

This so-called "pilot-project" was also used to assess the technical performance of this new research facility during realistic experimental conditions. The factorial design with 16 groups analyzed the effects of i) normal winter temperatures vs. an episode of severe frost, ii) low vs. raised ozone concentrations, iii) misting with water of pH 5.6 vs. water of pH 3.0, and iiiii) fertilized vs. unfertilized soil. The climatic conditions and ozone levels applied were based on long-term field measurements from the higher regions of the Bavarian forest in order to simulate realistic diurnal and seasonal variations as observed at a site affected by severe forest decline. The main characteristics of this exposure program are outlined, and an assessment of the technical performance of the environmental chambers is given in this paper.

### Literatur

- BAUMGARTNER, A., 1985 a: Die Regenmengen als Standortsfaktor am Großen Falkenstein. Forstw. Cbl. 77, 230–237.
- BAUMGARTNER, A., 1985 b: Nebel und Nebelniederschläge als Standortsfaktoren am Großen Falkenstein. Forstw. Cbl. 77, 252–272.
- KÖNIG, C.; MAYER, H.; PAYER, H. D.: Das Freilandklima ins Labor holen. In: Den Wald ins Labor holen. (Hrsg.: GSF Neuherberg (1985), 35–37.
- Land Oberösterreich, 1984: Monatsberichte über die Meßergebnisse des Automatischen Luftmeßnetzes des Landes Oberösterreich, Linz/Oberösterreich 1984.
- PAYER, H. D.; BLANK, L. W.; GNATZ, G.; SCHMOLKE, W.; SCHRAMEL, P.; BOSCH, C., 1986: Simultaneous Exposure of Forest Trees to Various Pollutants and Climatic Stress. Poster presented at Muskoka Conference Sept. 1985, submitted to Water, Air and Soil Pollution 1986.
- PAYER, H. D.; BLANK, L. W.; BOSCH, C.; GNATZ, G.; SCHMOLKE, W.; SCHRAMEL, P., 1986: Waldschadensforschung in den neuen Expositions-kammern der GSF: Untersuchungen zum Einfluß von Klima und Luftschadstoffen. In: VDI-Berichte 560, Waldschäden (Hrsg.: VDI). Düsseldorf: VDI, 805–824 (1985).
- PRINZ, B.; KRAUSE, G. H. M.; STRATMANN, H., 1982: Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland. LIS-Berichte 28.
- REIFER, R., 1983: Basiserarbeitung zum Problem „Waldsterben im Bayerischen Nordalpenraum“, München.
- SCHRIMPF, E., 1983: Waldsterben infolge hoher Schadstoffkonzentrationen im Nebel. Staub Reinh. Luft 43 (6), 240.
- SCHWERDTFEGER, F., 1970: Die Waldkrankheiten, 3. Auflage, Hamburg, Berlin: Paul Parey.
- UBA, Monatsberichte aus dem Meßnetz des Umweltbundesamt, Berlin 1981–1984.
- WALDMANN, J. W.; MUNGER, J. W.; JAKOB, D. J.; FLAGAN, R. C.; MORGAN, J. J.; HOFFMANN, M. R., 1982: Chemical Composition of Acid Fog. Science 1982, 218, 677–680.
- WALTER, A., und PAYER, H. D., 1985: Expositions-kammern, Technik und Ausführung. In: Den Wald ins Labor holen. (Hrsg.: GSF) Neuherberg (1985), 20–33.

*Anschrift der Verfasser:* Dr. H. D. PAYER, Dr. L. W. BLANK, T. EISENMANN und Dr. K. H. RUNKEL, GSF Expositions-kammern, Ingolstädter Landstr. 1, D-8042 Neuherberg; Ch. Bosch, Lehrstuhl für Bodenkunde, Amalienstr. 52, D-8000 München 40

## Einfluß einer Düngung mit Magnesium und Calcium, von Ozon und saurem Nebel auf Frosthärte, Ernährungszustand und Biomasseproduktion junger Fichten (*Picea abies* [L.] Karst.)<sup>1</sup>

Von CHR. BOSCH, E. PFANNKUCH, K. E. REHFUESS, K. H. RUNKEL, P. SCHRAMEL und M. SENSER

Die Erkrankung der Fichte auf sauren Böden in den höheren Lagen der Mittelgebirge geht einher mit ausgeprägtem Magnesiummangel; sie wurde akut in zeitlichem Zusammenhang mit Frostschockereignissen zwischen 1979 und 1983. Deshalb galt unser besonderes Interesse den

<sup>1</sup> Beitrag Nr. 3 zum Pilotexperiment der Münchner Arbeitsgemeinschaft Luftschadstoffe (MAGL).

Auswirkungen der experimentellen Belastungen auf Mineralstoffversorgung und Frosthärte sowie den Reaktionen der Versuchspflanzen auf Frost.

