

Tagungsbeitrag zu:
 Jahrestagung der DBG, Kommission I
Titel der Tagung:
 Horizonte des Bodens
Veranstalter:
 DBG
Termin und Ort:
 2.-7.9.2017, Göttingen
Berichte der DBG:
<http://www.dbges.de>

Direkter Nachweis des Einflusses von wind-induzierten Druckfluktuationen auf den Gastransport im Boden

Thomas Laemmel^{1*}, Martin Maier¹,
 Manuel Mohr², Helmer Schack-
 Kirchner¹, Dirk Schindler², Friederike
 Lang¹

¹Professur für Bodenökologie, Albert-
 Ludwigs-Universität Freiburg, 79085
 Freiburg im Breisgau

²Professur für Umweltmeteorologie,
 Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
 79085 Freiburg im Breisgau

* thomas.laemmel@bodenkunde.uni-freiburg.de

1. Einleitung

Gasaustausch an der Grenzfläche zwischen Boden und Atmosphäre ist von zentraler Bedeutung für eine Reihe von Bodeneigenschaften (u. a. Sauerstoffverfügbarkeit, Redoxpotential, Treibhausgasumsatz). Er wird gewöhnlich als reiner Diffusionsprozess beschrieben. Dazu wird oft der Gasdiffusionskoeffizient des Bodens (D_S) berechnet, welcher mithilfe des Fick'schen Gesetzes die Berechnung des diffusiven Gasflusses basierend auf dem Gaskonzentrationsgradienten erlaubt. Im Rahmen von Freilanduntersuchungen zum Gasaustausch wurden aber auch Hinweise auf weitere Transportprozesse gefunden. So wird angenommen, dass

durch wind-induzierte Luftdruckfluktuationen ein sogenannter „pressure-pumping“ Effekt (PPE) die Gastransportrate im Boden deutlich erhöhen kann. Dieser nicht-diffusive intermittierende Prozess lässt sich bisher im Freiland nur schwer quantifizieren.

Um den Beitrag von nicht-diffusiven Transportprozessen zu quantifizieren, und sie mit der reinen molekularen Diffusion vergleichen zu können, wird oft ein effektiver resultierender Gasdiffusionskoeffizient des Bodens (D_{eff}) definiert. Erfolgt der Bodengastransport ausschließlich durch molekulare Diffusion, so gilt: $D_{\text{eff}} = D_S$. Spielen nicht-diffusive Transportprozesse eine signifikante Rolle, so ist $D_{\text{eff}} > D_S$ und im Fall des PPE: $D_{\text{eff}} = D_S + D_{\text{PPE}}$, mit $D_{\text{PPE}} > 0$ als Anteil, der sich nicht durch reine molekulare Diffusion erklären lässt.

Ziel unserer Arbeit war, den Einfluss des „pressure-pumping“ Effektes (PPE) auf den Gastransport *in situ* nachzuweisen und zu quantifizieren. Zusätzlich sollten die verantwortlichen wind-induzierten Luftdruckfluktuationen charakterisiert werden.

2. Material und Methoden

Methode zum Monitoring des Bodengastransports

Die Methode basiert auf der Erfassung und Überwachung von Konzentrationen eines Tracer-Gases, welches kontinuierlich mit einer konstanten Rate in einer gewissen Bodentiefe eingespeist wird (Abb. 1, Laemmel et al., 2017). Aufgrund der hohen Diffusionsgeschwindigkeit (D_0 in Luft 0.604 cm²/s) wurde Helium (He) als Tracer-Gas ausgewählt. Die He-Einspeisung sowie die räumliche und zeitliche Messung von He-Konzentrationen erfolgten durch ein innovatives Gasprobenahmesystem. Das System besteht aus Sampler mit sieben Accurel© Membranen, die gas-

durchlässig und wasserundurchlässig sind, und die zur Einspeisung oder Gasprobennahme verwendet werden können. Die Messstellen/-tiefen sind durch aufblasbare Abschnitte getrennt, die durch weiche Silikonzylinder geschützt werden.

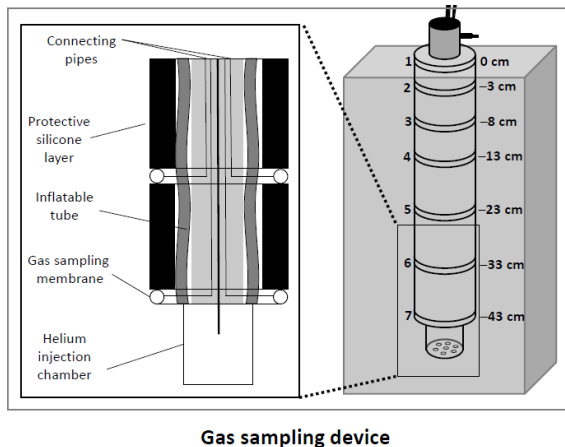


Abbildung 1: Aufbau des Gassamplers der zum Monitoring des Bodengastransports verwendet wird (Laemmel et al., 2017).

