

gigen Einflußparameter wie Sonnenstand, Meßrichtung, Neigungswinkel, Öffnungswinkel und Beleuchtungsverhältnisse sind durch eine Vielzahl von Voruntersuchungen bestimmt worden. Erste Meßergebnisse an Testflächen im Högwald und im Erbersberger Forst lassen deutliche Reaktionen im Spektralverhalten erkennen, die auf Vitalitäts- und phänologische Unterschiede zurückgeführt werden können.

Summary

Judging vigor of spruces on the basis of spectral reflection measurements

Objective of the research project is the evaluation of characteristic spectral signatures for single trees and stands to assess and continuously monitor differences in vigor, or damages of trees, respectively, especially for spruce.

The object-independent parameters which are important for the spectro-radiometer measurements, such as angle and elevation of the sun, inclination, measuring direction, angle of view, and illumination have been determined by numerous previous investigations. First results from the test sites "Högwald" and "Erbersberger Forst" show distinct differences in the spectral curves which can be related to different degrees of vigor and phenology.

Literatur

- AMMER, U.; MÖSSMER, R.; BRÖKER, U., 1983: Der Beitrag der Fernerkundung zur Erfassung der Waldschäden. Forstw. Cbl. 102, 149–157.
- ERNST, D., 1984: Beschreibung des Feldspektroradiometers. Interner Bericht.
- GATES, D. M., 1970: Physical and physiological properties of plants. In: Remote sensing with special references to agriculture and forestry. Washington D. C.: Nat. Akad. of Science. S. 224–252.
- HILDEBRANDT, G., 1976: Die spektralen Reflexionseigenschaften der Vegetation. In: Proc. of the Symp. on Remote Sensing in Forestry, IUFRO, Oslo, June 1976, 9–23.
- KOCH, B.; AMMER, U.; KRITIKOS, G.; KÜBLER, D., 1984: Untersuchungen zur Beurteilung der Vitalität von Fichten anhand multispektraler Scannerdaten. Forstw. Cbl. 103, 214–231.
- KREUTZER, K.; BITTERSÖHL, J., 1986: Untersuchungen über die Auswirkungen des sauren Regens und der kompensatorischen Kalkung im Wald. Forstw. Cbl. 105, H. 4, 273–282.
- MASCHNING, E., 1986: Entwicklung des visuellen Gesundheitszustandes im Fichtenaltbestand Högwald. Forstw. Cbl. 105, H. 4, 350–352.

Anschrift der Verfasser: Dipl.-Forstw. BARBARA KOCH, Prof. Dr. U. AMMER, H. WITTMAYER, Lehrstuhl für Landschaftstechnik, Winzererstr. 45, D-8000 München 40

Stoffauswaschung aus Fichtenkronen (*Picea abies* [L.] Karst.) durch saure Beregnung¹

Von K. KREUTZER und J. BITTERSÖHL

Einführung

Die stoffliche Zusammensetzung des Regenwassers erfährt bei der Passage durch die Kronenschicht von Wäldern zuweilen erhebliche Veränderungen. Sie ergeben sich nicht nur als Konzentrationseffekte infolge der Interceptionsverdunstung von Niederschlagswasser, sondern

¹ Beitrag Nr. 17 der Högwald-Serie 1986.

auch durch Abwasch von intercipierten Stoffen der trockenen Deposition sowie durch Auswaschung (leaching) von Stoffen aus dem Gewebeinnern (LAKHANI u. MILLER 1980). Andererseits werden Stoffe aus dem Regenwasser in der Kronenschicht auch zurückgehalten und zum Teil sogar in den Metabolismus der Blattgewebe einbezogen.

