ERNST E. HILDEBRAND

Ein Verfahren zur Gewinnung der Gleichgewichts-
Bodenporenlösung

Ein Verfahren zur Gewinnung der Gleichgewichts-Bodenporenlösung

E.E. Hildebrand

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Botanik und Standortkunde, Fasanengarten, 7000 Stuttgart 31 (Weilimdorf)

Eingegangen: 11. Oktober 1985

Angenommen: 30. November 1985

Zusammenfassung – Summary

Es wird eine Apparatur vorgestellt, mit der 100 cm³-Stechzylinderproben perkoliert werden können und zwar bei Aufrechterhaltung eines luftgefüllten Grobporenvolumens und unter Verwendung interferenzarmer Filtermaterialien.

An einem ausgewählten Bodenprofil eines Fichtenstandortes zeigte sich, daß die übliche Homogenisierung der Bodenproben einen großen Informationsverlust über die Variabilität von Aziditätsmerkmalen sowie eine Unterschätzung der wurzelphysiologisch relevanten Bodenversauerung bewirkt.

A procedure for obtaining the equilibrium soil pore solution

A percolation system for 100 cm³ soil cores is presented. Only filter materials with negligible interfering properties are used, and during percolation an air filled porosity is maintained.

Results from soil cores of a spruce site show, that conventional homogenization of soil samples may lead to a great loss of information about the variability of acidity parameters and to an underestimation of the real soil acidification in the rhizosphere.

Einleitung

Bei chemischen Bodenanalysen wird normalerweise gesiebte und homogenisierte Feinerde verwendet. Dabei werden Mikrokompartimentierungen im Boden aufgehoben, wie z.B. Ungleichgewichte im chemischen Zustand zwischen Aggregatoberflächen und Aggregatinnerem. Das Ausmaß solcher Ungleichgewichte müßte mit steigendem Säureeintrag in den Boden zunehmen. Insbesondere bei Waldböden mit hoher Protonenbelastung und geringer biologischer Aktivität wird möglicherweise die für Baumwurzeln relevante Bodenversauerung falsch beurteilt, wenn die dazu üblichen Intensitätsparameter (z.B. pH-Wert oder Ca/Al-Verhältnis in der Gleichgewichtsbodenlösung) an homogenisierten Bodenproben gewonnen wurden. Dieser durch Homogenisierung bewirkte Informationsverlust könnte auch zu der Tatsache beitragen, daß Nutzen und Risiken forstlicher Düngemaßnahmen anhand konventioneller Bodenanalysen nur schwer zu prognostizieren sind.

Um diese Hypothesen zu prüfen, haben wir eine Meßanordnung aufgebaut, die es erlaubt, Bodenproben in ungestörter Lagerung zu perkolieren. Dabei wurde versucht, die Erfüllung von drei Forderungen zu vereinen:

- Die Perkolation sollte unter Aufrechterhaltung eines Luftvolumens stattfinden, um reduktive Mobilisierungen zu vermeiden. Diese Bedingung hat hohe Priorität, da eine gesättigte Durchströmung der Rhizosphäre von Nadelbäumen in forstlichen Standorten nur ausnahmsweise stattfindet.
- Die verwendeten Filtermaterialien sollten im Hinblick auf die Meßparameter interferenzarm sein.
- Es sollten reproduzierbare Gleichgewichtszustände erreicht werden, um den direkten Vergleich mit Gleichgewichtslösungen aus homogenisierten Bodenproben zu ermöglichen und die strukturbedingten, chemischen Ungleichgewichte darstellen zu können. Eine Bodenlösung im Gleichgewicht mit ungestörten Bodensäulen ermöglicht darüber hinaus abzuschätzen, wie weit am Standort gewonnene Lysimeterlösungen vom Gleichgewichtszustand entfernt sind.

