Sonderdruck: Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie, Göttingen 1976.

INPUT, OUTPUT UND INTERNER UMSATZ VON CHEMISCHEN ELEMENTEN BEI EINEM BUCHEN- UND EINEM FICHTENBESTAND

B. ULRICH, R. MAYER, P.K. KHANNA, G. SEEKAMP & H.W. FASSBENDER

Abstract

The element flux balance measured over a period of 4 years in a beech and a spruce stand is given. By the use of measured data two element fluxes are calculated: the leaching of salts and metabolic substances from the canopy by precipitation (part of the internal turnover), and filtering of atmospheric substances by impaction with the forest canopy (atmospheric input). With these data the flux balance for the forest ecosystem is complete, element uptake by roots included.

It was found that, within the ecosystem, the soil is gaining considerable amounts of S due to a high input of S from the atmosphere (air pollution) and is loosing Al and Mn due to weathering of soil minerals mainly related to acidity in incident precipitation. Soil chemical processes possibly associated with these gains and losses are discussed.

Die Untersuchungen zum Elementhaushalt des Buchen- und Fichtenbestandes im Solling wurden im Jahre 1969 aufgenommen und sie werden zumindest in Teilbereichen bis heute fortgeführt.

Wie bei zahlreichen ähnlichen Untersuchungen in verschiedenen Ländern geht es dabei zunächst um die quantitative Erfassung von Zufuhr (Input) und Ausfuhr (Output) einzelner chemischer Elemente sowie deren Verteilung und Umsetzung innerhalb des Wald-Ökosystems.

Einige Elemente werden ganz oder teilweise in Teilbereichen des Ökosystems – im Holz, im Humus, im Mineralboden – festgelegt. Element-Inventuren, die in zeitlicher Abfolge von Jahren oder länger durchgeführt werden, geben Auskunft über diesen Teil des Elementhaushalts. Dieser Vortrag beschäftigt sich in erster Linie mit dem beweglichen Anteil, den Elementflüssen.

Messung von Flüssen

Die Elementflüsse wurden über längere Zeiträume kontinuierlich verfolgt und zur Berücksichtigung der natürlichen Variabilität in räumlichen Wiederholungen erfaßt. Sämtliche Bioelemente wurden in die Untersuchungen mit einbezogen, d.h. also sämtliche Elemente, die im Gesamt-Stoffumsatz quantitativ von Bedeutung sind, also auch solche, die nicht als Pflanzennährstoffe gelten. Hierzu zählen H, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Al, Cl, S, P und N.

Der wesentliche Vorteil dieser Arbeitsweise liegt in der Möglichkeit, für die Elementflüsse in wässriger Lösung (Niederschlagswasser, Bodenwasser) eine Salzbilanz aufstellen zu können, d.i. eine Gegenüberstellung sämtlicher Kationen und Anionen in der Lösung. Damit lassen sich Meßergebnisse kontrollieren und

wechselseitige Abhängigkeiten verschiedener Elemente auffinden.

Über die genannten Elemente hinaus erstreckte sich ein spezielles Meßprogramm auf die Schwermetalle Cd, Cr, Co, Cu, Ni und Pb, die insbesondere unter dem Aspekt des Umweltschutzes von Interesse sind.

Die angewandten Meßmethoden und Meßprogramme waren so ausgerichtet, daß das Wald-Ökosystem als Ganzes wie auch einzelne Teilsysteme bilanziert werden konnten. Dies soll Abb. 1 veranschaulichen: Hier sind in einem Kompartiment-Modell diejenigen Kompartimente und Flüsse graphisch dargestellt, die in den untersuchten Wald-Ökosystemen von Bedeutung sind.

