Konzentration der Bodenluft im Wesentlichen von der Wasserfüllung des Porensystems gesteuert zu werden.

Nach unseren Beobachtungen dauert es einen Tag, bis nach einem starken Regen die Bodenporen mit Wasser gefüllt und damit für den Luftaustausch weitgehend verschlossen sind. Danach sammelt sich das durch Mikrogen- und Wurzelatmung produzierte CO₂ im Boden zwei bis vier Tage lang an, bis sich ein neues Fließgleichgewicht einstellt oder die Poren durch Wasserentzug wieder geöffnet werden.

Bei welchem Bodenwassergehalt kommt der direkte Luftaustausch des Bodens vollständig zum Erliegen? Das ist der Fall, wenn das gesamte Porenvolumen mit Wasser gefüllt ist. Die Größe des Gesamtporenvolumens ist abhängig von der Körnung (Bodenart) und der Lagerungsdichte. In der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5, 2005) wird für die vorliegende Bodenart SI3 ein Gesamtporenvolumen

von 27 % bei sehr dicht gelagertem bis 40 % bei sehr locker gelagertem Boden genannt. Die in dieser Untersuchung gewonnenen Messwerte der Bodenfeuchte sind mit Vorsicht zu behandeln, weil die FDR-Sonden nicht kalibriert wurden. Trotzdem legt ein Vergleich der oben genannten Gesamtporenvolumina mit den gemessenen Wassergehalten (Abbildung 7) nahe, dass zumindest in 7 cm Tiefe im Rasen der vollständige Porenverschluss durch Wasser mehrmals erreicht war.

In diesem Zusammenhang sind die Beobachtungen von GOUTAL et al. (2012) an einem Feldversuch interessant, bei dem die Wirkung des Befahrens mit schweren Maschinen auf einen schluffigen Waldboden geprüft wurde. GOUTAL et al. (2012) stellten fest, dass die CO₂-Konzentration der Bodenluft in der unverdichteten Kontrollfläche signifikant mit der Bodentemperatur korrelierte. In den verdichteten Testflächen gab es jedoch nur einen hoch signifikanten Zusammenhang mit der Bodenfeuchte im Oberboden und nicht mit der Bodentemperatur. Auch WELSCH und HORNBERGER (2004) kommen zu dem Schluss, dass in der Vegetationszeit der Wassergehalt des Bodens die entscheidende Steuergröße für Bodenatmung und Boden-CO₂-Konzentration in einem Waldgebiet in Virginia (USA) ist. Wenn also der Anteil der wassergefüllten Bodenporen ein kritisches Maß erreicht, überwiegt der Wassereffekt den Temperatureffekt. Das ist nicht erstaunlich, wenn man bedenkt, dass durch Wasserfüllung der Grobporen die Austauschrate auf ein Zehntausendstel reduziert werden kann, ein Absinken der Temperatur um 10 °C aber nur eine Halbierung der CO₂-Produktionsrate bewirkt.

Welchen Einfluss haben Bäume auf die CO₂-Konzentration im Boden? In nicht befahrenen Waldböden bleibt die CO₂-Konzentration in fünf bis sieben Zentimeter Tiefe in der Regel weit unter 1 % (BEKELE et al., 2007; GAERTIG, 2001; GOUTAL et al., 2012; HIRANO et al., 2003). Dem entsprechen die am Standort W („Wald“) gemessenen Werte, obwohl dem in Abbildung 2 gezeigten Standort sicherlich viele Merkmale eines Waldes fehlen. Waldähnlich sind aber die Bodenbedeckung mit einer Streuauflage, ein sehr locker gelagerter Oberboden und die Überschildung durch ein Blätterdach während der Vegetationszeit. Die CO₂-Konzentration im Boden unter Rasen und Grünland wurde nur selten untersucht. Landwirtschaftliches Grünland in der Schweiz