Eine Apparatur zur Gewinnung der Gleichgewichts-Bodenporenlösung

Im Gelände werden 100 cm³-Stechzylinderproben genommen und die Bodensäulen im Labor vorsichtig in gleich dimensionierte Plexiglaszylinder überführt. Die feldfrischen Proben werden gewogen und auf die in Abb. 1 dargestellte Membranapparatur aufgesetzt. Durch eine Peristaltikpumpe wird Saugspannung erzeugt, die mittels gewaschener Filterflockenmasse an den Membranfilter ($\varnothing = 0.45 \mu\text{m}$) herangeführt wird. Am Membranfilter, der an der Unterseite durch Anpressen an einen O-Ring abdichtet, baut sich dann eine Saugspannung auf, die entweder durch den Luftdurchtrittspunkt des gesamten Systems oder durch die Förderleistung der Peristaltikpumpe begrenzt wird. Durch den Pumpvorgang wird gleichzeitig im Luftraum des Vorratsgefäßes ein Gegendruck erzeugt, der die Perkolutionslösung auf die Oberfläche der Bodensäule fördert. Wenn die Wasserspannung im unteren Teil der Bodensäule die am Membranfilter anliegende Saugspannung unterschreitet, beginnt die Perkolation. Je nach Wasserleitfähigkeit des Bodenmonolithen und dementsprechend je nach Wasseranlieferung an den Membranfilter kann sich während der Perkolation am Filterbett eine Saugspannung von 50–750 cm WS einstellen. Bei den von uns bisher untersuchten Bodensäulen der Bodenarten lehmiger Sand bis Lehm traten am Membranfilter Wasserspannungen zwischen 50 und 200 cm WS auf, die Durchflußraten lagen zwischen 0.9 und 0.7 ml/Min. Das bedeutet, daß die Förderleistung der Schlauchpumpe bei Bodensäulen unterschiedlicher Wasserleitfähigkeit relativ gleiche Durchflußraten dadurch erzwingt, daß bei höherem Fließwiderstand auch höhere Spannungsgradienten aufrechterhalten werden. Diese, auf gleiche Durchflußraten gerichtete Selbstregelung bei sandigen bis lehmigen Bodensäulen versagte bei tonigen Bodensäulen aus dem Sd-Horizont einer Pseudogley-Braunerde aus Oberem Buntsandstein. Obwohl sich auf der Fließstrecke von der Säulenoberfläche zum Membranfilter in diesen Fällen ein Spannungsgradient von 0–750 cm WS aufbaute, tropfte mehr Lösung auf, als an den Membranfilter herangeführt werden konnte, d.h. es bildete sich ein Wasserstau auf der

Abbildung 1: Apparatur zur Gewinnung der Gleichgewichts-Bodenporenlösung.

Figure 1: Apparatus for obtaining the equilibrium soil pore solution.

Oberfläche der Bodensäule. In diesem Fall müßte bei gleichem Anpreßdruck die Förderleistung der Schlauchpumpe und damit die Durchflußrate stark reduziert werden, was jedoch sehr lange Umlaufzeiten bis zur Gleichgewichtseinstellung zur Folge hätte. Da solche Horizonte jedoch meist außerhalb des Hauptwurzelsbereiches von Waldbäumen liegen, wird dadurch die Anwendbarkeit der Methode zur Darstellung der chemischen Mikrokompartmentierung in der Rhizosphäre von Waldbeständen kaum beeinträchtigt.

Da die Bodensäulen von Plexiglaszylindern gehalten werden, kann der Wasserstatus der am Säulenrand angeschnittenen Poren durch Augenschein beobachtet werden. Dabei zeigte sich, daß weite Grobporen und Hohlräume stets luftgefüllt bleiben. Je nach Wassergehalt der feldfrischen Bodenprobe und deren Lagerungsdichte liegt das Boden-Wasser-Verhältnis bei Einsatz von 100 ml Perkulationslösung zwischen 0,9 und 1,2. Wenn in der Perkulationslösung genaue kapazitive Parameter erhoben werden sollen, müssen Lagerungsdichte und Wassergehalt im Anschluß an die Perkulation bestimmt werden.