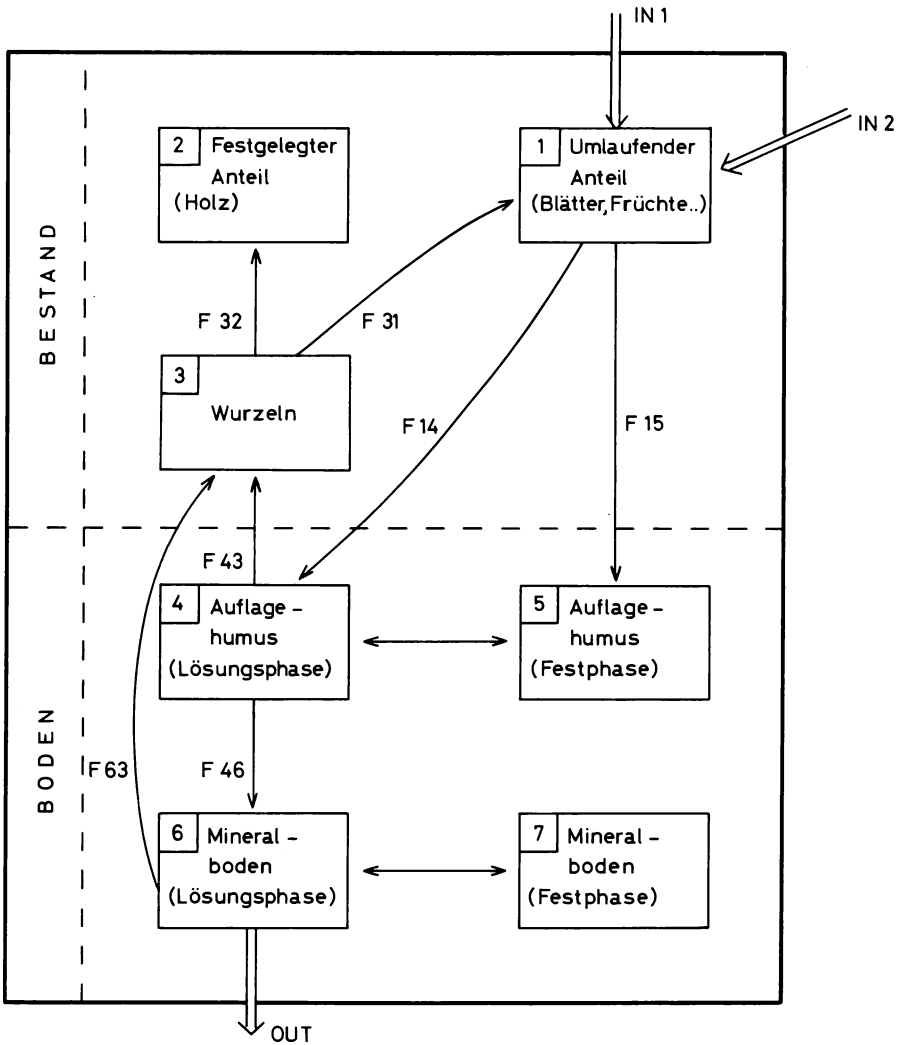

Abb. 1. Kompartiment-Modell des Element-Kreislaufs in einem Wald-Ökosystem

Input

Der Input (IN) der untersuchten Elemente beschränkt sich in den Solling-Beständen praktisch ausschließlich auf eine Zufuhr aus der Atmosphäre. Solange dieser Element-Input an die atmosphärischen Niederschläge (Regen, Schnee, Tau, Staub) gekoppelt ist (IN 1) läßt er sich mit Hilfe von Niederschlagsmeßgefäßen (Totalisatoren) über dem Kronendach oder außerhalb des Bestandes erfassen. Der Elementfluß ergibt sich als Produkt aus dem Fluß des Transportmittels – d.i. der Niederschlagsmenge – und seiner Elementkonzentration.

Es existiert ein weiterer Input (IN 2), den wir als Filterung durch die Baumkronen bezeichnen. Dabei handelt es sich um atmosphärische Stoffe, vor allem Gase und Aerosole, die besonders an Blatt- und Nadeloberflächen absorbiert und von einem nachfolgenden Niederschlag abgewaschen werden. Dieser Input ist nicht direkt meßbar. In zahlreichen Elementbilanzen für Wald-Ökosysteme, aber auch in Bilanzen anderer Ökosysteme oder in Darstellungen von geochemischen Kreisläufen fehlt dieser Fluß völlig, obgleich er, wie später gezeigt wird, quantitativ dieselbe Rolle spielen kann wie der Input durch Niederschläge.

Flüsse innerhalb des Ökosystems

Die Bodenoberfläche stellt eine Meßebene innerhalb des Wald-Ökosystems dar. Zwei Elementflüsse treffen auf diese Ebene:

1. Der mit dem Streufall gekoppelte Elementfluß (F 15), der mit einer größeren Anzahl von Streufängen erfaßt wird. Durch Aufteilung in einzelne Streukomponenten wie Blätter, Knospenschuppen, Blüten und Früchte läßt sich dieser Fluß in weitere Teilflüsse aufgliedern. Darauf soll jedoch hier nicht weiter eingegangen werden.
2. Der mit dem Bestandesniederschlag gekoppelte Elementfluß (F 14), der wie der bereits erwähnte Niederschlags-Input mit Totalisatoren erfaßt wird. Bei dem Buchenbestand wird der Stammabfluß als selbständiger Teilfluß mit Ablaufrinnen erfaßt.