hatte in 10 cm Bodentiefe bis zu 3 % CO₂ in der Bodenluft (FLECHARD et al., 2007). Der hohe Wert trat im feuchten Sommer 2002 auf. In trockenen Zeiten blieben die Werte unter 1 % CO₂. In Grünland in England wurden in 15-30 cm Tiefe bis zu 2,9 % CO₂ in der Bodenluft gemessen (PATIL et al., 2010). In einem Golfplatz in South Carolina wurde im Sommer in 9 cm und 20 cm Tiefe 0,2 bis 0,7 % CO₂ gemessen (BUNNELL et al., 2004). FOERSTER et al. (2012) fanden bei Einzelmessungen im Rasen einer städtischen Grünanlage 1,3 bis 1,5 % CO₂ und im Umfeld einer stark frequentierten Gartenbank 3,3 % CO₂ in 10 cm Bodentiefe. Die hier vorgestellten Messwerte von der Rasenfläche passen gut in dieses Bild und legen den Schluss nahe, dass unter baumferner Grasvegetation CO₂-Konzentrationen zwischen 1 % und 3 % CO₂ in der Bodenluft nicht ungewöhnlich sind. Gewächshausversuche von BUNNELL et al. (2002) legen nahe, dass bei Straußgras (*Agrostis stolonifera*) 2,5 % CO₂ in der Bodenluft bereits eine Hemmung des Wurzelwachstums bewirkt.

Bäume haben einen deutlichen Einfluss auf den Wassergehalt des Bodens und damit auch auf die Zusammensetzung der Bodenluft. Das zeigt sich bei der hier vorgestellten Untersuchung in den Untersuchungsreihen A und B im Einflussbereich einer Schwarzkiefer. Ein Baum pumpt Wasser aus dem Boden, das über die Blätter an die Atmosphäre abgegeben wird (jährlich 280-300 l/m², ZIMMERMANN et al., 2008). Darüber hinaus hält er in der Baumkrone einen großen Anteil des Niederschlags zurück, der dann gar nicht auf den Boden gelangt („Interzeption“, bei Kiefern mit ca. 280 l/m² besonders hoch; ZIMMERMANN et al., 2008). Ein Vergleich der Bodenfeuchte-Verlaufskurven in Abbildung 7 macht deutlich, wie die Kiefer das „Ankommen“ der Regenfälle im Boden beeinflusst hat. Wenn es sehr trocken wird, kann der Gasaustausch noch durch einen weiteren Effekt länger aufrecht erhalten werden: trockener Humus ist Wasser abweisend (schwer benetzbar). Das Wasser dringt dann ungleichmäßig in den Boden ein. Der Gasaustausch kann über verbleibende Trockenzone fortgesetzt werden.

Wie hat sich der Trampelpfad im Rasen ausgewirkt? Verkneten und Verdichten des Bodens führt zum Verlust von Grobporen und macht sich in erhöhten CO₂-Konzentrationen der Bodenluft bemerkbar (BLUME et al.,

2010). Das zeigt sich in der untersuchten Rasenfläche erwartungsgemäß in der Messreihe D, die unter einem winterlichen Trampelpfad angelegt worden war. Bemerkenswert ist aber, dass der Unterschied zwischen den Reihen C (normal betreten) und D (Trampelpfad) im weiteren Verlauf des Jahres zurückgegangen ist. Gleichzeitig ist auch die visuelle Auffälligkeit des Trampelpfades verschwunden (vgl. Abbildung 1 mit Abbildung 4). Dies kann als Ergebnis einer Strukturregeneration des verdichteten Bodens gedeutet werden. Die Wühltätigkeit der den Rasen zahlreich besiedelnden Regenwürmer wie auch die beständige Erneuerung der Pflanzenwurzeln unter dem Rasen kommen für diese Wiederherstellung der Bodenstruktur in Betracht.

Schlussfolgerung

In dem Boden der Rasenfläche spiegelt die Konzentration des CO₂ vor allem den Wassergehalt, also den physikalischen Bodenzustand wieder. Schwankungen der biologischen Aktivität, d. h. der CO₂-Produktion, werden anscheinend von der wasserbedingten Dynamik der Luftleitfähigkeit im Boden überdeckt. Bäume haben einen starken Einfluss auf die CO₂-Konzentration der Bodenluft, weil sie dem Boden Wasser entziehen und durch Interzeption und durch die Laubstreudecke das Eindringen von Niederschlag in den Boden abpuffern. Der für Waldböden aufgestellte Schwellenwert 1 % CO₂ als Schadensindikator ist für Rasen- und Graslandböden nicht anwendbar, da er auch ohne Schadverdichtung häufig überschritten wird. Trittsverdichtungen auf Rasenflächen können sich in der ersten Hälfte der Vegetationsperiode regenerieren.