Bisherige Erfahrungen und Ergebnisse

Es wurde eine Apparatur gebaut mit 12 Einheiten der in Abb. 1 dargestellten Anordnung. Bisher werden Versuche nach dem Prinzip des Gleichgewichtsverfahrens durchgeführt, d.h. die Bodensäule wird so lange perkoliert, bis die Meßparameter der Lösung zeitlich konstant sind. Bei einer Perkulationsintensität von 0.7–0.9 ml/Min. ist für Ca, Al und Protonen der Gleichgewichtszustand nach 48 Stunden erreicht (vgl. Abb. 2). Zwei Stunden vor Beendigung der Perkolation wird der Stopfen des Gefäßes der Bodenporenlösung geöffnet (vgl. Abb. 1). Damit wird der Umlauf der Lösung unterbunden, und die Bodensäule entwässert, bis am Membranfilter Saugspannungen zwischen 700 und 750 cm WS anliegen. Messungen mit Mikrotensiometern ergaben, daß dann in Bodensäulen der Bodenart „Schlufflehm“ mittlere Wasserspannungen von 150–250 cm WS herrschen, bei Säulen der Bodenart „lehmiger Sand“ sind es 250–300 cm WS. Unterstellt man mittlere, für die jeweilige Bodenart typische pF/WG-Beziehungen, so müßten bis zum Eintreten des Spannungsgleichgewichtes bei 700–750 cm WS zwischen Filterbett und Bodenprobe aus den lehmigen Bodensäulen noch 8–9 ml Wasser, aus den sandigen Bodensäulen 4–5 ml Wasser entfernt werden. Das bedeutet, daß beim Einsatz von 100 ml Lösung die zur Erreichung des Spannungsgleichgewichtes

Abbildung 2: Konzentrationsverlauf von Al^{3+} , H^{+} und Ca^{2+} in der Gleichgewichts-Bodenporenlösung in Abhängigkeit von der Zeitdauer ihres Umlaufes.

Figure 2: Concentrations of Al^{3+} , H^{+} and Ca^{2+} in the equilibrium soil pore solution as related to the duration of turnover.

Tabelle 1: Wasserlösliche (Gleichgewichts-Bodenporenlösung und 2 : 1-Extrakt) und effektiv austauschbare Kationen einer Terra fusca-Parabraunerde unter Fichte; Ebnat, Württemberg.
Table 1: water soluble (equilibrium soil pore solution and 2 : 1-extract) and effectively exchangeable cations of a loamy Luvisol beneath spruce forest.

Horizont	Tiefe (cm)	$\mu\text{mol/l}$							Ca/Al	$\bar{x}\text{Ca/Al}$ (s)	Ca/H
		K	Ca	Mg	Mn	Al	Fe	H			
A. Gleichgewichts-Bodenporenlösung (Boden-/Wasserverhältnis ca. 1 : 1, natürlich gelagerte Bodensäulen)											
Ah	0–4	51.8	29.6	25.8	6.6	20.9	2.4		1.4		
		46.9	10.4	7.4	6.2	17.7	1.8		0.6		
		40.0	33.3	20.3	14.5	16.6	2.5	21.3	2.0	0.9	1.4
		56.4	21.0	19.3	3.9	24.3	3.9		0.9	(0.7)	
		44.2	5.0	8.5	3.6	19.0	1.6		0.3		
		12.0	5.7	10.9	27.6	18.3	2.2		0.3		
Ahl	8–12	15.0	9.9	7.6	1.6	14.9	<1		0.7		
		20.3	7.6	4.0	1.4	8.1	<1	19.4	0.9	0.7	0.5
		–	3.9	5.8	2.8	8.0	<1		0.5		
Al	16–20	14.1	10.5	4.9	1.5	8.6	<1		1.2		
		4.4	13.0	2.9	0.6	10.0	<1		1.3	1.2	
		6.4	9.2	3.8	1.1	7.6	<1	11.7	1.2	(0.1)	0.9
		30.5	15.5	6.6	11.7	14.9	<1		1.1		
		7.9	10.0	4.0	0.5	8.1	<1		1.2		
AlBt	26–30	25.1	32.7	8.5	2.6	5.8	<1		5.6		
		2.8	11.2	3.6	1.7	4.2	<1	8.2	2.7	3.1	4.0
		7.4	6.2	2.6	0.5	5.4	<1		1.2	(1.8)	
		3.8	11.5	4.1	1.7	4.3	<1		2.7		
Bt	40–44	2.1	20.0	10.2	1.3	2.7	<1		7.4		
		1.0	17.5	7.3	1.7	3.9	<1	10.9	4.5	7.4	1.8
		1.0	18.7	10.4	0.6	1.8	<1		10.4		
B. Wäßriger 2 : 1-Extrakt (homogenisierte Bodenproben als Mischproben aus drei Profilwänden)											
Ah	0–4	159.9	146.3	63.0	191.8	103.7	31.8	7.8	1.4		18.8
Ahl	8–12	57.0	116.8	37.5	150.1	103.7	24.1	16.9	1.1		6.9
Al	16–20	54.5	63.8	14.8	100.1	18.5	8.3	12.5	3.5		5.1
AlBt	26–30	37.7	56.8	11.3	33.4	<10	<1	14.0	–		4.1
Bt	40–44	28.2	76.3	18.4	22.9	<10	<1	9.2	–		8.3
IISd	70–74	35.8	77.5	19.9	3.3	<10	<1	4.2	–		18.5