Output

Der Output (OUT) ist für die hier untersuchten Elemente an den Sickerwasserstrom gekoppelt, der den Boden in vertikaler Richtung auf seinem Weg zum Grundwasserspeicher durchfließt. Die Meßebene liegt unterhalb der durchwurzelten Bodenschicht in einer Tiefe von 80 bis 100 cm, aus der kein nennenswerter Aufstieg von Kapillarwasser erfolgt und in der die Inhomogenität der Niederschlagsinfiltration weitgehend ausgeglichen ist. Letztere ist bei Buche infolge der ungleichen Verteilung der Bestandesniederschläge auf Stammablauf und Kronentraufe besonders stark ausgeprägt.

In dieser Meßebene wurde der Sickerwasserstrom mit Hilfe von Unterdrucklysimetern erfaßt (Mayer, 1974). Bei diesen Lysimetern handelt es sich um keramische Platten aus chemisch inertem Material, die ohne Störung der Durch-

Tabelle 1. Solling B1 (Buche) – Mittlere jährliche Elementflüsse – Mai 1969 bis April 1973
(in Klammern: Fehler des Mittelwertes)
(+) Meßzeitraum für die Schwermetall-Flüsse: August 1972 bis Juli 1974
(§) Negative Werte = Vorratsabnahme (source) Positive Werte = Vorratszunahme (sink)

SOLLING B1/BUCHE Fluß	$1/m^2$ H_2O	kg/ha Jahr H	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	Cl	S	P	N	g/ha Jahr (+) Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb
Niederschlagsinput IN 1	1018	,9 (,04)	7,2 (,3)	3,7 (,2)	14,4 (1,0)	2,4 (,1)	,9 (,05)	,2 (,3)	1,1 (,7)	16,0 (,6)	24,1 (1,0)	,8 (,1)	22,6 (1,0)	17,1 (1,6)	8,4 (1,9)	9,0 (2,4)	233 (22)	52,0 (10)	527 (17)
Filterung IN2			(5,5) (1,1)	13,0 (2,6)	11,4 (2,2)	1,4 (,3)	,3 (,1)	1,7 (,4)	,5 (,2)	13,4 (2,0)	22,2 (3,3)	,0	1,2 (0,4)						
Gesamt-Input			12,7 (1,1)	16,7 (2,6)	25,8 (2,4)	3,8 (,3)	1,2 (0,1)	1,9 (,5)	1,6 (,7)	29,4 (2,1)	46,3 (3,5)	0,8 (,1)	23,8 (1,1)						
Bestandesnieder-schlag F14	866	1,4 (,05)	12,9 (,4)	24,3 (,9)	28,3 (,9)	4,0 (,3)	1,1 (,4)	3,0 (,1)	1,6 (,1)	30,8 (1,1)	47,6 (1,2)	0,6 (,1)	23,8 (,6)	21,9 (2,0)	7,1 (1,0)	13,2 (2.1)	320 (60)	35,5 (5,8)	309 (20)
Streufall F15			,7 (,2)	16,0 (3,2)	16,2 (3,2)	1,6 (,3)	1,8 (,4)	5,1 (1,0)	,5 (,1)	,8 (,2)	3,2 (,6)	4,0 (,8)	49,0 (9,8)	4,7 (1,9)	5,9 (,3)	7,6 (1,0)	109 (9)	16,9 (1,5)	13 (1)
Holzzuwachs F32			,1 (,02)	6,6 (1,3)	7,7 (1,5)	1,7 (,3)	,7 (,1)	3,4 (,7)	,1 (,02)	,1 (,02)	,5 (,1)	2,1 (,4)	13,1 (2,6)						
Sickerwasser-Output OUT	473 (79)	,3 (,05)	10,1 (1,6)	2,0 (,5)	14,3 (2,7)	2,8 (,5)	,5 (,1)	4,6 (,8)	11,5 (2,2)	26,6 (4,1)	25,6 (4,6)	,1 (,03)	6,0 (1,4)	5,4 (,5)	7,7 (1,1)	,6 (,2)	176 (17,6)	13,2 (2,4)	14 (12)
Boden-Input = F14 + F15	866		13,6 (,5)	40,3 (3,3)	44,5 (3,3)	5,6 (,4)	2,9 (,6)	8,1 (1,0)	2,1 (,14)	31,6 (1,1)	50,8 (1,3)	4,6 (,8)	72,8 (9,8)	26,6 (2,8)	13,0 (1,0)	20,8 (2,3)	429 (60)	52,4 (6,0)	322 (20)
Int. Umsatz d. Kron. Auswasch. U	aus Bilanz berechnet		,2 (1,2)	7,6 (2,8)	2,5 (2,6)	,2 (,4)	– ,1 (,4)	1,1 (,5)	,0 (,7)	1,4 (2,4)	1,3 (3,7)	– ,2 (,2)	,0 (1,2)						
Int. Gesamt Umsatz = U + F15			,9 (1,2)	23,6 (4,2)	18,7 (4,1)	1,8 (,5)	1,7 (,6)	4,0 (1,1)	0,5 (,8)	2,2 (2,4)	4,5 (3,7)	3,8 (,8)	49,0 (9,9)						
Wurzel-Aufnahme = F43 + F63			1,0 (1,2)	30,2 (4,4)	26,4 (4,4)	3,5 (0,6)	2,4 (,6)	7,4 (1,3)	,6 (,8)	2,3 (2,4)	5,0 (3,7)	5,9 (,9)	62,1 (10,2)						
Änderungen im Bodenvorrat §			2,5 (2,1)	8,1 (5,7)	3,8 (6,1)	– ,7 (,9)	,0 (,8)	–6,1 (1,8)	–10,0 (2,3)	2,7 (4,9)	20,2 (6,1)	– 1,4 (1,2)	4,7 14,1)						