### 1 Frostresistenz

Während des Kammerversuchs wurde die Frosthärte der Fichtennadeln dreimal bestimmt: a. wenige Tage nach dem Einstellen der Bäumchen in die jeweiligen Expositions-kammern, b. nach der 8. und c. nach der 13. Woche des über 22 Wochen laufenden Versuches. Abgeschnittene Triebe des Jahrgangs 1984 wurden bis zu einer Test-Temperatur von -10 °C mit einer Rate von 2 °C/h, anschließend mit 5 °C/h zur Erreichung tieferer Temperaturen abgekühlt. Die Proben verblieben einen Tag bei der eingestellten Testtemperatur, ehe man sie mit entsprechender Geschwindigkeit wieder auftauen ließ. Die Beurteilung der Frostschäden anhand der auftretenden Nekrosen erfolgte fortlaufend über eine Woche, während der die Triebe in einer feuchten Kammer standen. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 1 zusammengefaßt.

Die Fichten wiesen zu unserer Überraschung nur eine relativ geringe Frostresistenz von durchschnittlich -12,5°C auf. Die für das Kammerexperiment bereitgestellten Pflanzen waren zwar Kurztagbedingungen, nicht jedoch Temperaturen unter 0 °C ausgesetzt. Diese Temperaturen unterstützten also nicht voll den Frostresistenzwerb, der bei jungen, frisch verpflanzten Fichten ohnehin vermindert ist. Die Versuchsfichten erhielten bei der Pflanzung 1984 einen starken Wurzelschnitt und trieben sehr spät aus. Wahrscheinlich war deshalb auch ein Mangel an Reservestoffen nach einer verkürzten Vegetationsperiode, in der viele Assimilate in den Neuaufbau des Wurzelsystems investiert werden mußten, für die schlechte Frosthärtung verantwortlich. So ist es nicht verwunderlich, daß bereits Frosttemperaturen von -15 °C bei 50 % der Nadeln der getesteten Triebe Nekrosen verursachten. Bei -25 °C starben alle Nadeln ab.

Tabelle 1

Ergebnisse der experimentellen Frosthärteprüfung im Labor  
Results of the laboratory test on frost resistance

Varianten Frost- temp.°C	Wochen nach Versuchsbeginn															
	c.					8.					13.					
	-10	-12.5	-15	-20	-25	-10	-12.5	-15	-20	-25	-7.5	-10	-12.5	-15	-20	-25
Normalklima -Dü -O <sub>3</sub>	+	+(-)	+ -	-(+)	-	+	+(-)	+ -	-(+)	-	+	+(-)	+(-)	+ -	-+	-
Normalklima +Dü -O <sub>3</sub>	+	+	+(-)	+ -	-	+	+	+(-)	+ -	-	+	+(-)	+ -	-+	-+	-+
Extremklima -Dü -O <sub>3</sub>	+	+(-)	+ -	-(+)	-	+	+(-)	+ -	-+	-	+	+	+(-)	+(-)	+ -	-+
Extremklima +Dü -O <sub>3</sub>	+	+	+(-)	+ -	-	+	+	+ -	-+	-	+	+	+(-)	+ -	-+	-+
Extremklima -Dü +O <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+(-)	+ -	+ -	-+
Extremklima +Dü +O <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+ -	+ -	+ -	+ -	-+

+ keine Schädigung, +(-) 25 %, + - 50 %, -(+) 75 %, - 100 % der Nadeln geschädigt; 0 = nicht bestimmt (Beurteilung erfolgte visuell auf Grund der zunehmenden Nekrotisierung der Nadeln)  
+ undamaged; +(-) 25 %, + - 50 %, -(+) 75 %, - 100 % of the needles are frost damaged. 0 = not identified (Frost resistance was estimated according to the increased appearance of necrosis of the needles)

Da zu Versuchsbeginn sämtliche Klima- und Immissionsbedingungen für alle Bäumchen identisch waren, sollten sie sich anfangs in ihrer Frosthärte nicht unterscheiden. Eine geringfügige Erhöhung der Frostresistenz von max. 5 °C zeichnete sich jedoch bei den mit MgCa gedüngten Fichten ab. An sich war eine Zunahme der Frosthärte im Extremklima (+Fr) zur Zeit der 2. Bestimmung nach 8wöchiger Belastung zu erwarten, da hier bei anhaltendem Kurztag die Minimumtemperaturen mehrfach unter 0°C absanken. Unterschiede im Vergleich zum Normalklima traten jedoch nicht auf. Der Einfluß des Frostschocks machte sich erst in der 13. Woche bemerkbar, als unter Normalklima-Bedingungen mit einer Belichtungsdauer von mehr als 12 Stunden bereits eine leichte Enthärtung begann. Die Ozonbegasung trug nicht zur Verminderung der Frostresistenz bei.