Die Auswaschung von Stoffen aus Blattorganen ist vor allem durch Gewächshausexperimente sehr gut belegt (STENLID 1958; MINA 1965; MECKLENBURG et al. 1966; TUKEY 1970 u. a.). Sie ist heute im Rahmen der Waldsterbensforschung von besonderer Bedeutung. Neben der Einwirkung von Ozon gilt das Interesse vor allem der Frage, inwieweit durch saure Deposition der Leachingprozeß verstärkt wird. Hierzu wurden bereits einige Untersuchungen durchgeführt: Die Ergebnisse von WOOD und BORMANN (1975), HORNTVEDT (1979), HOFFMAN et al. (1980) sowie SCHERBATSKOY und KLEIN (1983) zeigen an Bäumen und Baumsämlingen im Gewächshaus, daß durch saure Deposition verstärkt Basen aus der Kronenschicht ausgewaschen werden können.

Nur wenige Ergebnisse liegen allerdings über flächenbezogene Stoffflüsse bei kontrollierter saurer Beregnung im Freiland vor. Um dazu einen Beitrag zu leisten, wurde in einem Fichtenjungbestand mit Hilfe einer über den Kronen installierten Beregnungsanlage die Frage geprüft: Wie verändert sich der Stoffaustrag mengenmäßig, wenn mit stark schwefelsaurem Wasser geregnet wird? Als Bezugsmaß diente eine entsprechende Beregnung mit „normalem“, d. h. regenähnlichem Wasser. Geprüft werden sollte dabei auch, inwieweit der natürliche Bestandsniederschlag durch vorausgegangene saure Beregnungsereignisse qualitativ beeinflußt wird.

Material und Methoden

Allgemeine Angaben über Bestand, Standort und Versuchstechnik sind bei KREUTZER und BITTERSÖHL (1986) beschrieben.

1985 wurden in dem 13jährigen Fichtenreinbestand 18 Beregnungen durchgeführt. Die erste erfolgte am 14. Juni, die letzte am 21. Oktober. Der pH-Wert des Beregnungswassers der „normal“ beregneten Parzelle betrug im Mittel 5,20, jener der „sauer“ beregneten im Mittel 2,72. Auf jeder der beiden beregneten Parzellen wurden zwei Meßplätze mit 4 m langen Meßbrinnen eingerichtet. Im Bereich der Meßplätze betrug die mittlere Beregnungshöhe 174 mm. Der mittlere Interceptionsverlust belief sich auf 67 mm, d. s. 39 % der Beregnungshöhe.

Als natürlicher Regen fielen während der Beregnungskampagne einschließlich einer rund einmonatigen Anschlußzeit (bis 29. Nov. 1985) 459 mm. Der mittlere Interceptionsverlust lag bei 161 mm, was 35 % der Regenhöhe entspricht. Die Einbeziehung einer rund einmonatigen Anschlußfrist ist dadurch begründet, daß die natürlichen Bestandsniederschläge qualitativ einige Wochen lang von den künstlichen Beregnungsereignissen durch Abwasch mitbeeinflußt werden.

Die Probenahme erfolgte jeweils vor und unmittelbar nach einem Beregnungsereignis, und zwar wenn der Abtropfvorgang vollständig abgeschlossen war.

Die Kationenkonzentrationen wurden mittels ICP bzw. AAS, die Anionenkonzentrationen mittels AA bzw. IC bestimmt. Die Protonenmenge ermittelten wir über die Aktivität und Ionenstärke.

Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengefaßt.

Die Tabelle 1 zeigt die Verhältnisse bei normaler Beregnung. Eintrag und Austrag sind hier relativ gering und unterscheiden sich bei den einzelnen Stoffen nur wenig. Offensichtlich spielen Auswaschung und Abwasch nur eine geringe Rolle. Bestätigt wird dies auch durch die Ergebnisse der fraktionierten Beprobung einzelner Beregnungsereignisse: Sie ließen keinen Zeitrend der Stoffkonzentration im Beregnungswasser des Austrages erkennen.