Bodengasproben können in verschiedenen Messtiefen durch einen Zugang angesaugt und durch eine weitere Zuleitung zurück in die Accurel-Membrane gespeist werden, so dass die Probenahme druckneutral erfolgt. Die verschiedenen Messpositionen können durch ein totvolumenarmes Ventil (VICI® AG International, Schenkon, Schweiz) angesteuert werden. Die Bestimmung der He-Konzentration erfolgt mit einem Micro GC (3000 Micro GC Gas Analyzer, Trägergas: Argon, Säule: Molsieve, Inficon GmbH, Köln, Deutschland).

Zur Installation des Gassamplers wird ein kreisrundes Loch im Boden mit einem Murach-Bohrer vorgebohrt (Abb. 2), der einen etwas größeren Durchmesser als der Gassampler aufweist. Nach vorsichtiger Installation werden die silikongeschützten Trennelemente des Gassamplers aufgeblasen, um Luftaustausch (bypass) zwischen den

Messtiefen entlang des Bohrlochs zu verhindern.



Abbildung 2: Installation des Gasprobennahmesystem im Feld. (a) der Bodenkernelement gewonnen mit dem Murach-Bohrer; (b) Installation des Gassamplers in das Bohrloch.

Durch die kontinuierliche Einspeisung von Helium in den Boden (in vernachlässigbar kleiner Menge), und unter der Annahme, dass der Bodengastransport ausschließlich durch molekulare Diffusion erfolgt, ergibt sich nach einer gewissen Zeit ein diffusives Steady-State He-Konzentrationsprofil entlang des Gassamplers. Aus den gemessenen He-Konzentrationen lässt sich D_{eff} ableiten. Treten externe Effekte auf (Regen, Wind) wird der diffusive Steady-State der He-Konzentrationen im Boden gestört.

Gastransportmodellierung

Die Verteilung von He im Boden wurde mittels Finite-Elemente Modellierung (FEM) simuliert (Software COMSOL Multiphysics). Dafür wurde die Geometrie des Gassamplers in seiner Umgebung im FEM-Modell abgebildet. Fünf

Bodenschichten mit jeweils einem unabhängigen D_{eff} wurden entlang des Gassamplers definiert. Der obere Teil des FEM-Modells wurde mit einer Luftschicht begrenzt, an dessen oberen Grenze die He-Konzentration 5 ppm beträgt. Der untere Teil des Modells wurde mit einer Bodenschicht begrenzt, in welcher der D_{eff} aus Bodenfeuchtedaten mit einem Transfermodell abgeleitet wurde.

Unter Angabe der Einspeisungsrate sowie der Einspeisungsposition wurde mittels eines Parameter-Sweep-Verfahrens für alle möglichen D_{eff} -Kombinationen die theoretische He-Konzentration an den Messstellen des Gassamplers vorwärts modelliert. Danach wurden die gemessenen He-Konzentrationen mit theoretischen He-Konzentrationen verglichen und deren Übereinstimmung evaluiert. Daraus ließ sich das D_{eff} -Tiefenprofil zu jedem Zeitpunkt bestimmen.

Standort

Die Methode zum Monitoring des Bodengastransports wurde während einer dreimonatigen Messkampagne auf der Versuchsfläche der Professur für Umweltmeteorologie der Universität Freiburg in Hartheim (SW Deutschland) angewendet. Dieser Standort ist überwiegend mit Waldkiefer (*Pinus sylvestris* L.) bestockt (mittlere Bestandhöhe ~ 18 m). Da es sich um eine Fläche in der ehemaligen Rheinaue handelt, ist dort überwiegend Sand und Kies als Ausgangsmaterial zu finden. Der Boden ist gut belüftet und kann nach WRB als haplic Regosol klassifiziert werden.

Wind- und Luftdruck-Messung

Auf der Fläche ist ein 30 m hoher Messurmast vorhanden, an dem der 3D Windvektor und der Luftdruck in fünf Höhen (2 m, 9 m, 18 m, 21 m und 30 m) über und unter der Kronenschicht

gemessen werden. Zusätzlich wurde der Luftdruck an der Bodenoberfläche gemessen.

Die Messung der 3D Windvektoren erfolgte durch Ultraschallanemometer (81000VRE, R.M. Young Company, Traverse City, USA). Der Luftdruck wurde mit einem hochsensiblen differentiellen Drucksensor (GMSD 2.5 MR, Greisinger Electronic GmbH, Regenstauf, Deutschland) gemessen (Mohr et al., 2016).

