ERNST E. HILDEBRAND

Die Bedeutung der Bodenstruktur für die
Waldernährung, dargestellt am Beispiel des Kaliums

Die Bedeutung der Bodenstruktur für die Waldernährung, dargestellt am Beispiel des Kaliums

Von E. E. HILDEBRAND

1 Einleitung

Es ist eine verbreitete Erfahrung der Waldernährungskunde, daß durch chemische Analysen der Feinerde die Ernährungsbedingungen individueller Waldbestände nur unscharf erfaßt werden können. Statistische Beziehungen, z. B. zwischen der Menge an austauschbaren Nährelementen und dem nadelanalytisch bestimmten Versorgungsgrad, lassen erst in regionaler Auflösung interessante Gesetzmäßigkeiten erkennen (ZOTTL 1985; LIU 1988). Aufgrund der hohen Reststreuung solcher Beziehungen ist es jedoch schwierig, Ursache-Wirkungs-Beziehungen für Einzelfälle abzuleiten. Einzelfälle, d. h. Bestände, sind aber in der Regel die Befundeinheiten bei der standortsspezifischen Düngeberatung, so daß bodenanalytische Entscheidungshilfen auch auf dieser Auflösungsebene gültig sein sollten. In dieser Arbeit wird daher der Ansatz geprüft, ob die Berücksichtigung der Bodenstruktur bei der chemischen Waldbodenanalyse zu verbesserter Treffsicherheit für die ernährungskundliche Beurteilung von Beständen beitragen kann (vgl. HANTSCHL et al. 1986).

Die Diskrepanz zwischen bodenanalytischen Befunden und nadelanalytisch bestimmter Versorgungslage ist besonders gravierend beim Nährelement Kalium (vgl. ZOTTL u. HUTTL 1985; LIU u. TRUBY 1989). In Baden-Württemberg kommt dies deutlich in den Ergebnissen der TWI 83 zum Ausdruck, weil K-Mangel gehäuft auch dort auftritt, wo K-reichere Substrate bodenbildend sind (vgl. EVERS u. SCHOPFER 1988; HUTTL 1986). An fünf unterschiedlichen Fichtenstandorten soll geprüft werden, ob diese Diskrepanz durch Berücksichtigung der Bodenstruktur erklärt oder aufgehoben werden kann.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsstandorte

Die Untersuchungsstandorte sind in Übersicht 1 identifiziert und kurz charakterisiert. Sie zeichnen sich durch nadelanalytisch festgestellte K-Unterversorgung bzw. -Mängel aus (vgl. Tab. 1), die sich nur schwer mit konventionellen bodenchemischen Befunden erklären lassen. So wird der von LIU und TRUBY (1989) genannte potentielle Grenzwert für K-Mangel bei Fichte von $2 \mu\text{mol I\AA K/g}$ Feinerde sowohl erheblich über- als auch unterschritten (vgl. Tab. 2). Interessant ist, daß sich bei den Untersuchungsstandorten „Schöntal“ die K-Versorgung zwischen 1983 und 1988 deutlich verbessert hat, was möglicherweise auf die höheren Niederschläge in der Vegetationsperiode 1988 zurückgeführt werden kann. Der Standort „Pseudogley“ hatte dadurch zum Zeitpunkt dieser Untersuchung das Stadium der akuten K-Unterversorgung verlassen.

2.2 Methoden

Der Einfluß der Bodenstruktur auf Menge und Verfügbarkeit von Nährelementen wurde folgendermaßen dargestellt:

- a. Durch Vergleich von wäßrigen Bodenlösungen
 - im Gleichgewicht mit der homogenisierten Feinerde (2:1-Extrakt nach MEIWES et al. 1984),

Übersicht 1. Untersuchungsstandorte

Tabular summary 1. Investigated sites

Standort	Forstbezirk Pfalzgrafenweiler O-Parzelle DV97	Forstbezirk Stockach XX/3 Schindelwald	Forstbezirk Saulgau V/71 Brentenhau	Forstbezirk Schöntal	
				1	2
Höhe NN (m)	595	ca. 600	630	330–340	
Relief	eben	flache Senke	eben	eben	
Nieder- schlag (mm)	1036	850	800	800	
Gestein	Plattensandstein mit Lößlehmdecke wechselter Mächtigkeit	Beckenton der Rißmoräne	Jungmoräne (fluvio-glaziale Sandablagerung)	Lößlehm	
Bodentyp	Pseudogley- Braunerde	Pelosol	Parabraunerde	Pseudo- gley- Para- braun- erde	Pseudo- gley
Humusform	F-Mull	F-Mull	F-Mull-Moder	F-Mull -Moder	Moder
Standorts- einheit	mäßig frischer Buntsandstein- Mischlehm	nährstoff- reiche, tonige Senke	schwach ver- sauerte, kiesig- sandige Böden	grundfrische bis wechsel- feuchte Decklehme	
Bestand	Ta 95 (80 %) Fi 75 (20 %)	Fichte 50–60	Fi-Altholz verlichtet und Fi-Baumholz geschlossen	Fi 80	
Literatur zu Standort und Bestand	KENK et al. (1983)	lt. Archiv d. FVA Fi-Aufforstung seit 1840, davor vermutl. Weide	HÜTTL (1986)	— — —	