## 2 Frosteffekte

Der Froststurz im Extremklima (+Fr) hatte dramatische Auswirkungen, die es nicht mehr zuließen, die +Fr-Varianten zu analysieren:

Ab der 8. Woche nach dem Ereignis bekamen die Nadeln vieler Fichten aufgrund von Reflexionsänderungen an der Epidermis zunächst einen weißlich-fahlen Schimmer, verfärbten sich mit dem allmählichen Temperaturanstieg der folgenden Wochen rotbraun und fielen später ab. Besonders betroffen waren die Zweigspitzen im unteren Kronenbereich. Mit dem Austrieb ab der 16. Woche begannen die meisten Fichten zu schütten. Am Versuchsende waren noch 4 von 48 +Fr-Fichten am Leben. Verfärbung und Nadelverlust setzten bei den mit MgCa nicht gedüngten Bäumen (-Dü) durchschnittlich etwas früher ein und verliefen intensiver, jedoch war die individuelle Streuung sehr groß.

Denselben Schädigungsverlauf konnte man übrigens auch an einzelnen Zweigen älterer Fichten im Freiland (Ludwigsreuth, Bayer. Wald) nach den extremen Frosttagen im Januar 1985 mit Temperaturen unter -35 °C an sehr exponierten Stellen beobachten. Die an diesem Standort ausgebrachten Versuchsfichten (Fl) waren dagegen gegen diesen Frost durch eine Schneedecke geschützt. Im Frosthärtungsversuch, wo keine intensive Bestrahlung auftritt und stets hohe Luftfeuchtigkeit herrscht, wurde der oben erwähnte Schadensverlauf indessen nie beobachtet. Geschädigte Nadeln werden dort braun, und eine irreversible Schädigung der Nadeln liegt vor, wenn der Chlorophyllgehalt unter 50 % gegenüber der Kontrolle abnimmt (SENSER u. BECK 1979).

Ursache für die Frostschädigung in den Kammern war nicht eine ungewöhnlich tiefe oder rasche Abkühlung, sondern die mangelhafte Frosthärtung der Pflanzen. Zum Zeitpunkt des Frostschocks wurde sie mit etwa -10-12 °C für die mit MgCa nicht gedüngten und mit -12-15 °C für die gedüngten Pflanzen bestimmt. Die Minimaltemperaturen fielen jedoch im Anhalt an beobachtete Froststürze im Schadensgebiet bis -18 °C. Die dadurch ausgelösten Schädigungen bestätigten die Ergebnisse des Frosthärtetests.

Alle weiteren Ausführungen beziehen sich auf die im Normalklima (-Fr) erwachsenen Fichten.

## 3 Leaching aus den Sprossen

Aufgrund der inhomogenen Nebelverteilung in den Kleinkammern streuten die Wassermengen erheblich, die in den Prüfvarianten aufgefangen wurden. Zwischen einzelnen Varianten zeigten sich jedoch unabhängig von der Menge des Traufwassers deutliche Unterschiede bezüglich der Elementmengen in der Kronentraufe.

In Tabelle 2 sind die um die Vorgabe im Nebel bereinigten Mengen an Bioelementen zusammengestellt, die mit der Kronentraufe aufgefangen wurden. Da K als KOH dem Normal-Nebel (-Ne) zugesetzt war, werden für K nur die Werte der +Ne-Varianten mitgeteilt. Alle Meßwerte sind auf die Nadelmasse bezogen, um den Einfluß dieser von Variante zu Variante variierenden Größe auszuschalten und den Effekt der Ab- und Auswaschung (Leaching) auf die Nadelspie-

Tabelle 2

Mengen an Bioelementen in der Kronentraufe (Leaching), bezogen auf die gesamte Nadelnadelnrockenmasse (Normalklima; -Fr)

Amounts of bio-elements in the throughfall (leaching) as related to the total needle dry matter (normal climatic conditions; -Fr)

Varianten	NH <sub>4</sub> -N	K	Ca	Elemente			
				Mg µg×g <sup>-1</sup> NTS	Mn	Fe	Cu
-O <sub>3</sub> -Ne-Dü	3	n. b.	25	14	0,93	0,29	0,14
-O <sub>3</sub> -Ne+Dü	9	n. b.	16	11	0,23	0,05	0,02
+O <sub>3</sub> -Ne-Dü	21	n. b.	25	16	1,20	0,00	0,10
+O <sub>3</sub> -Ne+Dü	12	n. b.	23	17	0,64	0,02	0,01
-O <sub>3</sub> +Ne-Dü	24	85	42	25	6,79	2,26	0,53
-O <sub>3</sub> +Ne+Dü	42	100	141	46	13,34	3,71	0,48
+O <sub>3</sub> +Ne-Dü	117	246	181	52	28,19	10,34	0,53
+O <sub>3</sub> +Ne+Dü	48	67	91	35	12,42	1,68	0,58

gelwerte abschätzen zu können. Die durch Leaching verursachten Verluste der Sprosse an Ca und Mg lassen sich allerdings nicht direkt mit den Nadel-Spiegelwerten im Sinne einer Bilanz verknüpfen; denn die Nadelmasse änderte sich im Verlauf des Experiments und außerdem ist nicht bekannt, in welchem Ausmaß die Sproßachsen zum Leaching beitragen.