Auswertung der meteorologischen Daten

Die Windvektor- und Luftdruckdaten wurden in 30 min Intervallen analysiert. Die Luftdruckdaten wurden bandpassgefiltert, so dass nur Luftdruckperioden zwischen 10-100 s berücksichtigt wurden, da diese Perioden als windinduziert gelten (Mohr et al., 2016). Die Hauptperioden und -amplituden der Luftdruckfluktuationen wurden mit einer Wavelet-Transformation berechnet. Zusätzlich wurde der „pressure pumping coefficient“ (PPC in Pa/s) berechnet, welcher die mittlere absolute Steigung des gefilterten Luftdrucksignals entspricht und ein Maß für die „Pumpintensität“ der Druckfluktuationen ist (Mohr et al., 2016).

3. Ergebnisse und Diskussion

Exemplarisch werden hier die Ergebnisse einer Periode von drei Tagen (8.-10. Juli 2016) präsentiert (Abb. 3). Während der Perioden mit hohen Windgeschwindigkeiten über der Kronenschicht und hohen PPC-Werten (A und B, Abb. 3a,b), war eine temporäre Abnahme der He-Konzentrationen im Oberboden sichtbar (Abb. 3c,d). Zwischen 0 und -5 cm Tiefe wies D_{eff} zeitgleich eine temporäre Erhöhung auf (Abb. 3e). Wir führen diese Beobachtung auf den nicht-diffusiven PPE zu-

rück, der temporär den Gastransport im Boden beschleunigt.

Um diese Beobachtung weiter zu charakterisieren, wurde für die Perioden A und B der D_{eff} -Anteil berechnet, der nicht durch reine molekulare Diffusion zu erklären ist. Dafür wurde ein theoretisch rein molekularer Diffusionskoeffizient (D_{S}^{th}) durch Interpolation der D_{eff} -Werte der windarmen Episoden vor (A_{ref}^1 und B_{ref}^1) und nach (A_{ref}^2 , B_{ref}^2) A und B berechnet. Während dieser windarmen Episoden galt: $D_{\text{eff}} = D_{\text{S}}$, was bedeutet, dass der Gastransport im Boden überwiegend durch molekulare Diffusion erfolgt. Die Differenz zwischen D_{eff} und D_{S}^{th} während A und B wurde als D_{PPE} definiert: $D_{\text{eff}} = D_{\text{S}}^{\text{th}} + D_{\text{PPE}}$. Der $D_{\text{PPE}}/D_{\text{S}}^{\text{th}}$ Wert im Oberboden (0 cm bis -5 cm) erreichte während A 34 % und während B 23 %.

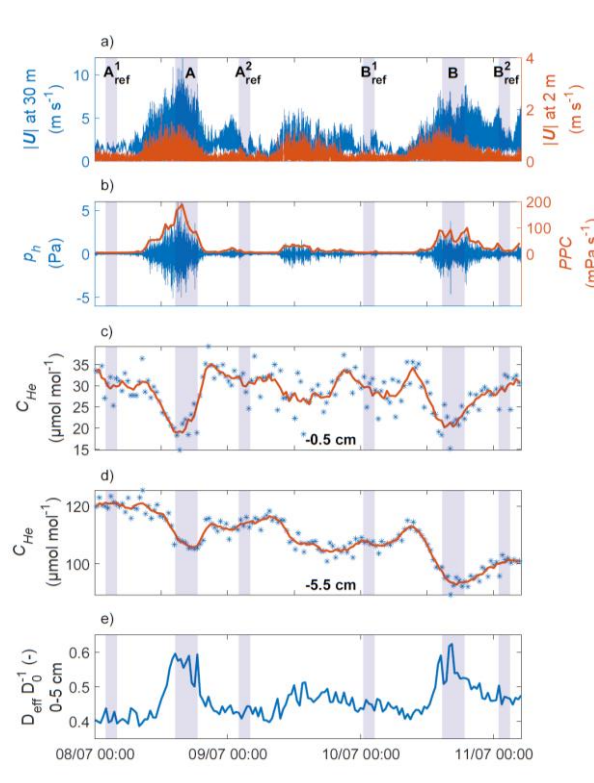


Abbildung 3: (a) Hochfrequente Windgeschwindigkeiten in 30 m (blau) und in 2 m (orange) Höhe. (b) Gefilterte hochfrequente Luftdruckfluktuationen (blau) und entsprechende PPC-Werte pro 30 min (orange). (c) und (d): Helium-

Konzentrationen in -0.5 cm und -5.5 cm Bodentiefe (blau: Messwerte, orange: Spline-Interpolation). (e): Optimierter effektive Gasdiffusionskoeffizient des Bodens zwischen 0 cm und -5 cm. Die Periode A_{ref}^1 , A, A_{ref}^2 , B_{ref}^1 , B und B_{ref}^2 wurden für die Berechnung der Erhöhung des Bodengastransports durch PPE verwendet.

