

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 134 (1983)
Heft: 10

Artikel: Bodenluft und Bodendurchlüftung
Autor: Flühler, Hannes
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-767253>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 19.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Bodenluft und Bodendurchlüftung

Von Hannes Flühler

(Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, CH-8903 Birmensdorf)

Oxf.: 114.13

Bakterien, Pilze, Wurzeln und andere Bodenlebewesen prägen ihre unmittelbare Umwelt, indem sie ihre Stoffe, mitunter auch Gase entziehen, diese umsetzen und in gelöster, fester oder gasförmiger Form wieder an ihre Umgebung abgeben. Der Gaswechsel ist also ein Teil des Stoffkreislaufes im Boden. Ohne atmende Organismen bestünde zwischen der freien Atmosphäre und jener im Boden ein Gleichgewicht. Selbst in vernässten Böden wären die Partialdrucke der Gase in allen Tiefen gleich jenen an der Bodenoberfläche, nämlich $pO_2 = 20,7 \%$, $pN_2 = 77,7 \%$, $pH_2O = 1,2 \%$ (Wasserdampf), $pA = 0,93 \%$ (Argon), $pCO_2 = 0,03 \%$ und $pH_2 = 0,01 \%$. Die Bodenorganismen sind der «Motor» der Ungleichgewichte, also der Transport- und Austauschprozesse gasförmiger Komponenten, welche man unter dem Begriff Durchlüftung zusammenfasst. Die Bodendurchlüftung ist somit in erster Linie ein bodenbiologisches Thema, und dennoch war es eines der ersten Themen in den Anfängen der heutigen Bodenphysik (*Buckingham* 1904). Dies liegt wohl daran, dass die physikalischen Aspekte des Gashaushaltes im Boden untersuchbar und beschreibbar sind. Traditionellerweise befasste man sich in der Literatur der Bodendurchlüftung vor allem mit dem Luftanteil im Porenraum und dessen Einfluss auf den Gasaustausch oder auf das Pflanzenwachstum, wobei man sich hinsichtlich Gasaustausch praktisch auf die O_2 -Diffusion und die CO_2 -Produktion beschränkte. Aus der Sicht eines Bakteriums, einer Pilzhyphe oder einer Feinwurzel bedeutet Durchlüftung jedoch mehr. Dies soll in diesem Aufsatz skizziert werden.

Gasumsatz im Boden

Im Boden werden beträchtliche Gasmengen umgesetzt. Dies wird deutlich, wenn man sie auf das im Boden speicherbare Gasvolumen bezieht: Ein

Kubikzentimeter eines «gut» durchlüfteten Bodens enthält etwa $50 \mu\text{g O}_2$ (= Mikrogramm) und $15 \mu\text{g CO}_2$, ein vergleichsweise schlecht durchlüfteter Boden $5 \mu\text{g O}_2$ und $80 \mu\text{g CO}_2$, die freie Atmosphäre $300 \mu\text{g O}_2$ und $1 \mu\text{g CO}_2$. Bei diesem Vergleich von Grössenordnungen sind die relativen Unterschiede zwischen O_2 und CO_2 wichtig. Die Konzentration des im Wasser gelösten O_2 ist etwa 20mal geringer als in der Luft, die Konzentration von CO_2 ist jedoch in beiden Medien etwa gleich gross. Im Wasser geht bei $\text{pH} > 6,0$ ein zunehmender Anteil des freigesetzten CO_2 als HCO_3^- in Lösung, steht also mit dem Wasser und den darin gelösten Ionen in einem Reaktionsgleichgewicht. Wesentlich in diesem Zusammenhange ist die Tatsache, dass im Boden eine im Vergleich zu O_2 deutlich grössere CO_2 -Menge gespeichert wird, die mit zunehmendem Wassergehalt sogar noch zu-, im Falle von O_2 aber abnimmt. Da die Bodenlösung einen bedeutenden Anteil des freigesetzten CO_2 zu speichern vermag, ist der CO_2 -Partialdruck in normal durchlüfteten Böden etwa 10mal kleiner als der O_2 -Partialdruck (in der Regel kleiner als 2 % pCO_2). Der Tagesumsatz an O_2 liegt in der Grössenordnung von $5-50 \mu\text{g O}_2 \cdot \text{cm}^{-3}$, in einem biologisch aktiven Humushorizont kann er mehrere hundert $\mu\text{g O}_2 \cdot \text{cm}^{-3}$, also ein Vielfaches des speicherbaren Vorrates betragen. Der entsprechende Tagesumsatz an CO_2 wird durch den Boden «geschluckt», geht also zu einem guten Teil in Lösung. In einem übertragenen Sinne entspricht die Situation der Bodenlebewesen einem Taucher in einem Anzug mit einem nach aussen offenen Rückschlagventil.