Tabelle 2 läßt erkennen, daß sich die +Dü- und die -Dü-Varianten hinsichtlich der aufgefundenen Elementmengen im Mittel kaum unterschieden. Angesichts der deutlich erhöhten Mg- und Ca-Gehalte in den Nadeln gedüngter Fichten (vgl. Tab. 5) hätte man bei diesen ein verstärktes Leaching beider Elemente erwartet. Das Ausbleiben eines solchen Effektes könnte darauf beruhen, daß die Cytoplasmamembranen bei guter Versorgung mit Ca und Mg weniger durchlässig sind (Hinweis O. KANDLER 1986). Wegen der geringen Differenzen zwischen beiden Düngungsvarianten sind die Daten der Tabelle 2 in Abbildung 1 zu Mittelwerten für die verschiedenartig mit Ozon und saurem Nebel belasteten Prüfglieder zusammengefaßt. Ansäuerung des Nebels bewirkte durchweg einen kräftigen Anstieg des Leachings aller untersuchten Elemente. Der Einfluß des Ozons blieb im Durchschnitt klein. Nur bei ungedüngten Fichten

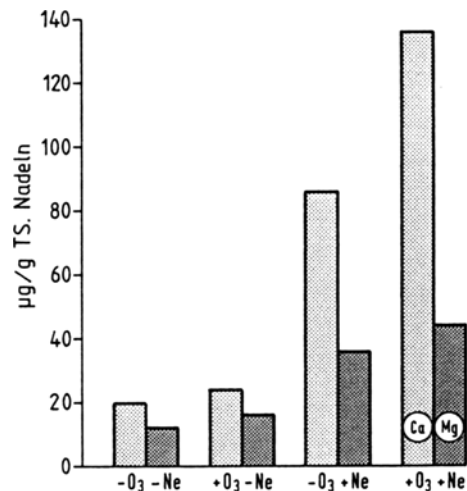


Abb. 1. Entzug von Mg und Ca mit dem Nebelwasser aus den Fichtenkronen im Normalklima (Mittelwerte für die mit MgCa gedüngten und die nicht gedüngten Varianten)

Fig. 1. Leaching of Mg and Ca by acid mist from the spruce crowns under normal climatic conditions (Averages for treatments fertilized and not fertilized with MgCa)

und beim Besprühen mit saurem Nebel (+Ne -Dü) steigerte O<sub>3</sub>-Begasung die Auswaschung von Ca, Mg, K, Mn und Fe deutlich.

Abbildung 2 informiert über das Leaching einiger Schwermetalle.

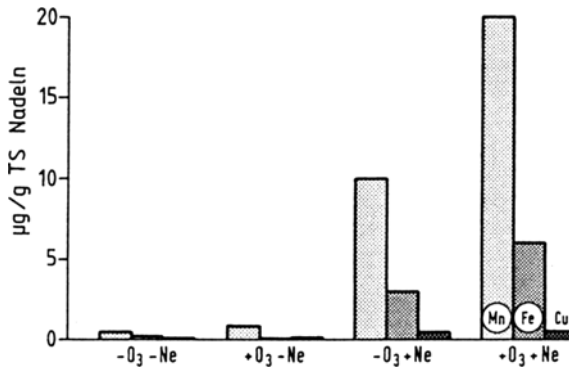


Abb. 2. Entzug von Mn, Fe und Cu mit dem Nebelwasser aus den Fichtenkronen im Normalklima (Anmerkungen wie Abb.1)

Fig. 2. Leaching of Mn, Fe and Cu from the spruce crowns under normal climatic conditions (For comments see Fig. 1)

## 4 Ernährungszustand der Fichten

### 4.1 Elementgehalte des Bodens

Alle Pflanzen erhielten bei der Verpflanzung im Frühjahr 1984 eine Grunddüngung mit 0,05 mg N als NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, 0,06 mg P und 0,24 mg K als K<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> je Gramm Boden. Die +Dü-Varianten wurden zusätzlich mit 0,74 mg Ca und 0,33 mg Mg je Gramm Boden in carbonatischer und sulfatischer Form versetzt.

Der Boden aus den 6 Containern einer Prüfvariante wurde nach dem Versuch zu einer Mischprobe vereinigt und analysiert. Tabelle 3 informiert über die mittleren Elementgehalte der ungedüngten (-Dü) und der gedüngten Varianten (+Dü).