Die frequenzbasierte Analyse der Druckdaten zeigte, dass die für den PPE verantwortlichen wind-induzierten Luftdruckfluktuationen Perioden zwischen 10 s und 30 s und Amplituden zwischen 2 Pa und 10 Pa aufweisen. Mit zunehmendem PPC nehmen die mittleren Druckperioden ab und die mittleren Druckamplituden zu (Mohr et al., 2016).

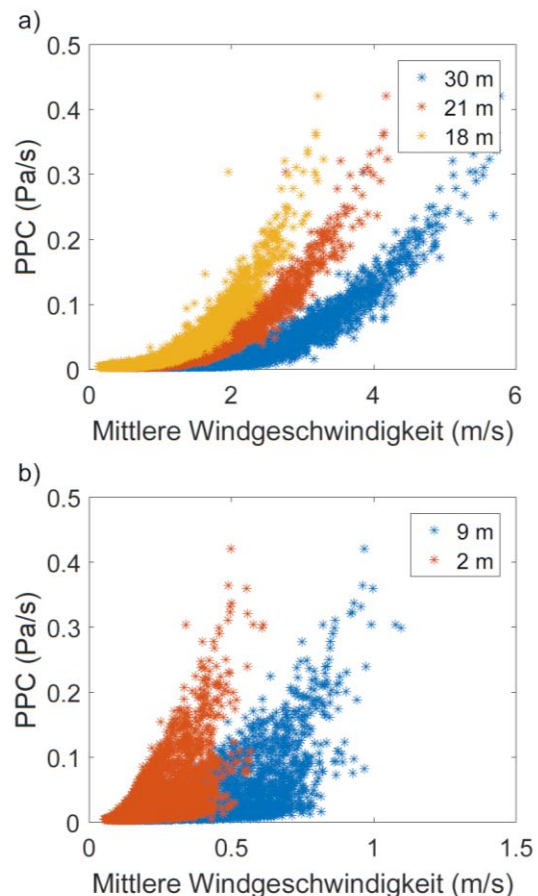


Abb. 4: Abhängigkeit der PPC von der mittleren Windgeschwindigkeit (a) über und (b) unter der Kronenschicht.

Zwischen der Windgeschwindigkeit über der Kronenschicht und dem PPC konnte eine enge Korrelation festgestellt werden (Abb. 4a). Mit den mittleren Windgeschwindigkeiten unter der Kronenschicht ist hingegen keine Korrelation sichtbar (Abb. 4b).

Mohr et al. (2017) konnten zeigen, dass die Ausbreitungsrichtung der an der Bodenoberfläche gemessenen Luftdruckfluktuationen mit der Windrichtung über der Kronenschicht übereinstimmt. Außerdem korreliert die Propagationsgeschwindigkeit der Luftdruckfluktuationen an der Bodenoberfläche sehr eng mit der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit in 30 m Höhe.

Schlussfolgerungen

Erstmalig konnte direkt der Einfluss von wind-induzierten Druckfluktuationen auf den Gastransport im Boden messtechnisch *in situ* erfasst und seine Bedeutung als nicht-diffusiver Gastransportprozess bestätigt werden. Die bodennahen Luftdruckfluktuationen scheinen mit atmosphärischen Phänomenen über der Krone gekoppelt zu sein und nicht mit bodennahen Luftbewegungen. Wie diese Luftdruckfluktuationen über der Krone generiert werden, bleibt ebenso eine offene Frage wie ihr Einfluss auf die weit verbreiteten Kammernmessungen zur Bestimmung von Bodengasflüssen.

Literatur

Laemmel, T.; Maier, M.; Schack-Kirchner, H.; Lang, F. (2017): An in situ method for real-time measurement of gas transport in soil. *European Journal of Soil Science*, 68 (2), 156-166. DOI: 10.1111/ejss.12412.

Laemmel, T.; Mohr, M.; Schack-Kirchner, H.; Schindler, D.; Maier, M. (2017b): Direct observation of wind-

induced pressure-pumping on gas transport in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 81 (4), 770-774. DOI: 10.2136/sssaj2017.01.0034n

Mohr, M.; Laemmel, T.; Maier, M.; Schindler, D. (2016): Analysis of air pressure fluctuations and topsoil gas concentrations within a Scots Pine Forest. *Atmosphere*, 7 (10), 125. DOI: 10.3390/atmos7100125.

Mohr, M.; Laemmel, T.; Maier, M.; Schindler, D. (2017): Spatial variability of wind-induced air pressure fluctuations responsible for pressure pumping. *Tellus B*, 69 (1), 1361757. DOI: 10.1080/16000889.2017.1361757