Die atmenden Bodenorganismen hängen auf Gedeih und Verderben vom Zu- und Wegtransport von O_2 und CO_2 ab. Dabei sind nicht die absoluten Gasmengen entscheidend, sondern das Verhältnis des Gasumsatzes zum Nach- beziehungsweise Rückschub. So war zum Beispiel der O_2 -Partialdruck im Pseudogley Schmidwald im Winter höher als im Sommer, obschon das Profil im Winter vernässt und im Sommer durch den Wasserentzug der Wurzeln scheinbar gut entwässert war. Dies ist ein Temperatureffekt. Die durch Sommertemperaturen stimulierte Bodenatmung überkompensierte also den infolge Entwässerung verbesserten O_2 -Nachschub beziehungsweise die CO_2 -Gegendiffusion.

Der O_2/CO_2 Gaswechsel ist im normal entwässerten Boden sicher der quantitativ wichtigste Posten in der Gasbilanz. Bei aerober Atmung – das heisst in Anwesenheit von O_2 – ist der Sauerstoff der Elektronenakzeptor der energieliefernden Reaktionskette und Kohlendioxid das Endprodukt der enzymatisch zerlegten organischen Verbindungen. Unter aeroben Bedingungen wird gleichviel O_2 gebunden wie CO_2 freigesetzt (äquimolar). Im sauerstofffreien Milieu führen andere energieliefernde Prozesse (Fermentation und anderes) zur Freisetzung von CO_2 ohne einen entsprechenden O_2 -Konsum.

Je nach der Pufferkapazität des Bodens senkt das freigesetzte CO_2 den pH der Bodenlösung. In der Rhizosphäre wird diese Ansäuerung durch die

Ausscheidung organischer Säuren noch verstärkt. Dies erhöht die Löslichkeit und damit die Verfügbarkeit mancher Spurenelemente im Nahbereich der physiologisch aktiven Wurzeln.

Ist der O_2 -Vorrat im Boden lokal erschöpft, so ist dies nur der erste Schritt einer sich kontinuierlich verschlechternden «Durchlüftung» (Stolzy *et al.* 1981). Dabei sinkt das Redoxpotential, das heisst, eine ganze Reihe von Elementen und Verbindungen werden reduziert. Im O_2 -freien Milieu reduzieren denitrifizierende Bakterien NO_3^- (Nitrat) zu NO_2^- (Nitrit) und dieses zu N_2O (Lachgas) und N_2 . Den Denitrifikanten dienen diese Stickstoffoxide als Elektronenakzeptoren für die anaerobe Atmung, also gleichsam als Ersatz für das fehlende O_2 . Obschon dieser Vorgang obligat anaerob ist, stellt man selbst in scheinbar gut durchlüfteten Böden N_2O fest. Dies ist nur deshalb möglich, weil in feinstporigen, wassergesättigten Nischen, zum Beispiel in Bodenaggregaten von wenigen Millimetern Durchmesser anaerobe Bedingungen herrschen, selbst wenn diese an gut durchlüftete mit O_2 versorgte Grobporen angrenzen. Aus der Sicht der Wurzel ist es vermutlich ein Fehlkonzept, wenn wir von gut oder schlecht durchlüfteten Böden sprechen. Für sie ist entscheidend, mit welcher Wahrscheinlichkeit sie «gut» oder «schlecht» durchlüftete Zonen erschliesst. Da verschiedene Spurenelemente wie zum Beispiel Eisen unter reduzierenden Bedingungen viel besser löslich sind, ist es im Hinblick auf die Pflanzenernährung vielleicht sogar falsch, die anaeroben Mikronischen als «schlecht» durchlüftete Bodenbereiche zu bezeichnen.