Tabelle 1

Stoffeintrag und -austrag im Kronenraum von Fichten bei normaler Beregnung (pH 5,20)
in der Zeit vom 14. 6. bis 29. 11. 85 (mmol IE/m²)

Input and loss of substances in a spruce canopy with normal irrigation (pH 5,2) between
June and November 29, 1985

	Eintrag			Austrag		
	Beregnung	Regen	Σ	Beregnung	Regen	Σ
H	1,1	5,7	6,8	0,4	0,6	1,0
Na	5,1	15,3	20,4	4,3	10,1	14,4
K	3,7	16,0	19,7	6,3	22,2	28,5
Ca	3,9	38,3	42,2	3,9	16,7	20,6
Mg	1,8	21,8	23,6	1,9	7,4	9,3
Mn	0,4	2,5	2,9	0,6	2,6	3,2
Fe	0,3	1,9	2,2	0,1	1,0	1,1
Al	2,0	6,6	8,6	0,6	2,8	3,4
NH ₄	3,5	16,1	19,6	3,8	24,7	28,5
Sa.	21,8	124,2	146,0	21,9	88,1	110,0
SO ₄	10,6	33,9	44,5	11,6	37,7	49,3
NO ₃	1,9	21,1	23,0	2,2	14,3	16,5
Cl	5,0	14,4	19,4	4,1	20,8	24,9
HCO ₃	7,6	50,3	57,9	8,3	21,9	30,2
Sa.	25,1	119,7	144,9	26,2	94,7	120,9

Tabelle 2

Stoffeintrag und -austrag im Kronenraum von Fichten bei saurer Beregnung (pH 2,72)
in der Zeit vom 14. 6. bis 29. 11. 85 (mmol IE/m²)

Input and loss of substances in a spruce canopy with acid irrigation (pH 2,72) between
June and November 29, 1985

	Eintrag			Austrag		
	Beregnung	Regen	Σ	Beregnung	Regen	Σ
H	366,0	5,7	371,7	179,3	31,8	211,1
Na	5,0	15,3	20,3	4,0	20,6	24,6
K	5,4	16,0	21,4	16,2	32,7	48,9
Ca	4,8	38,3	43,1	31,4	36,4	67,8
Mg	1,8	21,8	23,6	8,9	11,4	20,3
Mn	0,7	2,5	3,2	6,9	7,2	14,1
Fe	3,8	1,9	5,7	3,9	1,1	5,0
Al	2,7	6,6	9,3	4,4	4,8	9,2
NH ₄	5,4	16,1	21,5	13,8	60,2	74,0
Sa.	395,6	124,2	519,8	268,8	206,2	475,0
SO ₄	397,7	33,9	431,6	259,8	138,1	397,9
NO ₃	1,5	21,1	22,6	3,2	12,4	15,6
Cl	4,5	14,4	18,9	4,0	34,1	38,1
HCO ₃	-	50,3	50,3	0,6	9,0	9,6
Sa.	403,7	119,7	523,4	267,6	193,6	461,2

Daß der Auswaschung im Versuchsbestand bei normaler Beregnung und natürlichem Regen keine große Bedeutung zukommt, ist verständlich; denn das Wasser ist aufgrund seiner Zusammensetzung nur wenig aggressiv. Ebenso erscheint es plausibel zu sein, daß nur wenig Abwasch auftritt; denn Ausfilterung von landwirtschaftlichen Stäuben dürfte im Versuchsbestand aus folgenden Gründen unbedeutend sein:

- Die Höhe des Bestandes ist noch gering.
- Der Bestand ist auf drei Seiten von höheren Beständen umgeben.
- Seine orographische Lage ist eben bis schwach eingemuldet.

Vergleicht man bei normaler Beregnung Eintrag mit Austrag, so zeigt sich ein Überwiegen des Austrages nur bei Kalium, Ammonium und Sulfat. Bei den übrigen Stoffen halten sich entweder Eintrag und Austrag die Waage, oder es ergibt sich sogar eine Tendenz zur Aufspeicherung wie bei Calcium und Magnesium. Auch Protonen und Bicarbonationen werden mehr eingetragen als ausgezogen, doch handelt es sich wahrscheinlich nicht ausschließlich um Aufspeicherungen, sondern zudem um Protonierungs- und Deprotonierungsreaktionen.