wurzelung und des Bodenprofils über der Platte in den Boden eingebracht wurden. In dem gewonnenen Lysimeterwasser wurden die Elementkonzentrationen bestimmt. Die Elementflüsse wurden als Produkt aus Lösungskonzentration und Lösungsmenge berechnet. Für letztere wurde die Sickerwassermenge eingesetzt, wie sie von den Bodenhydrologen ermittelt wurde (s. Benecke 1976, in diesem Band).

Zur Bestimmung fehlender Glieder der Flüssebilanz, die einer direkten Messung nicht zugänglich sind, ist es notwendig, die zeitliche Zu- oder Abnahme des Elementvorrats in den Beständen zu kennen (F32). Diese Größen ergaben sich aus den von anderen Arbeitsgruppen ermittelten Zuwachsdaten für die einzelnen Bestandesteile multipliziert mit den jeweiligen von uns bestimmten Elementgehalten.

Flüssebilanz für den Bestand

Damit sind die experimentell bestimmten Flüsse genannt. Es folgen diejenigen Flüsse, die nicht direkt bestimmt werden konnten, die jedoch auf indirektem Wege aus der Flüssebilanz der experimentell bestimmten Größen abgeleitet wurden.

Zunächst soll auf den Element-Input aus der Atmosphäre zu dem Wald-Ökosystem näher eingegangen werden. Bei diesem Input handelt es sich um eine kritische Größe bei der Interpretation der Flüssebilanz eines Wald-Ökosystems. In Tabelle 1 ist die Flüssebilanz für den Solling-Buchenbestand B1 wiedergegeben. Die Zahlen stellen die mittleren jährlichen Elementflüsse einer 4 jährigen Meßperiode von Mai 1969 bis April 1973 dar. Zunächst sollen betrachtet werden

– der jährliche Input mit den Niederschlägen IN1, wie er über dem Kronendach oder außerhalb des Waldes in Totalisatoren gemessen wurde,
– der Bioelementfluß, der mit dem Bestandesniederschlag gekoppelt ist, F14.

Für die meisten Elemente kommt es zu einer beträchtlichen Erhöhung der Elementfracht in den Niederschlägen bei der Passage durch den Kronenraum. Lediglich für N und P sowie für einige Schwermetalle gilt dies nicht.

An dem Kompartiment-Modell (Abb. 1) soll veranschaulicht werden, wie es zu dieser Elementzufuhr kommt: Der Niederschlags-Input IN1 nimmt bei der Passage des Kronenraumes zwei weitere Elementflüsse auf:

1. Einen zusätzlichen Input IN2, der bereits als „Filterung" bezeichnet wurde. Wenn Gase und Aerosole auf Blätter, Nadeln und andere pflanzliche Oberflächen auftreffen, werden sie z.T. ausgelöst und adsorbiert oder unterliegen einer chemischen Reaktion, bevor sie von einem nachfolgenden Niederschlag abgewaschen werden. Bei diesen Vorgängen handelt es sich um eine spezifische Wechselwirkung zwischen den pflanzlichen Oberflächen und den Stoffen in der Atmosphäre, die durch eine künstliche Oberfläche nicht nachgeahmt werden kann. Eine direkte Messung der Filterung wird weiterhin dadurch unmöglich gemacht, daß für die in Luftfiltern, Aerosolfallen oder ähnlichen Vorrichtungen gefundenen Elementmengen kein Flächenbezug zu dem Wald-Ökosystem verfügbar ist.
2. Der zweite vom Bestandesniederschlag aufgenommene Elementfluß ist ein Teil des Internen Umsatzes F31, der von den Wurzeln aufgenommen und dann