Tabelle 1. K-Versorgung der Fichtenbestände aus den Untersuchungsflächen

Table 1. K-Nutrition of the investigated spruce stands

Forstbezirk	Jahr der Analyse	Nadelalter	Quirl	K (mg/g TS)	Quelle/ Bemerkungen
Pfalzgrafen- weiler	1981	1	1	2,7	EVERS (1984)
		1	7	3,5	
	1965	1	1	8,8	REHFUSS (1967)
Stockach	1987	1	7	4,1	Archiv der FVA BW
		4	7	2,9	
Saulgau	1983	1	1	2,1	O-Parzelle Düngeparzelle Düngeparzelle HÜTTL (1986)
	1984	1	1	2,1	
	1984	1	1	2,1	
Schöntal	1983	1	7	2,7	Archiv der FVA BW
		5	7	1,6	
„Parabraunerde- Pseudogley“	1988	1	7	3,9	TWI '83, '88
		5	7	3,7	
Schöntal	1983	1	7	4,5	Archiv der FVA BW
		5	7	2,1	
„Pseudogley“	1988	1	7	4,2	TWI '83, '88
		5	7	5,3	

Tabelle 2. Chemische Grunddaten der Oberböden aus den Untersuchungsflächen

Table 2. Basic soil-chemical data of the investigated sites

Standort, Horizont, Tiefe	pH		C	N	eff. austauschbar, Perkol. 1 n NH ₄ Cl								V%
	H ₂ O	KCl			K	Ca	Mg	Mn	Al	Fe	H		
												----- µmol IÄ/g -----	
Pfalzgrafenweiler													
Ah, 0 – 5 cm	4,4	3,6	32	1,8	1,4	3,7	0,9	4,5	70,8	n. n.	3,2	7,1	
5 – 10 cm	4,4	3,7	26	1,2	1,0	0,6	0,5	2,7	63,8	n. n.	2,0	3,0	
Stockach Ah, 0 – 5 cm	5,8	5,5	84	6,0	2,8	509	26	1,3	n. n.	n. n.	n. n.	99,7	
Saulgau													
Altholz Ah, 0 – 5 cm	3,9	3,2	85	4,8	2,9	29,0	3,6	6,9	71,0	3,0	11,3	27,7	
Al, 5 – 10 cm	4,3	3,9	12	1,1	0,5	4,7	0,6	1,6	43,0	n. n.	1,6	10,4	
Baumholz Ah, 0 – 5 cm	4,2	3,5	34	2,6	0,8	4,6	1,1	6,1	73,7	0,4	4,1	7,1	
Al, 10 – 15 cm	4,3	3,8	27	1,9	0,3	2,3	0,5	2,0	54,9	0,3	2,2	4,7	
Schöntal 1 „Parabraunerde-Pseudogley“													
Ah, 0 – 5 cm	3,7	3,0	51	2,6	1,8	13,7	2,1	4,1	78,0	2,1	11,3	15,6	
Ahl, 5 – 10 cm	3,8	3,3	23	1,3	0,9	3,7	1,0	2,0	66,3	1,3	3,9	7,1	
Schöntal 2 „Pseudogley“													
Ah, 0 – 5 cm	3,5	2,9	68	2,7	1,3	9,1	2,0	3,3	87,0	8,7	17,6	8,7	
Ahl, 5 – 10 cm	3,9	3,4	22	0,8	0,8	1,9	0,6	1,8	70,7	2,2	3,5	4,1	

- im Quasi-Gleichgewicht mit wenig gespannten Wasserfilmen ($0,6 < pF < 1,8$) an Oberflächen feldfrisch gesiebter Bodenproben ($\varnothing < 2$ mm),
- im Quasi-Gleichgewicht mit wenig gespannten Wasserfilmen ($0,6 < pF < 1,8$) von Aggregatoberflächen ungestörter 100-ml-Bodenkörper (Gleichgewichts-Bodenporenlösung, HILDEBRAND 1986).

b. Durch Vergleich NH₄⁺-austauschbarer Kationen

- in homogenisierter Feinerde nach MEIWES et al. (1984),
- in natürlich gelagerten 100-ml-Bodenkörpern. Der Fluß der Austauscherlösung erfolgt unter leichter Spannung ($0,6 < pF < 1,8$), so daß der Austausch vor allem in beweglichen Wasserfilmen erfolgte. Die in 250-ml-Fraktionen aufgeteilte Perkolation wurde beendet, wenn die kumulierten Ionenmengen asymptotisch einem Endwert zustrebten (HILDEBRAND 1988).