Bei den ersteren schwankten die NH<sub>4</sub>Cl-extrahierbaren (austauschbaren) Mg- und Ca-Gehalte deutlich (Abb. 3 und 4), obwohl die durch unvollständiges Homogenisieren bedingten

Tabelle 3

Bodenchemische Kennwerte für die mit MgCa gedüngten (+Dü) und nichtgedüngten (-Dü) Varianten bei Abschluß des Experiments

Soil-chemical characteristics of treatments, fertilized (+Dü) and not fertilized (-Dü) with MgCa, at the end of the experiment

Kennwert	Variante	
	+Dü	-Dü
<i>pH-Wert</i>		
H <sub>2</sub> O	6,92	5,51
CaCl <sub>2</sub>	6,05	4,71
KCl	5,60	4,38
<i>Gehalte in 0,5 m NH<sub>4</sub>Cl-Extrakt (mmol lÄ/100 g)</i>		
K	0,24	0,14
Ca	1,04	0,28
Mg	0,28	0,05
Mn	0,02	0,03
Al	0,44	1,01
KAK eff	2,02	1,52
Basensättigung (%)	77	31

Abb. 3. Gehalte an austauschbarem Ca in Bodenmischproben getrennt nach Varianten. ( )-Werte durch Vertauschen von jeweils zwei Fichten zu nieder (1) bzw. überhöht (2)

Fig. 3. Contents of exchangeable Ca in composite soil samples of the different treatments. ( ) values too low (1) or too high (2) due to change by mistake of two trees per treatment

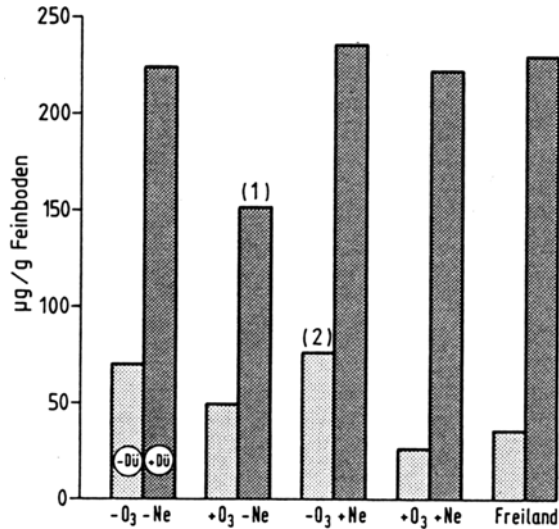
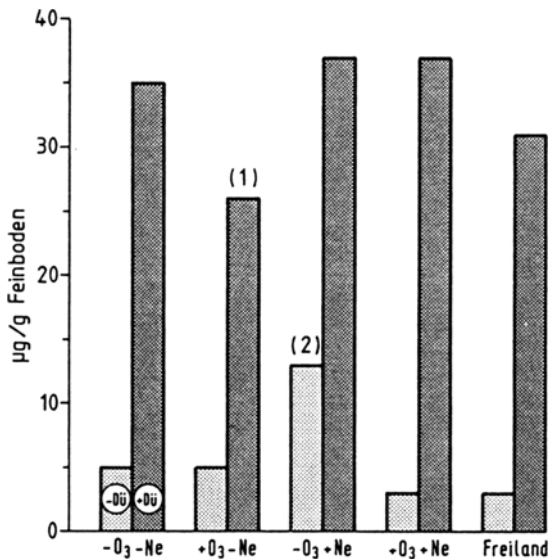


Abb. 4. Gehalte an austauschbarem Mg in Bodenmischproben getrennt nach Varianten (Anmerkungen wie Abb. 3)

Fig. 4. Contents of exchangeable Mg in composite soil samples of the different treatments (For comments see Fig. 3)



Abweichungen maximal 5 % erreichen dürften. Die mit O<sub>3</sub> und saurem Nebel belastete -Dü-Variante wies dabei die geringste Mg- und Ca-Ausstattung auf. Diese Unterlegenheit beruhte wahrscheinlich auf einer verschiedenartigen Durchwurzelung der Container und dadurch bedingten Differenzen im Nährelementenzug.

Die Gehalte an austauschbarem Mg und Ca der ungedüngten Böden waren zwar recht niedrig, lagen aber in der gleichen Größenordnung wie Vergleichswerte für B<sub>v</sub>-Horizonte aus Braunerden in den Hochlagen des Bayerischen Waldes (DBG 1975, ELLING u. a. 1976; BOSCH u. a. 1983).