Die Ergebnisse der sauren Beregnung (Tab. 2) lassen erkennen, daß die Beregnungsereignisse den Stoffaustrag wesentlich erhöhen. Zu unterscheiden sind dabei der unmittelbare Effekt und die Folgewirkung. Als unmittelbarer Effekt der Beregnungsereignisse zeigt sich eine deutliche Anhebung des Austrages bei Ammonium, Kalium, Magnesium, Calcium und Mangan. Um den Säureeffekt quantitativ zu fassen, muß ein Vergleich mit der normalen Beregnung vorgenommen werden, wie er in Tabelle 3 dargestellt ist.

Tabelle 3

Relation von Austrag zu Eintrag unmittelbar bei den Beregnungsereignissen
Loss/input relation at the time of treatment application

	Saure Beregnung	Normale Beregnung	sauer/normal
NH ₄	2,6	1,1	2,4
K	3,0	1,7	1,8
Mg	4,9	1,1	4,5
Ca	6,5	1,0	6,5
Mn	9,8	1,5	6,5

Daraus geht klar hervor, daß die saure Beregnung den Austrag von Mangan und Calcium auf das 6- bis 7fache, jenen von Magnesium auf das 4- bis 5fache und jenen von Kalium und Ammonium etwa auf das Doppelte erhöht.

Die Folgewirkung, die sich im Anschluß an die Beregnungsereignisse beim Austrag mit natürlichem Regen ergibt, betrifft die gleichen Stoffe, wie Tabelle 4 zeigt.

Tabelle 4

Relation von Austrag zu Eintrag bei natürlichen Regen nach den Beregnungsereignissen
Loss/input relation during natural precipitation after irrigation events

	Saure Beregnung	Normale Beregnung	sauer/normal
NH ₄	3,7	1,5	2,4
K	2,0	1,4	1,4
Mg	0,5	0,3	1,6
Ca	1,0	0,4	2,5
Mn	2,9	1,0	2,9

Es ist zu erkennen, daß der verstärkte Austrag mit Ausnahme von Ammonium zurückgeht, und zwar bei den am stärksten betroffenen Stoffen Mangan, Calcium und Magnesium ziemlich einheitlich auf 35 bis 45 %.

Sehr deutlich kommt in Tabelle 2 auch die Retention von Sulfat und Protonen im Kronenraum zum Ausdruck. Während jedoch bis zum Ende der Beobachtungszeit (29. Nov. 1985) an-

nähernd das gesamte Sulfat (92 %) wieder abgewaschen ist, wurden von der eingetragenen Protonenmenge nur 57 % ausgetragen. Ein Teil wurde vermutlich eingetauscht und bewirkte den verstärkten Austrag anderer Kationen. Ein weiterer Teil wurde zur Protonierung von eingetragendem Bicarbonat, zur Reduzierung von Manganoxiden und zur Protonierung von funktionellen Gruppen der organischen Substanz in Nadeln und Rinde verbraucht.

Diskussion

Die infolge saurer Beregnung erhöhten Austräge von Mangan, Calcium, Magnesium, Kalium und Ammonium bestätigen bisherige Befunde. So fand HORNTVEDT (1979) in Freilandberegnungen von Fichten (*Picea abies* [L.] Karst.) mit Wasser von pH 3,0 und 2,5 ebenfalls erhöhte Konzentrationen von Calcium, Magnesium, Kalium, Ammonium, Mangan, Eisen und Aluminium im Austrag. Auch ARNDT und SEUFERT (1985) berichten von verstärktem Calcium-, Magnesium- und Kaliumaustrag bei saurer Beregnung von Fichten in open-top-Kammern. SCHERBATSKOY und KLEIN (1983) zeigten, daß pH-Werte von 2,8 ein verstärktes Blattleaching von Kalium, Calcium und Aminosäuren bei Sämlingen von *Betula alleghaniensis* Britt. und *Picea glauca* (Moench) Voss verursachten. Aus den Untersuchungen von WOOD und BORMANN (1975) geht hervor, daß Sämlinge von *Acer saccharum* Marsh. und von Bohnen (*Phaseolus vulgaris* L.) durch Beregnung mit Wasser von pH 2,3 und 3,0 deutlich an Calcium, Magnesium und Kalium verloren. Ähnliche Ergebnisse erzielten FAIRFAX und LEPP (1975) an Tabak (*Nicotiana tabacum* L.).