Die Gewinnung der Gleichgewichts-Bodenporenlösungen erfolgte für jeden Horizont in 10facher (Oberboden) bis 6facher (Unterboden) Wiederholung. Die austauschbaren Kationen an natürlich gelagerten Bodenkörpern erfolgte in den Oberböden in 8- bis 6facher Wiederholung, in den Unterböden in 4facher Wiederholung. Für alle Gleichgewichtslösungen wurden Ionenbilanzen erstellt (vgl. MEIWES et al. 1984).

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Standort Pfalzgrafenweiler

In Abbildung 1 sind die Tiefenfunktionen der molaren K/Al-Verhältnisse im 2:1-Extrakt (Gleichgewicht mit dem Gesamtboden) und in der GBPL (Gleichgewicht mit wenig gespannten Wasserfilmen im natürlich gelagerten Boden) wiedergegeben.

Es zeigt sich, daß der Porenraum gegenüber dem Gesamtboden eine extreme Verarmung an wasserlöslichem K aufweist. Für den aufstockenden Fichtenbestand ist ausgeprägter Kaliummangel nadelanalytisch dokumentiert (vgl. Tab. 1).

Abb. 1. Tiefenfunktionen der molaren K/Al-Quotienten im 2:1-Extrakt und in der Gleichgewichts- Bodenporenlösung (GBPL) des Standortes „Pfalzgrafenweiler“. Der Porenraum weist eine extreme Verarmung an wasserlöslichem K auf

Fig. 1. Depth functions of molar K/Al-ratios in the 2:1-extract and in the equilibrium soil pore solution (ESPS) of the site "Pfalzgrafenweiler": The pore space shows extreme depletion of water-soluble K

Ältere Nadelanalysen von REHFUESS (1967) am gleichen Bestand belegen, daß vor 20 Jahren noch kein nadelanalytisch darstellbarer Kaliummangel bestand. Man kann also annehmen, daß das Absinken der K-Spiegel in den Nadeln auf ca. ein Drittel der Werte von 1965 durch das Entstehen von K-Verarmungszonen an den Aggregatoberflächen verursacht wurde. Dieser Ablauf fügt sich ein in Beobachtungen von HÜTTL und ZÖTTL (1985) sowie ZÖTTL und HÜTTL (1985), die einen generellen Rückgang der K-Versorgung seit 1964 in süddeutschen Tannenbeständen und in Fichtenbeständen des Alpenvorlandes feststellten.

3.2 Standort Stockach

Die Bestimmung austauschbarer Ionen an natürlich gelagerten Bodenkörpern ist vor allem dann ernährungskundlich sinnvoll, wenn eine scharfe Trennung vorliegt zwischen wurzelerreichbaren Oberflächen und nicht durchwurzelbaren Aggregatinnenbereichen. Beim Standort

Abb. 2. Kumulierte Mengen an austauschbarem Kalium, Calcium, Magnesium und Aluminium in homogenisierten und natürlich gelagerten Proben des oberen Mineralbodens aus dem Standort „Stockach“. An wurzelerreichbaren Oberflächen sind nur 0,5 µmol IÄ Kalium/g Boden (ca. 16 % der gesamten Menge an austauschbarem Kalium) lokalisiert

Fig. 2. Cumulative amounts of exchangeable potassium, calcium, magnesium, and aluminium in homogenized soil samples and undisturbed soil cores from the top soil of the site "Stockach": Only 0,5 µmol I.E. exchangeable potassium are localized on root-accessible surfaces (~ 16 % of the total exchangeable K)

Stockach mit polyedrisch-strukturiertem, tonigem Substrat ist dieser Fall gegeben. Abbildung 2 zeigt, daß nur ca. $0,5 \mu\text{mol}$ Ionenäquivalente Kalium pro Gramm Boden tatsächlich wurzelerreichbar sind gegenüber $2,8 \mu\text{mol}$ IÄ K pro Gramm homogenisierter Feinerde. Im Gegensatz zum Magnesium zeigt die Summenkurve der ausgetauschten K-Mengen einen ausgeprägt asymptotischen Verlauf (vgl. auch Abb. 5). Nach dem K-Austausch an den umströmten Oberflächen fand somit so gut wie keine kurzfristige Nachlieferung aus dem Pool des austauschbaren Kaliums im Aggregatinnern statt. Während in der Austauscherlösung des Homogenisates kein Aluminium nachweisbar war, konnte von den Aggregatoberflächen bereits austauschbares Aluminium mobilisiert werden (vgl. auch Abschn. 3.4.2).