z.T. als Streu, z.T. mit den Niederschlägen wieder zum Boden zurückkehrt. Auch dieser Fluß ist nicht direkt meßbar.
Welche Rolle spielen diese beiden Flüsse in der Elementbilanz? Auf der Grundlage des Gesetzes von der Erhaltung der Masse kann folgende Bilanzgleichung für den oberirdischen Teil des Waldbestandes aufgestellt werden:

$$IN1 + IN2 + AFN - F14 - F15 - \Delta V_{Bestand} = 0 \qquad (1)$$

Input aus der Atmosphäre	Netto-Wurzel-Aufnahme	Bestandesniederschlag	Streufall	Vorratsänderung im Bestand

Wir bezeichnen den Teil des Internen Umsatzes, welcher durch Kronenauswaschung in den Bestandesniederschlag gelangt, mit dem Symbol U, den jährlichen Holzzuwachs mit F32. Wir wissen außerdem, daß bei einem Bilanzierungszeitraum von einem Jahr oder einem Vielfachen davon die Solling-Bestände außer dem Holzzuwachs keinen nennenswerten anderen Zuwachs – etwa in der Blattmasse – haben, also

$$\Delta V_{Bestand} = F32 \text{ Jährlicher Holzzuwachs} \qquad (2)$$
$$U = F31 - F15 \text{ Interner Umsatz durch Kronenauswaschung} \qquad (3)$$

Damit können wir die Wurzel-Aufnahme als Summe von Kronenauswaschung U, Streufall F15 und jährlichem Zuwachs F 32 darstellen:

$$AFN = U + F14 + F32 \qquad (4)$$

Die Jahresbilanz für den oberirdischen Bestand lautet dann:

$$IN1 + IN2 + U - F15 = 0 \qquad (5)$$

Es wird damit ersichtlich, daß es ausreicht, die Filterung zu kennen, um mit Hilfe der Bilanzgleichung den Internen Umsatz des Waldbestandes wie auch seine Element-Aufnahme durch die Wurzeln zu berechnen.

Da bislang keine Methode zur direkten Messung der Flüsse verfügbar ist, haben wir in einer früheren Arbeit die Filterung des Solling-Buchenbestandes indirekt bestimmt (Mayer & Ulrich 1974). Wir gingen davon aus, daß während der laubfreien Phase außerhalb der Vegetationsperiode die Auswaschung von Substanzen aus dem Interen Umsatz vernachlässigbar klein ist. Diese Annahme steht im Einklang mit dem Befund vieler Physiologen (cf. Tukey 1970), die eine Auswaschung von Substanzen vor allem auf das physiologisch aktive, transpirierende Blatt lokalisieren. Dennoch zeigt sich, daß bei den meisten Elementen der mit dem Bestandesniederschlag gekoppelte Elementfluß auch im Winter beträchtlich größer ist als der Niederschlags-Input IN1. Deshalb haben wir für die Zeit von November bis April die gesamte Differenz zwischen den beiden Flüssen der Filterung zugerechnet:

$$F14^w - IN1^w = IN2^w$$

Es zeigte sich auch, daß das Verhältnis zwischen der so berechneten Filterung und dem Niederschlagsinput im Winter IN_2^w/IN_1^w für einzelne Jahre innerhalb relativ enger Grenzen schwankte, für die verschiedenen Elemente aber recht unterschiedlich war. Für die Sommermonate wurde daher dasselbe Verhältnis angenommen und so aus dem Niederschlags-Input im Sommer die unbekannte Filterung im Sommer berechnet:

$$IN2^s = IN1^s \cdot IN2^w/IN1^w$$

Dieses Vorgehen unterstellt dem belaubten Buchenbestand dieselbe Effektivität in der Ausfilterung von atmosphärischen Stoffen wie dem unbelaubten Bestand. Es liegt nahe, daß die Filterwirkung tatsächlich infolge der Vergrößerung der Oberfläche im Sommer höher ist als im Winter, daß also der so ermittelte Wert für die Filterung einen Minimalwert darstellt.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tab. 1 dargestellt. Für den Fichtenbestand steht keine ähnliche Möglichkeit zur Abschätzung der Filterung zur Verfügung. Ein Experiment zur Ermittlung der Kronenauswaschung (Leaching) unter Ausschluß der Filterung, in welchem junge Fichten unter einem Zelt in gefilterter Atmosphäre beregnet wurden zeigte jedoch Verhältnisse, die den im Buchenbestand vorgefundenen qualitativ entsprechen: d.h. bei Unterbindung der Elementzufuhr aus der Atmosphäre kam es lediglich bei K und Mn zu einer nennenswerten Auswaschung aus dem Kronenbereich der Fichte durch Niederschläge.