Die Gasproduktion im Boden hängt unter anderem auch vom «Nahrungsangebot» für die Bodenorganismen ab. Mit zunehmender Bodentiefe nimmt der Gehalt an wasserlöslichen organischen Verbindungen und damit auch die Populationsdichte der Denitrifikanten ab. Fehlt das Energiesubstrat (Nahrung), dann ist die Produktion von N_2O und N_2 selbst bei einem reichlichen Angebot an NO_3^- sehr gering.

Wenn nach dem O_2 -Vorrat auch der NO_3^- -Vorrat erschöpft ist, wird Mn (Mangan) und anschliessend Fe (Eisen) reduziert. Das Farbmuster vergleyter Böden macht diese Reduktionsvorgänge sichtbar. In den fahlen, bleichen Partien liegt das Fe in der zweiwertigen Form vor, während die periodisch luftführenden Gröbstporen konzentrisch rostrot ummantelt sind. In pseudo-vergleyten Horizonten, die nur periodisch staunass sind, führt der Wechsel von reduzierenden und oxidierenden Bedingungen zu Mn-Konkretionen (schwarze Knöllchen).

Bei noch tieferen Redoxpotentialen reduzieren andere Spezialisten Schwefeloxide (SO_4^- und SO_3^-) und produzieren das übelriechende H_2S . Bei lang andauernder Vernässung wird CH_4 (Methan) und H_2 (Moorgas) freigesetzt. Unter diesen Bedingungen wird im Mineralboden auch FeS gebildet, das den Gleyhorizonten die charakteristische Blaufärbung verleiht.

Die geschilderte Sequenz von Reduktionsvorgängen dauert lange. Die

Dauer einer eingeschränkten O_2 -Nachlieferung beziehungsweise einer entsprechend intensivierten mikrobiellen Tätigkeit bestimmt das Niveau des Reduktionszustandes. Dabei verändern sich der Chemismus der Bodenlösung und fester Bodenbestandteile grundlegend. Die einen Mikroorganismen gehen zugrunde, andere nehmen überhand, Wurzeln sterben ab oder verkrüppeln. Wie schon eingangs erwähnt, ist ein erschöpfter O_2 -Vorrat nur ein erster Schritt einer graduellen Veränderung. Das Vorhandensein oder Fehlen von O_2 ist gleichbedeutend mit einer «guten» oder «nicht ganz guten» Durchlüftung. «Schlecht» ist sie erst, wenn ein guter Teil dieser Reduktionskette durchlaufen und ein bedeutender Volumenanteil des Bodens davon betroffen ist.

Wenn man unter Durchlüftung nicht nur den O_2/CO_2 -Haushalt versteht, sondern den gesamten Gaswechsel im Boden, dann müssen noch weitere wichtige Gaskomponenten erwähnt werden. Knöllchenbakterien fixieren den elementaren Stickstoff. Die Stickstoffverluste durch Auswaschung und Denitrifikation werden dadurch langfristig und grossräumig gesehen kompensiert. Beim Abbau von organischem Material entsteht NH_4^+ , das zum Teil als NH_3 (Ammoniak) in die Atmosphäre abdiffundiert. Bei einer gehemmten Durchlüftung wird auch Äthylen (C_2H_4) freigesetzt. Dieses Gas hemmt das Wurzelwachstum. In Böden mit einer gehemmten Durchlüftung ist es durchaus möglich, dass nicht primär der O_2 -Mangel, sondern reduzierte Verbindungen als Toxine wirken.