3.3 Standort Saulgau

Aus Abbildung 3 ist ersichtlich, daß die K/Al-Quotienten abnehmen in der Reihenfolge: 2:1-Extrakt, GBPL-feldfrisch gesiebt, GBPL-natürliche Lagerung. Der nadelanalytisch festgestellte K-Mangel wird also auch hier begleitet von einer selektiven K-Verarmung solcher Oberflächen, die von wenig gespanntem Bodenwasser umgeben sind.

Aus den Tiefenfunktionen der Abbildung 3 geht ferner hervor, daß im Oberboden die Ungleichgewichte bei dem unmittelbar benachbarten Fichten-Baumholz noch schärfer auftreten: In 10–15 cm Bodentiefe gibt es wie beim Standort Pfalzgrafenweiler Fäule, daß die Kaliumkonzentrationen der GBPL einzelner Bodensäulen (100 ml) unter der Nachweisgrenze liegen. Offensichtlich ist die inhomogene K-Verteilung im Boden um so ausgeprägter, je größer die aktuelle Festlegungsrate in der Biomasse ist. Ein ähnlicher Befund ergab sich beim Vergleich der Kleinstandorte „Fichte“ und „Bergahorn“ des Bannwaldes „Napf“ am Feldberg im Südschwarzwald (HILDEBRAND 1988).

Abb. 3. Tiefenfunktionen der molaren K/Al-Quotienten im 2:1-Extrakt, in der GBPL des feldfrisch gesiebten Bodens ($\phi < 2 \text{ mm}$) und in der GBPL natürlich gelagerter Bodenkörper des Standortes „Saulgau“. Im Falle der stark durchwurzelter Ah- und Al-Horizonte des Fichten-Baumholzes ist die K-Verarmung von Aggregatoberflächen am weitesten fortgeschritten

Fig. 3. Depth functions of molar K/Al-ratios in the 2:1-extract, in the ESPS of sieved soil samples (field-fresh, $\phi < 2 \text{ mm}$), and in the ESPS of undisturbed soil cores of the site „Saulgau“. In the intensively rooted Ah- and Al-horizons of the young timber the highest level of K-depletion on aggregate surfaces was observed

3.4 Standort Schöntal

3.4.1 Teilstandort „Pseudogley“

Bei diesem Teilstandort besteht bei annähernd gleichem Tiefenverlauf der K/Al-Quotienten im 2:1-Extrakt eine weniger strukturabhängig inhomogene K-Verteilung als beim Teilstandort „Parabraunerde-Pseudogley“ (Abb. 4, untere Darstellung). Damit ist ein größerer Pool an was-

Abb. 4. Tiefenfunktionen der molaren K/Al-Quotienten im 2:1-Extrakt, in der GBPL des feldfrisch gesiebten Bodens ($\varnothing < 2$ mm) und in der GBPL natürlich gelagerter Bodenkörper der Profile „Parabraunerde-Pseudogley“ und „Pseudogley“ des Standortes „Schöntal“: Bei nahezu gleicher Tiefenfunktion des molaren K/Al-Quotienten im 2:1-Extrakt besteht im Falle des „Parabraunerde-Pseudogley“ (obere Darstellung) die deutlichere K-Verarmung an Aggregatoberflächen der Ahl- und Al-Horizonte

Fig. 4. Depth functions of molar K/Al-ratios in the 2:1-extract, in the ESPs of sieved soil samples (field-fresh, $\varnothing < 2$ mm), and in the ESPs of undisturbed soil cores from the profiles „Parabraunerde-Pseudogley“ and „Pseudogley“ of the site „Schöntal“: At nearly identical molar K/Al-ratios in the aqueous 2:1-extract, the K-depletion on aggregate surfaces of the Ahl- and Al-horizons in the profile „Parabraunerde-Pseudogley“ (illustration above) is more advanced