Literatur

- AMANN, S. und J. SCHÄFFER, 2008: Wie heterogen ist die natürliche Waldbodenstruktur? AFZ - Der Wald, Heft 6/2008, 298-299.
- BEKELE, A., L. KELLMAN and H. BELTRAMI, 2007: Soil Profile CO₂ concentrations in forested and clear cut sites in Nova Scotia, Canada. In: Forest Ecology and Management 242 (2-3), 587-597. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.01.088.
- BLUME, H.P. et al., 2010: Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- BUNNELL, B.T., L.B. MCCARTY, R.B. DODD and H.S. HILL, 2002: Creeping bentgrass growth response to elevated soil carbon dioxide. HortScience 37 (2), 367-370.
- BUNNELL, B.T., L.B. MCCARTY and H.S. HILL, 2004: Soil Gas, Temperature, Matric Potential, and Creeping Bentgrass Growth Response to Subsurface Air Movement on a Sand-based Golf Green. HortScience 39, 415-419.
- EBELING, C., F. LANG and T. GAERTIG, 2016: Structural recovery in three selected forest soils after compaction by forest machines in Lower Saxony, Germany. Forest Ecology and Management 359, 74-82. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.09.045.
- FLECHARD, C.R., A. NEFTEL, M. JOCHER, C. AMMANN C., J. LEIFELD and J. FUHRER, 2007: Temporal changes in soil pore space CO₂ concentration and storage under permanent grassland. Agricultural and forest meteorology 142, 66-84.
- FOERSTER, T., T. GAERTIG und F. KUHNKE, 2012: Messtechnische Möglichkeiten zur Beurteilung der Belüftungssituation von Böden über deren CO₂-Gehalt. Jahrbuch der Baumpflege 2012, Bd. 16.
- FRÜND, H.-C. and A. AVERDIEK, 2016: Soil aeration and soil water tension in skidding trails during three years after trafficking. Forest Ecology and Management 380, 224-231. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.09.008.
- GAERTIG, T., 2001: Bodengashaushalt, Feinwurzeln und Vitalität von Eichen. Dissertation, Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen 40, Freiburg i. Br.
- GOUTAL, N., F. PARENT, P. BONNAUD, J. DE-MAISON, G. NOURRISSON, D. EPRON, and J. RANGER, 2012: Soil CO₂ concentration and efflux as affected by heavy traffic in forest in northeast France. European Journal of Soil Science 63, 261-271. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2011.01423.x.
- HIRANO, T., H. KIM and Y. TANAKA, 2003: Long-term half-hourly measurement of soil CO₂ concentration and soil respiration in a temperate deciduous forest. J. Geophys. Res. 108 (D20), 7271. DOI: 10.1029/2003JD003766.
- KA5 (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- MORHARD, J., 2004: Untersuchungen zur Bodenbearbeitung auf Strapazierrasenflächen. Hohenheim, Univ., Diss, 2004. Beuren: Grauer.
- OTTOW, J.C.G., 2011: Mikrobiologie von Böden. Springer Verlag Berlin-Heidelberg.
- PATIL, R.H., J.J. COLLS and M.D. STEVEN, 2010: Effects of CO₂ gas as leaks from geological storage sites on agroecosystems. Energy 35, 4587-4591. DOI: 10.1016/j.energy.2010.01.023.
- STANGE, C.F., W.H.M. DUIJNISVELD und J. FRAUENSTEIN, 2013: Anforderungen an die CO₂-Speicherung in geologischen Formationen (CCS) aus Sicht des Bodenschutzes. Bodenschutz 13, 72-76. www.BODENSCHUTZdigital.de/Zbos.03.2013.072.
- WELSCH, D.L. and G.M. HORNBERGER, 2004: Spatial and temporal simulation of soil CO₂ concentrations in a small forested catchment in Virginia. Biogeochemistry 71, 415-436. www.jstor.org/stable/4151487.
- WELTECKE, K. and T. GAERTIG, 2011: Methods for the assessment of soil deformation in forest stands: interrelationships and ecological relevance. Allg Forst Jagdztg 182, 187-204.
- ZIMMERMANN, L., S. RASPE, C. Schulz und W. GRIMMEISEN, 2008: Wasserverbrauch von Wäldern. LWF aktuell 66/2008, 16-20.

Autor:

Prof. Dr. Heinz-Christian Fründ (i.R.)
Hochschule Osnabrück
Fakultät Agrarwissenschaften und
Landschaftsarchitektur
D-49009 Osnabrück
E-Mail: hc.fruend@hs-osnabrueck.de