C. *Effektiv austauschbare Kationen* (homogenisierte Bodenproben als Mischproben aus drei Profilwänden)

		$\mu\text{val/g}$								V %
		K	Ca	Mg	Mn	Al	Fe	H	AK _{eff}	
Ah	0–4	3.3	21.4	4.5	21.5	21.2	0.1	1.0	73.0	40
Ahl	8–12	1.1	8.7	1.6	8.0	40.7	0.2	1.9	62.2	18
Al	16–20	1.0	3.5	0.7	5.8	33.4	<0.1	1.2	45.6	11
AlBt	26–30	0.6	2.9	0.5	4.1	30.0	<0.1	0.9	39.0	10
Bt	40–44	1.2	11.0	2.7	2.2	32.7	<0.1	1.2	51.0	29
IISd	70–74	3.2	58.1	23.7	0.9	31.2	<0.1	0.8	117.9	72

noch zu extrahierenden Wassermengen kaum Einfluß haben dürften auf die in Tab. 1 dargestellten Intensitätsparameter der Gleichgewichts-Bodenporenlösung. Wenn es die Fragestellung erfordert, kann am Ende des Perkulationsversuches durch Verlängerung der Absaugphase das Spannungsgleichgewicht auf der Basis von 700–750 cm WS und damit die Vergleichbarkeit des Wasserstatus aller Bodensäulen beliebig angenähert werden.

Die Ergebnisse eines Anwendungsbeispiels (Terra fusca-Parabraunerde unter Fichte im Fbz. Ebnet) sind in Tab. 1 dargestellt. Standort und Profil sind bei *Glatzel et al.*, Tafel 77 (1967) beschrieben. Aus den Analysenwerten der Tab. 1 lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Der Chemismus der Gleichgewichts-Bodenporenlösung streut sehr stark auf engstem Raum (ca. 1m²). Die darin zum Ausdruck kommende Mikrokompartimentierung ist an der Bodenoberfläche am größten.
- Im Ah-Horizont treten in der Gleichgewichts-Bodenporenlösung Ca/Al-Verhältnisse von 0.3 bis 2.0 auf. Wendet man darauf das Bewertungsschema an, das *Ulrich et al.* (1984) für den wässrigen 2 : 1-Extrakt erstellt hat, so reicht die Bewertung von „Kalkung dringend erforderlich“ ($\text{Ca/Al} \leq 0.3$) bis „keine Kalkung notwendig“ ($\text{Ca/Al} \geq 1$). Angesichts der grenzwertübergreifenden Streuung sind rechnerische Mittelwerte solcher Intensitätsparameter zu grob, um negative Entwicklungen im Oberboden frühzeitig zu erkennen. Gleiches gilt, wenn die Mittelung durch Mischprobenbildung und Homogenisierung herbeigeführt wird. Mit diesem Vorbehalt sind auch die noch günstigen Basenanteile am effektiv austauschbaren Ionenbelag zu bewerten (vgl. Tab. 1 C).
- Der Vergleich von Gleichgewichtslösungen aus natürlich gelagerten Bodensäulen (Gleichgewichts-Bodenporenlösung, Tab. 1 A) mit Gleichgewichtslösungen aus homogenisiertem Bodensubstrat (2 : 1-Extrakt, Tab. 1 B) zeigt, daß die Gleichgewichts-Bodenporenlösungen intensivere Aziditätsmerkmale (Ca/Al- bzw. Ca/H-Verhältnisse) aufweisen. Dies bestätigt im Falle des Anwendungsbeispiels die Arbeitshypothese einer stärkeren Versauerung von Aggregatoberflächen bzw. von Poreninnenwänden. Dabei muß noch berücksichtigt werden, daß durch die