Abb. 5. Kumulierte Mengen an austauschbarem Kalium und Aluminium sowie die Sättigung an austauschbarem Kalium in homogenisierten und natürlich gelagerten Bodenproben des Profils „Parabraunerde-Pseudogley“ aus dem Standort „Schöntal“. In den durchwurzelten Mineralbodenhorizonten, die keine direkte K-Zufuhr durch Streufall erhalten (Ah-Horizont), ist die inhomogene Verteilung des austauschbaren Kaliums am deutlichsten

Fig. 5. Cumulative amounts of exchangeable potassium and aluminium as well as K-saturation in homogenized soil samples and undisturbed soil cores from the profile “Parabraunerde-Pseudogley” of the site “Schöntal”. In the rooted mineral horizons whose K-supply is not steadily restored by litterfall the nonhomogeneous distribution of exchangeable K is most distinct

serlöslichem K wurzelerreichbar, was sich auch in den aktuellen Nadelanalysen äußert (vgl. Tab. 1). Die Ungleichgewichte zwischen Aggregatoberflächen und Gesamtboden zeigen sich hier in einer nach dem Grad der Homogenisierung abgestuften Parallelverschiebung der K/Al-Tiefenfunktionen.

3.4.2 Teilstandort „Parabraunerde-Pseudogley“

Wie im Falle von Pfalzgrafenweiler und Saulgau gibt es auch hier in der Rhizosphäre 100-ml-Kompartimente, die praktisch kein wasserlösliches Kalium in die Gleichgewichts-Bodenporenlösung abgeben (Abb. 4, obere Darstellung, Ahl-Horizont). Die Verarmung an wasserlöslichem Kalium an Aggregatoberflächen der Ahl- und Al-Horizonte wird auch durch die K/Al-Quotienten in der GBPL des feldfrisch gesiebten Bodens wiedergegeben, nicht aber durch die K/Al-Quotienten des 2:1-Extraktes. Bei der Siebung können offensichtlich K-reichere Meso- und Mikroaggregate intakt bleiben, während das 24stündige Schütteln zur Gewinnung des 2:1-Extraktes mit Sicherheit eine vollständige Homogenisierung bewirkt hat.

Abbildung 5 zeigt, daß diese Ungleichgewichte auch deutlich durch die Verteilung austauschbarer Ionen dargestellt werden können und damit relativ stabil in der Bodenstruktur verankert sind: In den durchwurzelten Ahl-, Al- und BtSw-Horizonten ist auf niedrigem Niveau nur die Hälfte bis zwei Drittel der Gesamtmenge an austauschbarem Kalium an wurzelerreichbaren Oberflächen lokalisiert. Im Ah-Horizont sorgt die K-Anlieferung durch Streufall für eine homogenere und weniger strukturabhängige Verteilung des austauschbaren Kaliums. Austauschbares Aluminium erscheint dagegen fast zu 100 % in der Perkulationslösung. Im BtSw-Horizont wird bei natürlicher Lagerung sogar mehr Aluminium freigesetzt als im homogenisierten Feinboden. Offensichtlich entstehen durch Homogenisierung zusätzliche, nicht dem Ionenaustausch unterliegende Bindungsmöglichkeiten für Al. Das bedeutet, daß die tatsächlich elektrolytaustauschbare Al-Menge durch Homogenisierung erheblich unterschätzt werden kann (vgl. auch Abb. 2, rechte Darstellung). Entsprechend geringer ist auch die relative Sättigung an austauschbarem Kalium an Aggregatoberflächen.

4 Schlußfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, daß die Bodenstruktur Informationen beinhaltet, die für die Erklärung von Ernährungsstörungen auf Bestandesebene bedeutsam sind. In drei Fällen mit starkem K-Mangel gab es in der Rhizosphäre 100-ml-Kleinkompartimente, in denen die K-Gehalte von wäßrigen Lösungen im Gleichgewicht mit dem Chemismus beweglicher Wasserfilme natürlicher Aggregatoberflächen unter der Nachweisgrenze lag. Das Aufsuchen noch K-haltiger Oberflächen dürfte daher auf diesen Standorten die Feinwurzelverteilung im Oberboden wesentlich mitbestimmen.