Die bei Gewächshausuntersuchungen gefundenen Stoffausträge gehen überwiegend auf ein leaching zurück. Wegen der Analogie der Ergebnisse gilt dies mit großer Wahrscheinlichkeit auch für die Freilanduntersuchungen. Zumindest in unserem Fall kann ein stärkerer Abwascheffekt ausgeschlossen werden, da die Staubimmission aus landwirtschaftlichen Flächen sehr gering zu sein scheint. Dies stimmt damit überein, daß innerhalb der Beregnungsereignisse die Stoffkonzentrationen im Austrag bei saurer Beregnung keinen Zeittrend aufweisen.

Die Auswaschung erfaßte bei der besonders betroffenen Stoffgruppe von Mangan, Calcium und Magnesium vermutlich überwiegend apoplastische Einlagerungen. Calcium und Magnesium liegen im Apoplasten zum Teil als Brückenionen im Protopektin der Mittellamellen, zum Teil als adsorbierte Ionen vor und können hier von H^+ -Ionen verdrängt werden. Mangan hingegen ist im Apoplasten wahrscheinlich als Braunstein deponiert (HENRICHFREISE 1976), der bei Versauerung rasch gelöst werden kann, so daß reduziertes zweiwertiges Mangan im Leachat erscheint. Dafür sprechen einerseits die sehr hohen Mn-Gehalte der Fichtennadeln, die bei älteren Jahrgängen 3 mg/g überschreiten können, andererseits der hohe Anstieg der Mangankonzentration im Austrag nach saurer Behandlung.

Neben der Auswaschung apoplastischer Anteile, welche nur die cuticuläre Barriere zu überwinden haben, kann ein vermehrter Efflux beteiligt sein, vor allem wenn nach Calcium-Verarmung die Plasmalemmpermeabilität zunimmt. Außerdem sind auch direkte Membranschäden bei Säurebelastung zu erwarten (JÄGER u. KLEIN 1980).

Selbst bei den verstärkt ausgewaschenen Stoffen konnte bisher experimentell noch keine Minderung im Gehalt der Nadeln nachgewiesen werden. Ähnliches berichtet auch HORNTVEDT (1979). Vermutlich ist die ausgetragene Menge im Vergleich zur Replazierung zu gering. Bei fortdauernd saurer Deposition kann es dagegen zu einer Gehaltsminderung kommen. So fanden wir bereits Anfang der 70er Jahre verringerte Magnesiumgehalte und Magnesiummangelerscheinungen an Fichten im Oberpfälzer Wald und Fichtelgebirge, wo die SO_2 -Belastung in der Bundesrepublik mit am höchsten ist (KREUTZER 1975).

Der Magnesiummangel ist jedoch offenbar nur ein sehr unspezifisches Begleitsymptom der neuartigen Waldschäden. Er geht auf sehr verschiedene Ursachen zurück und ergibt sich letztlich aus dem Zusammenspiel von leaching und Replazierung des Magnesiums. Dabei kann das leaching selbst durch eine Reihe von Faktoren bestimmt werden, nämlich durch

- saure Deposition, die zu verstärktem apoplastischem leaching führt, aber auch die Membranen angreift – dabei sind nebelreiche Lagen besonders disponiert.
- Photooxidantienbelastung, die vor allem Membranschäden erzeugt und symplasmatisches leaching fördert,
- Calciumverarmung im Apoplasten mit nachfolgendem verstärktem Efflux,
- Frosteinwirkung, ebenfalls mit der Folge von Membranschäden.