Gashaushalt in der Rhizosphäre

In den jungen, wachsenden Geweben der Wurzelspitzen ist die Atmung am intensivsten. Meist umgibt ein dichtes Mykorrhizanetzwerk die Feinwurzeln (unserer Bäume) und Heerscharen von Bakterien tummeln sich im Nahbereich der Wurzel, wo sie sich an den Wurzelausscheidungen gütlich tun. Selbst wenn in der unmittelbaren Nachbarschaft O_2 -führende Poren angrenzen, ist der O_2 -Verzehr auf der Transportstrecke von der Luft-Wasser-Grenzfläche bis zum und in den Wurzelzylinder eine lebensbedrohende Konkurrenz. Die Pflanze schafft Selbsthilfe, indem sie im Wurzelgewebe ein pflanzeninternes Gastransportsystem ausbildet. Spezialisten wie Reis, Schachtelhalme oder auch Schwarzerlen bilden ein eigentliches Luftkanalsystem und sind deshalb selbst in hoffnungslos vergleyten Böden hinsichtlich Gasaustausch autark. Die kommunizierenden luftgefüllten Interzellularräume (Aerenchym) sind nicht nur bei Sumpfpflanzen effektiv. Selbst in Fichten konnte ein solcher pflanzeninterner Nachschubmechanismus nachgewiesen werden. Es ist durchaus denkbar, dass besser durchlüftete Bodenbereiche via Wurzelkanäle mit reduzierten Nischen kurzgeschlossen

sind. In der Rhizosphäre wird die Wirkung reduzierender Bedingungen noch dadurch verstärkt, dass der pH durch die Ausscheidung organischer Säuren gesenkt wird. Das Redoxpotential und der pH sind eng miteinander verknüpft. Die konzentrischen, gebleichten Ringe um die Wurzelkanäle deuten darauf hin, dass unter der Wirkung der Säuren und der Anaerobie Eisen in Lösung geht und wegdiffundiert. In einer Distanz von wenigen Millimetern ist der pH und vermutlich auch der O₂-Partialdruck höher als im Nahbereich. Rostrote Ringe bezeichnen die Demarkation der Eisenausfällung (Oxidation).

Einige Bemerkungen

Diese rein verbale, wenig quantitative Analyse der Bodendurchlüftung zeigt sicher deutlich genug, dass dieses Thema kein bodenphysikalisches Privileg sein darf. Es ist zweifellos ein Verdienst von Professor Dr. F. Richard, dem die Arbeiten dieser Ausgabe gewidmet sind, dass er die komplexe Natur, draussen im Feld im natürlich gelagerten Boden studiert haben wollte. Dies ist eine unabdingbare Voraussetzung, wenn man die in der Methodik begründete fachliche Aufsplitterung der Bodenkunde überwinden will.

Résumé

L'air dans le sol et l'aération du sol

L'état de l'aération d'un sol est le reflet de l'activité biologique qui s'y déroule. On examine dans ce travail quels sont, dans le sol, les gaz mobilisés par la respiration et quels sont ceux qui y sont élaborés. Une consommation trop élevée d'oxygène ou un apport trop faible de ce gaz provenant de l'atmosphère, induisent la formation de zones anaérobies (sans O₂) dans le sol. Il s'ensuit une lente succession de micro-organismes réducteurs des composés d'azote, de soufre et de métaux, entre autres. A mesure que le processus de réduction progresse, le milieu devient de plus en plus défavorable pour les racines. La plante se crée alors son propre système interne de circulation des gaz afin de pouvoir surmonter les goulots d'étranglements de leur économie. Certaines plantes spécialement adaptées peuvent même exploiter des horizons dépourvus d'oxygène. Cet article montre que le volume relatif de l'air dans le sol ainsi que la concentration de l'oxygène (O₂) et du gaz carbonique (CO₂), ne constituent qu'un des aspects de l'aération du sol.

Traduction: *R. Amiet*

Literatur

- Buckingham, E.* (1904): Contribution to our knowledge of aeration of soils. US Dept. Agr. Bur. of Soils Bull. 25
- Stolzy, L. H., Focht, D. D. und Flühler, H.* (1982): Indicators of soil aeration. *Flora* 171: 236—265