Die Intensität der strukturgebundenen Ungleichgewichte in der Verteilung wasserlöslicher Kationen hängt offensichtlich auch vom Bestandesalter ab und damit von der aktuellen Festlegungsrate an Basizität in der aufwachsenden Biomasse. Dies bedeutet, daß der in der Biomasse akkumulierte Kationenüberschuß zum großen Teil aus dem begrenzten Pool der wurzelerreichbaren Oberflächen stammt, und daß die Ausgleichreaktionen (z. B. konvektive und diffusive Transporte) und -mechanismen (z. B. Aggregatneubildung durch Bodentiere) dieser Verarmung in der Regel hinterherhinken (vgl. KAUPENJOHANN u. HANTSCH 1987). Der einzige Fall, in dem eine nahezu homogene, d. h. von der Bodenstruktur unabhängige Verteilung der K-, Ca- und Mg-Gehalte gefunden wurde, war ein in den 60er Jahren intensiv gekalkter Fichtenstandort auf Oberem Buntsandstein mit extrem hohem Regenwurmbesatz und einem von Regenwurmaggregaten geprägten Ah-Horizont (HILDEBRAND 1988). Andererseits können auch in Böden mit okular schwachem Aggregierungsgrad stark inhomogene Verteilungen wasserlöslicher Elemente gefunden werden – so z. B. in einer podsoligen Braunerde auf lehmigem Grus (ARINUS-Projekt, vgl. ZÖTTL et al. 1987; HILDEBRAND 1989).

Bei der Perkolation natürlich gelagerter Bodensäulen mit Austauscherglösungen werden asymptotisch angenäherte Endwerte der kumulierten Kaliummengen erreicht, die deutlich unter der Gesamtmenge an austauschbarem Kalium liegen. Daraus geht hervor, daß die Nachlieferungsrate aus dem Aggregatinnern im Vergleich zum Austausch an den Aggregatoberflächen gering ist. Die Ursache dieses Verhaltens dürfte darin liegen, daß Kalium vorwiegend durch Diffusion bewegt wird (RENGER et al. 1981). HORN (1987) begründet die inhomogene Verteilung von K und Ca mit der Einschränkung der Konvektion durch geringe Wasserleitfähigkeit im Aggregatinnern und mit Behinderung der Diffusion durch hohe Tortuosität des Intraaggregatporensystems. Nach HORN und TAUBNER (1989) ist auch die K-Freisetzungsrate aus aggregierten Böden um so geringer, je größer die Aggregate sind, d. h., die Zerstörung der Bodenstruktur bewirkt eine nicht vorhersagbare Erhöhung der Nährstoffanlieferung durch Diffusion. Da sich nach BABEL (mündl. Mitteilung, Veröffentlichung in Vorbereitung) Fichtenwurzeln hauptsächlich in Bodenhohlräumen befinden, die das Bodenwasser spannungsfrei bis spannungsarm binden, ist also kurzfristig nur der an diese Oberflächen gebundene Ionenpool direkt verfügbar.

Die Bestimmung der austauschbaren Ionen an Aggregatoberflächen ermöglicht somit bei aggregierten Böden eine realistischere Einschätzung der tatsächlich wurzelerreichbaren, austauschfähigen Nährelementvorräte sowie der tatsächlich rhizosphärenwirksamen Ionenrelationen. Es wird so auch verständlich, daß nach LIU und TRÜBY (1989) trotz hoher Gesamt mengen an austauschbarem Kalium in der Feinerde K-Mängel bei Fichten verbreitet sind.

Bei Magnesium und Calcium treten ebenfalls stark inhomogene Verteilungen der wasserlöslichen und austauschbaren Anteile auf (vgl. Abb. 2). Auch bei diesen Elementen kann die Berücksichtigung ihrer heterogenen Verteilung in der Rhizosphäre die bodenanalytische Ernährungsdiagnose wesentlich verbessern (vgl. KAUPENJOHANN u. HANTSCH 1989). Da Magnesium im Boden gegenüber Kalium relativ beweglich ist, können Mg-Gehalte bereits in der homogenisierten Feinerde bei Einbeziehung einer großen Standortvielfalt die Mg-Gehalte in Fichtennadeln mit hoher Reststreuung erklären ($r^2 = 0,64$, $N = 40$, LIU u. TRÜBY 1989). Dies zeigt, daß die heterogene Mg-Verteilung in der Rhizosphäre den Mg-Ernährungszustand offensichtlich mitbestimmt.

Grundsätzlich können inhomogene Ionenverteilungen nicht aus Analysenwerten der homogenisierten Feinerde abgeleitet werden. Strukturgebundene Ungleichgewichte der Verteilung austauschbarer und wasserlöslicher Ionen sind eine eigenständige, bodenchemische Eigenschaft aggregierter Waldböden mit hohem Informationswert zur Erklärung von Ernährungsstörungen.

5 Ausblick

Ungleichgewichte in offenen, polidispersen Systemen charakterisieren einen Zustand, in dem sich Wirkung und Gegenwirkung nicht aufheben. Sie sind damit ein Indiz dafür, daß die Systeme – in diesem Fall die untersuchten Böden – insgesamt driften. Die Richtung der Drift ist durch den chemischen Zustand der Aggregatoberflächen gekennzeichnet, während das Ausmaß des Ungleichgewichtes ein Ausdruck der Driftgeschwindigkeit ist.