vorausgegangene Trocknung des Bodenmaterials für den 2:1-Extrakt mit einer vermehrten Mobilisierung von huminstoffkomplexiertem Aluminium zu rechnen ist (Ulrich et al., 1984). Ein solcher, offensichtlich durch vermehrte Huminstofffreisetzung bereiteter Mobilisierungseffekt tritt bei Mangan und Eisen auf (vgl. Tab. 1 B).

Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Die in Abb. 1 dargestellte Anordnung kann auch für andere Fragestellungen eingesetzt werden. So kann z.B. die Wirkung von Kalkungs- und Düngemaßnahmen auf den Bodenchemismus modellhaft nachvollzogen werden. Dabei geht es vor allem um die für die Forstwirtschaft bedeutsame Frage, wie zugeführte Basen in stabile Gleichgewichte zu versauerten Mineralböden gebracht werden können. So ist in der forstlichen Düngepraxis umstritten, inwieweit lösliche Nährelementsalze mit Anionen starker Mineralsäuren (z.B. Kieserit, MgSO_4) dem System Boden/Pflanze, sowie nachgeschalteten Systemen, wie etwa der Hydrosphäre, nützen oder schaden. Eigene Untersuchungen (Hildebrand, 1985) haben gezeigt, daß in Mineralböden die Eintauschstärke von Ca und Mg entscheidend von der Art der Kationsäure-Belegung (Al^{3+} , Fe^{3+} , H^+) abhängt. Durch Simulation von Düngungen an Bodenproben unterschiedlicher Kationsäure-Belegung kann mit Hilfe der Perkolationsapparatur untersucht werden, welche praktischen Konsequenzen für die Forstdüngung abzuleiten sind.

Weitere Anwendungen sind auch denkbar, bei denen nicht nach dem Prinzip des Gleichgewichtsverfahrens gearbeitet wird, so z.B.

- Menge der effektiv austauschbaren Kationen bei Erhaltung der natürlichen Bodenlagerung.
- Nachlieferungsvermögen für verschiedene Kationen bei wiederholter Perkolation mit Wasser.
- Durchbruchkurven für Schwermetalle und sonstige umweltrelevanten Stoffe in Böden bei naturnahen Fließbedingungen.

Literatur

- Glatzel, K., Jahn, R., Müller, S., Schlenker, G. und Werner, J. (1967): Südwestdeutsche Waldböden im Farbbild. Schriftenreihe d. Landesforstverwaltung Bad.-Württ. 23.
- Hildebrand, E.E. (1985): Ionengleichgewichte in Mineralböden von Fichtenstandorten mit nadelanalytisch festgestellten Ca-, Mg- und K-Mangelzuständen. Bericht 1. Statuskolloq. des PEF vom 5.–7. März in Karlsruhe, 215–227.
- Ulrich, B., Meiwes, K.J., König, N. und P.K. Khanna (1984): Untersuchungsverfahren und Kriterien zur Bewertung der Versauerung und ihrer Folgen in Waldböden. Der Forst- u. Holzwirt 39/11, 278–286.

[P4408B]