Die Düngung mit Mg und Ca als Sulfat und Karbonat erhöhte die pH-Werte, die effektive Kationenaustauschkapazität, die Gehalte an austauschbarem Mg und Ca, den Basensättigungsgrad und senkte die Gehalte an austauschbarem Al und Mn. Der Anstieg der Gehalte an NH<sub>4</sub>Cl-extrahierbarem K im Boden der +Dü-Varianten beruhte auf einer durch die Zunahme

der effektiven Austauschkapazität verstärkten Sorption von K aus der Grunddüngung und aus Nachlieferung durch Verwitterung.

Die pH (H<sub>2</sub>O)-Werte und der +Dü- und der -Dü-Varianten lagen am Ende des Versuches in für die Fichte günstigen Bereichen; für beide Varianten ist weder mit Al-Toxizität noch mit starken antagonistischen Effekten zwischen Al<sup>3+</sup>-Ionen und Mg<sup>2+</sup>- bzw. Ca<sup>2+</sup>-Ionen (vgl. JORNS u. HECHT-BUCHHOLZ 1985) zu rechnen, da wohl kaum mehr freie Al<sup>3+</sup>-Ionen in der Bodenlösung vorkamen.

Durch die Bodenanalysen wurde übrigens aufgedeckt, daß zu Versuchsbeginn zwei Fichten der Variante -Fr+O<sub>3</sub>-Ne+Dü mit zwei Fichten der Variante -Fr-O<sub>3</sub>+Ne-Dü vertauscht worden waren. Bei der Diskussion der Meßdaten ist dieser Irrtum zu berücksichtigen.

#### 4.2 Nährelementspiegelwerte in den Fichtennadeln

Die Nährelementspiegelwerte in den Fichtennadeln wurden an Mischproben getrennt nach Nadeljahrgang und Prüfvariante bestimmt. Zusätzlich analysierten wir die Nadeln des Zentralbaumes in der Kammermitte einer jeden Variante getrennt, da dieser dem Nebel-Niederschlag am stärksten ausgesetzt war. Die Spiegelwerte dieser Zentralbäume wichen von den Analysen der Mischproben nicht signifikant ab, sondern bestätigten vielmehr die daran gewonnenen Ergebnisse. Bei einem Vergleich unserer Daten mit Literatur-Werten ist Vorsicht geboten, da die Analyse in die Zeit des Austriebs fiel und nicht, wie üblich, in die Vegetationsruhe (vgl. REEMTSMA 1964; MIES u. ZÖTTL 1985).

Tabelle 4 informiert über die durchschnittlichen N-, P- und K-Gehalte in den Nadeljahrgängen 1983 bis 1985.

Die *N-Spiegelwerte* zeigten einheitlich für alle Varianten einschließlich der im Freiland exponierten Pflanzen einen deutlichen N-Mangel, der beim Umpflanzen noch nicht bestand. Die kräftige N-Düngung im Frühjahr 1984 reichte also für die Vegetationszeit 1985 nicht mehr aus. Ursache dafür war vermutlich die Auswaschung von N aus dem Boden beim Gießen der Pflanzen vor dem Beginn des Kammerexperimentes. Eine Nachlieferung durch Mineralisation unterblieb, da wir als Substrat Bv-Material verwendet hatten. Unterschiede zwischen den Varianten in der N-Ernährung waren nicht erkennbar.

Auch die *P-Spiegelwerte* waren trotz kräftiger Düngung zu Versuchsbeginn, verglichen mit Freilandwerten, recht niedrig, variierten jedoch in den Nadeln des Jahrgangs 1985 noch im Bereich einer günstigen Versorgung. Wahrscheinlich waren die P-Gehalte in den Nadeln unserer Versuchsfichten vor allem durch die normale jahreszeitliche Kinetik bestimmt, die im Früh-

Tabelle 4

N-, P- u. K-Spiegelwerte in den Nadeln der Fichten bei Abschluß des Experimentes  
Levels of N, P, and K in the spruce needles at the end of the experiment

Element: Nadeljahrgang: Varianten	N			P			K		
	1983	1984	1985	1983	1984	1985	1983	1984	1985
	mg×g <sup>-1</sup> NTS								
-O <sub>3</sub> -Ne-Dü	7,3	7,2	8,9	0,84	1,06	2,08	2,97	3,54	9,88
-O <sub>3</sub> -Ne+Dü	7,4	7,6	6,8	0,79	0,91	1,69	3,14	3,32	8,29
+O <sub>3</sub> -Ne-Dü	7,5	6,8	n. b.	0,74	1,02	n. b.	3,06	3,91	8,57
+O <sub>3</sub> -Ne+Dü	8,4	7,9	8,8	0,79	1,03	1,92	2,79	3,25	8,60
-O <sub>3</sub> +Ne-Dü	8,2	7,4	8,3	0,73	0,89	1,29	2,79	3,37	8,19
-O <sub>3</sub> +Ne+Dü	7,4	6,8	7,2	0,70	0,91	1,57	2,88	3,09	9,56
+O <sub>3</sub> +Ne-Dü	7,5	7,5	n. b.	0,71	0,83	n. b.	3,41	3,93	9,54
+O <sub>3</sub> +Ne+Dü	8,1	7,3	7,9	0,80	0,96	1,88	2,98	3,29	8,91
Fl.-Dü	8,1	8,4	9,4	0,74	1,02	1,77	2,06	3,29	7,89
Fl.+Dü	6,9	6,9	7,7	0,73	0,91	1,73	2,36	3,06	7,98

sommer zu Minima führt (vgl. MIES u. ZÖTTL 1985). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten traten nicht auf.