Danksagung

Ich danke Frau R. BRAMER und Herrn S. HIRLER für die gewissenhafte Durchführung der Analysen und für die sorgfältige Gewinnung der Bodenlösungen. Die Untersuchungen wurden gefördert durch das Projekt Europäisches Forschungszentrum zur Luftreinhaltung (PEF), wofür an dieser Stelle bestens gedankt sei.

Zusammenfassung

Auf fünf Fichtenstandorten Südwestdeutschlands mit starkem bis mäßigem Kaliummangel wurde im durchwurzelten Boden eine selektive, zum Teil extreme Kaliumverarmung an Makroporenwänden bzw. Aggregatoberflächen gefunden. Diese Verarmung wird durch zwei unabhängige Methoden dargestellt:

- a. Durch Vergleich wäßriger Bodenlösungen, die im (Quasi-) Gleichgewicht stehen zu umströmten Oberflächen in homogenisierten und natürlich gelagerten Bodenkörpern: Bei den drei Standorten mit starkem K-Mangel gab es im intensiv durchwurzelten Mineralboden 100-ml-Kleinkompartimente, in denen die natürlichen Makroporenwände praktisch kein Kalium in die Lösungsphase abgeben.
- b. Durch Vergleich der kumulierten K-Mengen und der relativen K-Anteile in Austauschlösungen, die homogenisierte und natürlich gelagerte Bodenproben durchströmt haben: Die kumulierten Mengen an austauschbarem Kalium erreichen in natürlich gelagerten Bodenkörpern asymptotisch einen Endwert, der meist nur einen Bruchteil der im Homogenisat austauschbaren K-Gesamtmenge darstellt. Das Aggregatinnere setzt also kurzfristig kaum austauschbares Kalium frei. Durch Homogenisierung werden damit wurzelerreichbare, austauschbare K-Vorräte erheblich überschätzt. Es kommt dazu, daß auch der relative Anteil an austauschbarem Kalium an Aggregatoberflächen gegenüber dem Homogenisat wesentlich geringer ist, so daß die Aufhebung der Bodenstruktur eine zu günstige Einschätzung der rhizosphärenwirksamen Ionenrelationen bewirkt.

Die inhomogene, an die Bodenstruktur gebundene Verteilung wasserlöslicher und austauschbarer Ionen erweist sich als Regelfall in aggregierten sauren Waldböden. Ausmaß und Richtung der strukturgebundenen Ungleichgewichte haben auf Bestandesebene hohen Informationswert für die Waldernährung; als eigenständige bodenchemische Eigenschaft können sie jedoch nicht aus Analysendaten homogenisierter Feinerde abgeleitet werden.

Summary

The importance of forest soil structure for tree nutrition, illustrated by potassium uptake

In five spruce stands (*Picea abies* Karst.) in South West Germany with distinct to moderate K-deficiency, extreme K-depletions were found on soil surfaces which are in contact with soil water of low suction. This depletion is demonstrated by two independent methods:

- a. By comparison of aqueous, under low suction percolating soil solutions which are in (quasi-) equilibrium with surfaces of sieved soil samples and undisturbed soil cores: 100-ml-soil-compartments exist in the intensively rooted top soil of the three sites with the most distinct K-deficiency where the mobilization of K from macropore walls practically does not exist.
- b. By comparing the cumulative amounts of exchangeable K and the K-saturation in exchange solutions which have percolated through homogenized soil samples and undisturbed soil cores: In undisturbed soil cores the cumulated amounts of K, mobilized by cation exchange, approximate asymptotically a final value which represents only a small fraction of the exchangeable K in the homogenized soil. Inner parts of soil aggregates hardly contribute to the mobilization of exchangeable K. By removing soil structure (homogenization), the short-term available supply of exchangeable K is considerably overestimated. Furthermore, K-saturation on aggregate surfaces is significantly lower in comparison to the homogenized bulk soil, i. e. the conditions of K-uptake are less favorable as revealed by customary soil chemical analysis.

The nonhomogenic and structure-dependent distribution of water-soluble and exchangeable cations is the rule in aggregated acid forest soils. Extent and direction of structure-dependent disequilibria contain significant information for explaining the nutritional status of individual stands. However, as autonomous soil chemical properties they can not be derived from bulk soil-chemical data.