Die Replazierung des Magnesiums hingegen wird möglicherweise durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Basen- und speziell Magnesiumverarmung des Bodens infolge saurer Deposition, auf manchen Standorten auch infolge starker bodeninterner Säurebildung durch Nitrifikation im Zusammenhang mit erhöhtem Stickstoffeintrag,
- hohes Ammoniumangebot infolge erhöhter Stickstoffeinnahmen über die Atmosphäre, dadurch verringerte Magnesiumaufnahme,
- Verzerrung der Nährstoffrelationen, da durch den erhöhten N-Eintrag die Humusmineralisierung verstärkt wird und mehr Stickstoff und Phosphat angeboten werden.

In den Hochlagen scheint eine Akkumulierung solcher Faktoren vorzuliegen, so daß besonders bei standortswidrigen Provenienzen Symptome auftreten (TUKEY 1980; BOSCH et al. 1983; REHFUESS u. BOSCH 1986).

Daß sich die neuartigen Waldschäden hier häufig als eine Magnesiummangelerscheinung präsentieren und nicht als ein Calcium- oder Manganmangel, hängt vermutlich mit folgendem zusammen: Calcium wird wegen seiner höheren Eintauschstärke im Boden an den Austauschern stärker als Magnesium vor Auswaschung geschützt, während Mangan auf den sauren Böden durch Verwitterung in überreichem Maße angeboten wird.

Im Hinblick auf die verstärkte saure Deposition zeigten unsere Untersuchungen, daß die eingetragenen Protonen zwar zum Teil bei Protonierungsvorgängen verbraucht werden wie bei der Protonierung des Bicarbonates, zum Teil aber auch zu einer verstärkten Versauerung des Apoplasten beitragen, die erst allmählich durch Replazierung von Basen wieder verschwindet. Zum Ausdruck kommt dies dadurch, daß die natürlichen Regen nach den sauren Beregnungsergebnissen noch einige Wochen lang Protonen vermehrt austragen, während der Abwasch des zurückgehaltenen Sulfates wesentlich schneller erfolgt. Dabei ist anzunehmen, daß die Retention des Sulfates durch pH-abhängige Erhöhung der Anionensorptionskapazität zustande kommt.

Schlußfolgernd kann aus diesen Ergebnissen abgeleitet werden, daß auf Magnesium-verarmten Standorten eine Magnesium-Düngung sinnvoll erscheint, um Störungen im Anfangsstadium zu verhindern. Eine solche Düngung ist jedoch mit Sicherheit kein Allheilmittel gegen die neuartigen Waldschäden. Vor allem wenn gravierende Schäden an den Cuticeln und/oder an den Zellmembranen entstanden sind, kann eine Magnesium-Düngung nicht helfen.

Danksagung

Für die Finanzierung dieses Forschungsprojektes danken wir dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.

Zusammenfassung

Die in der Zeit von Juni bis Oktober 1985 in 18 Ereignissen durchgeführte saure Beregnung (H_2SO_4 , pH 2,72) führte zu einem 6–7mal größeren Austrag von Mangan und Calcium, einem 4–5mal größeren Austrag von Magnesium und einem etwa 2mal größeren Austrag von Kalium und Ammonium als die „normale“ Beregnung (pH 5,2). Sulfat wurde in der Krone kurzfristig zurückgehalten, während die Retentionszeit der Wasserstoffionen wesentlich länger war, da diese vermutlich zum Teil erst wieder durch Basen ersetzt werden müssen.