Die *K-Spiegelwerte* zeigten die bekannte Altersabhängigkeit: Hohen Gehalten in den jüngsten Nadeln standen sehr geringe in den älteren Organen gegenüber. Die sehr hohen K-Spiegel der jüngsten Nadeln sprechen für eine ausreichende K-Versorgung, unabhängig von der Behandlung.

Unterschiede in den *Ca- und Mg-Spiegelwerten* zwischen den Behandlungsvarianten traten insbesondere bei den 1984 unmittelbar nach der Düngung mit MgCa gebildeten Nadeln auf, die am Ende des Versuchs im Gegensatz zum Jahrestrieb 1985 weitgehend ausgereift und während der vollen Laufzeit des Experiments den Einwirkungen von Ozon und Nebel ausgesetzt waren (Tab. 5).

Tabelle 5

Ca- und Mg-Spiegelwerte in den Nadeln der Fichten bei Abschluß des Experiments  
Levels of Ca and Mg in the spruce needles at the end of the experiment

Varianten	Nadeljahrgang			Nadeljahrgang		
	1983	1984	1985	1983	1984	1985
	mg Ca × g <sup>-1</sup> NTS			mg Mg × g <sup>-1</sup> NTS		
-O <sub>3</sub> -Ne-Dü	6,82	1,64	0,93	0,59	0,60	0,84
-O <sub>3</sub> -Ne+Dü	7,53	3,15	1,09	0,84	1,28	0,74
+O <sub>3</sub> -Ne-Dü	6,56	1,50	0,90	0,56	0,48	0,66
+O <sub>3</sub> -Ne+Dü <sup>1</sup>	7,79	2,43	0,85	0,69	0,89	0,70
-O <sub>3</sub> +Ne-Dü <sup>2</sup>	8,33	2,04	1,01	0,81	0,69	0,66
-O <sub>3</sub> +Ne+Dü	7,42	2,85	1,23	0,78	1,09	0,65
+O <sub>3</sub> +Ne-Dü	7,14	1,61	1,06	0,55	0,41	0,78
+O <sub>3</sub> +Ne+Dü	8,00	2,99	1,36	0,80	1,23	0,86
Fl.-Dü	6,72	1,02	0,69	0,35	0,29	0,62
Fl.+Dü	8,45	3,00	1,59	0,80	1,20	0,91

<sup>1,2</sup> Werte durch Vertauschen von jeweils 2 Fichten zu nieder (1) bzw. überhöht (2)

Der Anstieg der Ca-Spiegelwerte mit zunehmendem Nadelalter (Tab. 5) ist typisch (vgl. z. B. POPOVIC 1961) und trat bei allen Behandlungen auf. Die Ca-Nadelgehalte der +Dü-Fichten (Jahrgang 1984) lagen im unteren Bereich des aus Nord- und Süddeutschland bekannten Variationsrahmens und spiegeln eine gute Versorgung wider. Nach SWAN (1972; zit. bei MORRISON 1974) ist der Grenzwert für Ca-Mangel bei ca. 1–1,2 mg·g<sup>-1</sup> NTS anzusetzen. Alle -Dü-Varianten befanden sich nahe an dieser Schwelle. Die niedrigsten Ca-Spiegel fanden wir für die Mischprobe der Freilandfichten und den Zentralbaum des mit Ozon und saurem Nebel belasteten Kollektivs. Sie litten eindeutig unter Ca-Mangel. Die ungedüngten Fichten der übrigen Versuchsglieder waren mit Spiegelwerten zwischen 1,5 und 2,0 mg/g TS (1984) ohne Differenzierung nach den Behandlungen gerade noch ausreichend mit Ca versorgt (Tab. 5).

Auf die Mg-Gehalte des Nadeljahrgangs 1984 wirkte sich die Düngung mit MgCa besonders deutlich aus (Tab. 5; Abb. 5 und 6). Auch der Jahrestrieb 1983 reagierte auf die Düngung gewöhnlich mit einem Anstieg der Mg-Spiegel. Die Mangelgrenze für Mg wird zwischen 0,7–0,8 (FIEDLER u. a. 1973) und 1,0 mg·g TS (SWAN 1972; zit. bei MORRISON 1974) für 1/3-jährige Nadeln angesetzt. Damit litten alle -Dü-Varianten unter Mg-Mangel, während die gedüngten Bäume ausreichend versorgt waren.