Literatur

- EVERS, F. H., 1984: Läßt sich das Baumsterben durch Walddüngung oder Kalkung aufhalten? Der Forst- u. Holzwirt **39**, 75–80.
- EVERS, F. H.; SCHÖPFER, W., 1988: Darstellung der Ernährungs- und Belastungsverhältnisse der Fichte-Ergebnisse der Belastungsinventur Baden-Württemberg 1983. Allg. Forst- u. J. Ztg. **159**, 146–154.
- HANTSCH, R.; KAUPENJOHANN, M.; HORN, R.; ZECH, W., 1986: Kationenkonzentrationen in der Gleichgewichts- und Perkolationsbodenlösung (GBL – PBL) – ein Methodenvergleich. Z. Pflanzenernähr. Bodenkde. **149**, 136–139.
- HILDEBRAND, E. E., 1986: Ein Verfahren zur Gewinnung der Gleichgewichts-Bodenporenlösung. Z. Pflanzenernähr. Bodenkde. **149**, 340–346.
- 1988: Strukturgebundene, chemische Ungleichgewichte in Waldböden. Bulletin BGS **12**, 67–86.
- 1989: Die ökochemische Bewertung von Bodenprofilen durch Analyse des „Makroporen-Wasserfadens“. KfK PEF 50/1, 11–22.
- HORN, R., 1987: Die Bedeutung der Aggregation für die Nährstoffsorption in Böden. Z. Pflanzenernähr. Bodenkde. **150**, 13–16.
- HORN, R.; TAUBNER, H., 1989: Effect of aggregation on potassium flux in a structured soil. Z. Pflanzenernähr. Bodenkde. **152**, 99–104.
- HÜTTL, R., 1986: Neuartige Waldschäden und Nährelementversorgung von Fichtenbeständen in Südwestdeutschland. Freiburger Bodenkundl. Abhandlg. **16**.

- HUTTL, R.; ZOTTL, H. W., 1985: Ernährungszustand von Tannenbeständen in Süddeutschland – ein historischer Vergleich. AFZ 38, 1011–1013.
- KAUPENJOHANN, M.; HANTSCH, R., 1987: Die kurzfristige pH-Pufferung von gestörten und ungestörten Waldbodenproben. Z. Pflanzenernähr. Bodenkde. 150, 156–160.
- 1989: Nährstofffreisetzung aus homogenen und in situ Bodenproben: Bedeutung für die Waldernährung und Gewässerversauerung. Kali-Briefe (Büntehof) 19 (8), 557–572.
- KENK, G.; EVERS, F. H.; UNFRIED, P.; SCHROTER, H., 1983: Düngung als Therapie gegen Immissionseinwirkungen in Tannen-Fichtenbeständen? Dargestellt am Beispiel einer langfristig beobachteten Düngungs-Versuchsanlage im Nordschwarzwald. Allg. Forst- u. J. Ztg. 154, 153–170.
- LIU, J. Ch., 1988: Ernährungskundliche Auswertung von diagnostischen Düngeversuchen in Fichtenbeständen (*Picea abies* Karst.) Südwestdeutschlands. Freiburger Bodenkundl. Abhandlg. 21.
- LIU, J. Ch.; TRUBY, P., 1989: Bodenanalytische Diagnose von K- und Mg-Mangel in Fichtenbeständen (*Picea abies* Karst.). Z. Pflanzenernähr. Bodenkde. 152, im Druck.
- MEIWES, K. J.; KONIG, N.; KHANNA, P. K.; PRENZEL, J.; ULRICH, B., 1984: Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben 7, 1–67.
- REHFUESS, K. E., 1967: Standort und Ernährungszustand von Tannenbeständen (*Abies alba* Mill.) in der Südwestdeutschen Schichtstufenlandschaft. Forstwiss. Cbl. 86, 321–348.
- RENGER, M.; STREBEL, O.; GRIMME, H.; FLEIGE, H., 1981: Nährstoffanlieferung an die Pflanzenwurzel durch Massenfluß. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 30, 63–70.
- ZOTTL, H. W.; HUTTL, R., 1985: Schadsymptome und Ernährungszustand von Fichtenbeständen im Südwestdeutschen Alpenvorland. AFZ 9/10, 197–199.
- ZOTTL, H. W., 1985: Waldsterben und Nährelementversorgung. Düsseldorfer Geobot. Kolloq. 2, 31–41.
- ZOTTL, H. W.; FEGER, K.-H.; BRAHMER, G., 1987: Projekt ARINUS: 1. Zielsetzung und Ausgangslage. KfK PEF 12/1, 269–281.

Anschrift des Verfassers: Dr. E. E. HILDEBRAND, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt, Bodenkunde und Waldernährung, Wonnhaldestr. 4, D-7800 Freiburg