Um eine Vorstellung über die Größe der Filterung bei Fichten zu bekommen, haben wir in die Flüssebilanz des Fichtenbestandes den internen Umsatz des Buchenbestandes übernommen (Tab. 2). Dieses Vorgehen stützt sich auf den erwähnten Versuch, für das Element Schwefel, aber auch auf eine Bilanz der Wasserstoffionen im Niederschlagswasser (Ulrich et al. 1973) des Fichtenbestandes, auf die hier nicht weiter eingegangen werden kann.

Die so berechneten Zahlen für die Filterung des Fichtenbestandes liegen ausnahmslos über denen des Buchenbestandes. Besonders auffällig ist die starke Filterwirkung der Fichte gegenüber Schwefel, die einen Wert von über 50kg/ha und Jahr erreicht, gegenüber 24 kg S, die im Niederschlags-Input enthalten sind.

In der Tabelle 1 sind Werte für die jährliche Element-Aufnahme durch die Wurzeln gegeben. Sie wurden auf der Grundlage der vorher dargelegten Überlegungen aus der Flüssebilanz nach Gleichung (4) berechnet.

Flüssebilanz für den Boden

In gleicher Weise wie für den oberirdischen Ökosystemteil lässt sich für den Boden eine Bilanz der Elemente aufstellen. Die einzelnen Bioelementflüsse, die dabei zu berücksichtigen sind, gehen aus der Abb. 1 hervor. Die Vorratsänderung im Boden kann nach Auflösung der Bilanzgleichung (6) als Input-Output-Differenz berechnet werden:

Tabelle 2. Solling F1 (Fichte) – Mittlere jährliche Elementflüsse – Mai 1969 bis April 1973
(in Klammern: Fehler des Mittelwertes)
(+) Meßzeitraum für die Schwermetall-Flüsse: August 1972 bis Juli 1974
(§) Werte für Internen Umsatz durch Kronentraufe von Solling B1 übernommen; Filterung aus der Flüssebilanz berechnet.

SOLLING F1/ FICHTE	1/m²	kg/ha Jahr												g/ha Jahr (+)					
Fluß	H_2O	H	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	Cl	S	P	N	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb
Niederschlagsinput IN1	wie bei Solling B1 (Buche)																		
Filterung IN2 (§)			7,9	15,4	17,6	2,0	1,0	1,4	1,2	17,4	55,9	,0	5,7						
Gesamt-Input			15,1	19,1	32,0	4,4	1,9	1,6	2,3	33,4	80,0	,8	28,3						
Bestandesniederschlag F14	756	2,8 (1,0)	15,3 (,5)	26,7 (,8)	35,5 (1,4)	4,6 (,2)	2,0 (,1)	3,7 (,2)	2,3 (,1)	34,8 (1,0)	81,3 (3,2)	,7 (,07)	28,3 (,9)	21,5 (1,4)	12,8 (4,7)	23,2 (1,8)	268 (47)	49,4 (9,3)	400 (20)
Interner Umsatz durch Kronenauswaschung (§)			,2	7,6	2,5	,2	– ,1	1,1	,0	1,4	1,3	– ,2	,0						

$$F14 + F15 - (F43 + F63) - OUT - \Delta V_{Boden} = 0 \quad (6)$$

Die Vorratsänderungen im Boden für die einzelnen Elemente sind in Tab. 1 dargelegt, bei negativen Werten ist eine Vorratsabnahme (Mg, Mn, Al, P) bei positiven Werten eine Vorratszunahme (H, K, Ca, Cl, S und N) festzustellen. Bei der Interpretation der Daten ist die Größe der Vorratsänderung in ihrem Verhältnis zum Bodeninput und -output und dessen statistischer Streuung zu sehen. Die Standardabweichung der Mittelwerte der meisten Elemente (Na, K, Ca, Mg, Fe, Cl, P und N) weisen Werte auf, die annähernd so groß oder größer als die Vorratsänderungen sind; die Vorratsänderungen liegen für diese Elemente im Rahmen der Messgenauigkeit. Beträchtliche Vorratszunahmen (sink) ergeben sich für die Elemente H und S, Vorratsabnahmen (source) für die Elemente Al und Mn.

Schwefel wird dem Buchenwald in großen Mengen (46 kg/ha und Jahr) aus der Atmosphäre zugeführt. Es handelt sich dabei ganz überwiegend um Luftverunreinigungen, die aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe stammen, als SO_2 in die Atmosphäre gelangen, sich dort ausbreiten, oxidiert werden und schließlich als Sulfat-Anion im Bestandesniederschlag auftreten. Besondere Bedeutung kommt diesem Vorgang auch deshalb zu, weil jedes Mol Sulfat bei seiner Bildung aus SO_2 zwei Mol Wasserstoff produziert und damit zur Versauerung der Niederschläge beiträgt. Die Niederschläge weisen im Durchschnitt einen pH-Wert zwischen 3 und 4 auf, in den Wintermonaten ist die H-Konzentration am höchsten.