Summary

Foliar leaching from a spruce canopy (Picea abies [L.] Karst.) by acid irrigation

Acid irrigations (H_2SO_4 , pH 2,72), applied 18 times from June to October 1985, caused a 6–7 times larger loss of manganese and calcium, one 4–5 times larger of magnesium, and the loss of potassium and ammonium doubled, when compared with normal irrigations (pH 5,2). Sulfate was retained only for a short time, whereas the retention of H^+ was considerably longer, supposedly caused by a replacement process of bases.

Literatur

- ARNDT, U.; SEUFERT, G., 1985: Untersuchungen zur Beteiligung von Ozon und Schwermetallen an den Schäden unserer Waldbäume. BML-Forschungsbericht.
- BOSCH, C.; PFANNKUCH, E.; BAUM, U.; REHFUESS, K.-E., 1983: Über die Erkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst.) in den Hochlagen des Bayerischen Waldes. Forstw. Cbl. 102, 167–181.
- FAIRFAX, J. A. W.; LEPP, N. W., 1975: Effect of simulated "acid rain" on cation losses from leaves. Nature 255, 324–325.
- HENRICHFREISE, A., 1976: Aluminium- und Mangantoleranz von Pflanzen saurer und basischer Böden. Diss. Münster.
- HOFFMAN, W. A.; LINDBERG, S. E.; TURNER, R. R., 1980: Precipitation acidity: the role of the forest canopy in acid exchange. J. Environ. Qual. 9, 95–100.
- HÖRNTVEDT, R., 1979: Leaching of chemical substances from tree crowns by artificial rain. Mitt. IUFRO Tagung „Luftverunreinigung“ Ljubljana, 115–125.
- JÄGER, H. J.; KLEIN, H., 1980: Biochemical and physiological effects of SO_2 on plants. Angew. Botanik 54, 337–348.
- KREUTZER, K., 1975: Vortrag, Tagung der Sektion Waldernährung, Bischofsgrün.
- KREUTZER, K.; BITTERSÖHL, J., 1986: Untersuchungen über die Auswirkungen des sauren Regens und der kompensatorischen Kalkung im Wald. Forstw. Cbl. 105, H. 4, 273–282.
- LAKHANI, K. H.; MILLER, H. G., 1980: Assessing the contribution of crown leaching to the element content of rainwater beneath trees. In: HUTCHINSON, T. C.; HAVAS, M.: Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems. Plenum Press.
- MECKLENBURG, R. A.; TUKEY, H. B.; MORGAN, J. V., 1966: A Mechanism for the leaching of calcium from foliage. Plant Physiol. 41, 610–613.
- MINA, V. N., 1965: Leaching of certain substances by precipitation from woody plants and its importance in the biological cycle. Sovjet Soil Sci. 6, 609–617.
- REHFUESS, K. E.; BOSCH, C., 1986: Experimentelle Untersuchungen zur Erkrankung der Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) auf sauren Böden der Hochlagen: Arbeitshypothese und Versuchsplan. Forstw. Cbl. 105, H. 4, 201–206.
- SCHERBATSKOY, T.; KLEIN, R. M., 1983: Response of spruce and birch foliage to leaching by acidic mists. J. Environ. Qual. 12, 189–195.
- STENLID, G., 1958: Salt losses and redistribution of salts in higher plants. In: W. RÜHLAND (ed.) Handbuch der Pflanzenphysiologie, Band IV, Springer-Verlag, Berlin.
- TUKEY, H. B., 1970: The leaching of substances from plants. Annual Review of Plant Physiology 21, 305–324.
- TUKEY, H. B., 1980: Some Effects of Rain and Mist on Plants, with implications for acid precipitation. In: HUTCHINSON, T. C.; HAVAS, M.: Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems. Plenum Press.
- WOOD, T.; BORMANN, F. H., 1975: Increase of foliar leaching caused by acidification of an artificial mist. Ambio 4, 169–171.

Anschrift der Autoren: Prof. Dr. K. KREUTZER und Dipl.-Geol. Dr. J. BITTERSÖHL, Lehrstuhl für Bodenkunde, Amalienstr. 52, D-8000 München 40