Da mit dem Sickerwasser 25,6 kg S/ha und Jahr aus dem Boden ausgeführt werden, und die Festlegung im Bestand (F32) nur 2,1 kg/ha und Jahr beträgt bleibt annähernd die Hälfte der zugeführten Schwefelmenge im Boden. Es gibt zwei Möglichkeiten für eine Schwefel-Festlegung im Boden, die zur Zeit von uns untersucht werden:

1. Der Eintausch von Sulfationen an positiven Ladungen des Bodenaustauschers. Für die Beschreibung der Adsorptionsreaktionen können Isothermen (Langmuir, Freundlich) benutzt werden. Diese Reaktionen sind abhängig vom pH-Wert des Bodens; je saurer der Boden, desto größer seine Adsorptionskapazität für Sulfationen.
2. Die Ausfällung von Sulfaten, welche anhand des Massenwirkungsgesetzes beschrieben werden kann. In einer neueren Arbeit haben Fassbender & Khanna (1976) ein Löslichkeitsdiagramm entwickelt, wobei die Löslichkeit verschiedener Sulfate als Funktion des pH − 0,33 pAl und des pH + 0,5 pSO_4 dargelegt werden. Aus Untersuchungen der Gleichgewichtsbodenlösung verschiedener Böden geht hervor, daß unter sauren Bedingungen mit einer Ausfällung von $AlOHSO_4$ und $Al_4(OH)_{10}SO_4$ zu rechnen ist.

Aluminium und Mangan werden in geringen Mengen dem Ökosystem aus der Atmosphäre zugeführt; ein Vielfaches dieser Menge verläßt das Ökosystem mit dem Sickerwasser, d.h. der Bodenvorrat nimmt ab. Der Interne Umsatz ist hoch bei Mangan, gering bei Aluminium.

Die Abnahme des Bodenvorrats ergibt sich letztlich aus der Verwitterung von Silikaten und ist eine Folge der Abpufferung von Wasserstoff-Ionen, die aus den sauren Niederschlägen und aus der Streuzersetzung in die Bodenlösung gelangen.

In einer früheren Arbeit (Ulrich, 1975) wurde die jährliche Silikatverwitterung auf ca. 80 kg Tonminerale oder Feldspate berechnet. Wenn es zu einer Ausfällung der zuvor erwähnten Aluminiumsulfate kommt, liegt dieser Betrag noch wesentlich höher.

Da sich diese Vorgänge vor allem in den oberen 1 bis 2 cm des Bodens abspielen, erscheint eine Podsolierung in relativ kurzer Zeit als Folge dieser Vorgänge durchaus möglich.

Für die Schwermetalle Cd, Co, Cr, Cu, Ni und Pb liegen Daten einer 24-monatigen Messreihe (Tab. 1) vor. Der Bodenoutput mit dem Sickerwasser für diese Elemente mit Ausnahme von Co ist bedeutend niedriger als der Input mit dem Bestandesniederschlag. Unterstellt man eine geringe Aufnahme und internen Umsatz dieser Elemente, so kann man folgern, daß eine Festlegung im Boden stattfindet.

Um Vorstellungen über die Bindungsmechanismen zu gewinnen wurden Untersuchungen durchgeführt, die die Ausfällungs- und Adsorptionsreaktionen deuten sollten. Eine Ausfällung von anorganischen Verbindungen kann aufgrund physikalisch-chemischer Überlegungen ausgeschlossen werden. Die Ionenaktivitäten in der Gleichgewichtsbodenlösung sind untersättigt im Vergleich zu den Löslichkeitsprodukten der Oxyde, Carbonate, Phosphate, Sulfate und Chloride der Schwermetalle Cd, Co, Cr, Cu, Ni und Pb, wie Bestimmungen in der GBL ergeben haben (Fassbender & Seekamp 1976).

Zusammenfassung

Der Input zahlreicher chemischer Elemente (H, Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, P, S, Cl, N, Cu, Ni, Pb, Cd, Co, Cr) zu den Wald-Ökosystemen des Solling beschränkt sich ganz überwiegend oder ausschließlich auf die Zufuhr mit atmosphärischen Niederschlägen in flüssiger oder fester Form (Regen, Schnee, Tau, Staub). Der Anteil der Niederschläge, der in Gefäßen über dem Kronendach oder auf Freiflächen erfaßbar ist, wurde über mehrere Jahre kontinuierlich aufgefangen, der Elementgehalt bestimmt und auf Element-Input pro Flächen- und Zeiteinheit umgerechnet. Die statistische Genauigkeit aller Daten wird angegeben.

Ein Teil der Zufuhr aus der Atmosphäre ist mit Auffanggefäßen nicht quantitativ faßbar, da er auf der spezifischen Wechselwirkung der pflanzlichen Oberflächen mit der Atmosphäre beruht. Als Folge dieser Wechselwirkung kommt es zu einer Ausfilterung von atmosphärischen Stoffen durch die Pflanzen, insbesondere durch die Baumkronen. Diese Stoffe mit den darin enthaltenen Elementen werden zum größten Teil durch Regen abgewaschen und damit dem Boden zugeführt. Die Größe der Elementzufuhr zu dem Ökosystem durch Ausfilterung wird näherungsweise bestimmt. Für die meisten Elemente liegt sie in der Größenordnung des im Freiland oder über dem Kronendach gemessenen Niederschlags-Input.

Weitere Meßgrößen sind der mit dem Streufall gekoppelte Elementfluß sowie die im Holzzuwachs festgelegten Elementmengen. Damit ergibt sich die Möglichkeit, den Internen Elementumsatz innerhalb des Ökosystems sowie die Netto-Elementaufnahme durch die Bäume zu berechnen.

Für die genannten Elemente beschränkt sich der Output aus dem Ökosystem weitgehend auf den Sickerwasserfluß unterhalb der Wurzelzone. Dieser wurde mit Hilfe von Unterdrucklysimetern kontinuierlich erfaßt, der Elementgehalt analysiert und auf Element-Output pro Flächen- und Zeiteinheit umgerechnet.

Innerhalb des Bodens kommt es zu Wechselwirkungen (Adsorption, Desorption, Verwitterung, Lösung, Ausfällung) zwischen der Festphase und der Bodenlösung, durch die auch der Ferntransport (Sickerwasserstrom) erfolgt. Dabei kann der Boden innerhalb des Ökosystems die Funktion einer Senke (Festlegung von Stoffen) oder einer Quelle (Lieferung/Verlust von Stoffen) erfüllen. Die jeweilige Funktion für ein bestimmtes Element ergibt sich durch Bilanzierung von Boden-Input (Bestandes-Niederschläge, Streufall) und Boden-Output (Sickerwasserstrom, Wurzel-Aufnahme) über einen längeren Zeitraum.

Die Böden im Solling verhalten sich als Senken gegenüber den Elementen H, S, P und einigen Schwermetallen, als Quellen für die Elemente Al und Mn.

Literatur

Benecke, P. (1977): Der Wasserhaushalt von Buchen- und Fichtenbeständen. (In diesem Band).

Fassbender, H.W. & Khanna, P.K. (1976): Bildung von $ALOHSO_4$ und $AL_4(OH)_{10}SO_4$ als Möglichkeit der Sulfatausfilterung im Boden. (im Druck).

Fassbender, H.W. & Seekamp, G. (1976): Fraktionen und Löslichkeit der Schwermetalle Cd, Co, Cr, Cu, Ni und Pb im Boden. *Geoderma* 16: 55–69.

Mayer, R. (1974): Ermittlung des Stoffauftrags aus Böden mit dem Versickerungswasser. *Mitt Deutschen Bodenk. Gesellsch.* 20: 292–299.

Mayer, R. & Ulrich, B. (1974): Conclusions on the filtering action of forests from ecosystem analysis. *Oecologia Plantarum* 9 (2): 157–168.

Tukey, H.B. Jr. (1970): The leaching of substances from plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 21: 305–324.

Ulrich, B. (1975): Die Umweltbeeinflussung des Nährstoffhaushalts eines bodensauren Buchenwaldes. *Forstwissenschaftl. Centralblatt* 94 Jg., H. 6: 280–287.

Ulrich, B., Steinhardt, U. & Müller-Suur, A. (1973): Untersuchungen über den Bioelementgehalt in der Kronentraufe. *Göttinger Bodenkundl. Ber.* 29: 133–192.

Anschrift des Verfasser:

Prof. Dr. B. Ulrich et al., Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen, Büsgenweg 2, 3400 Göttingen.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie

Jahr/Year: 1977

Band/Volume: 6_1977

Autor(en)/Author(s): Ulrich Bernhard, Khanna P.K., Seekamp G., Fassbender H.W.

Artikel/Article: Input, Output und interner Umsatz von chemischen Elementen bei einem Buchen- und einem Fichtenbestand 17-28