Die gedüngten Fichten reagierten mit ihren Mg-Spiegelwerten kaum auf die verschiedenen Belastungen mit Luftschadstoffen (Abb. 6). Die geringen Verluste durch Leaching konnten sie vermutlich durch erhöhte Aufnahme ausgleichen (vgl. HORNTVEDT et al. 1981). Die Mg-Spiegelwerte der ungedüngten Fichten waren dagegen wahrscheinlich durch Ozonbegasung und Besprühen mit saurem Nebel beeinflusst (Abb. 5). Die ungedüngte Freilandvariante wies mit 0,29 mg·g<sup>-1</sup> TS im Jahrgang 1984 – einem Wert, wie er für stark vergilbte Fichten im Schadensgebiet



Abb. 5. Mg-Gehalte in den Nadeln der ungedüngten Fichten am Ende des Experiments (Nadeljahrgang 1984). (1) Wert durch Vertauschen zweier Fichten überhöht

Fig. 5. Contents of Mg in the needles of unfertilized spruces at the end of the experiment (needle age class 1984). (1) value too high due to change by mistake of two trees

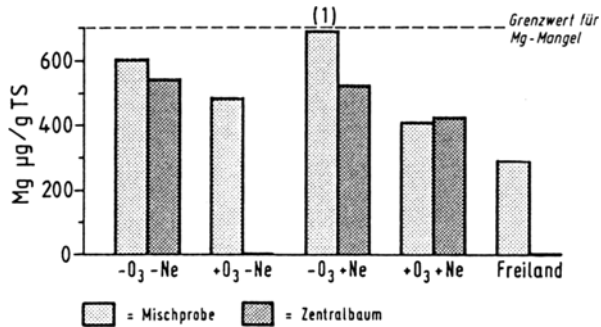
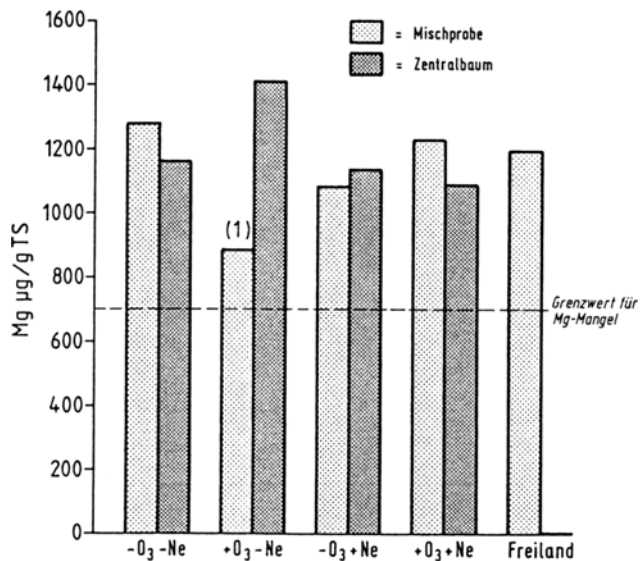


Abb. 6. Mg-Gehalte in den Nadeln der mit MgCa gedüngten Fichten am Ende des Experiments (Nadeljahrgang 1984). (1) Wert durch Vertauschen zweier Fichten zu niedrig

Fig. 6. Contents of Mg in the needles of spruces fertilized with MgCa at the end of the experiment (needle age class 1984). (1) value too low due to change by mistake of two trees



typisch ist – die schlechteste Mg-Ernährung auf. Darauf folgte die am stärksten belastete Kammervariante +O<sub>3</sub>+Ne-Dü mit 0,41 mg·g<sup>-1</sup> TS. Auch der Zentralbaum dieser Prüfvariante schnitt besonders ungünstig ab. Die Abstufung der Mg-Versorgung nach Prüfgliedern entsprach übrigens weitgehend der Reihenfolge der Ca-Spiegelwerte (vgl. Tab. 5).

Mg-Mangelsymptome, die bei derart niedrigen Mg-Spiegelwerten eigentlich auftreten sollten, wurden nicht beobachtet. Dieses Ausbleiben von Symptomen erklärt sich wahrscheinlich durch den überlagernden Effekt der schlechten N-Versorgung und das frühzeitige Ende des Experiments noch vor Abschluß des Austriebs und der damit gekoppelten Mg-Umlagerungsprozesse.

Bei einem Vergleich der durch Leaching den Nadeln entzogenen Mg- und Ca-Mengen (Tab. 2) mit den Mg- und Ca-Spiegelwerten der Fichten ergibt sich für die gedüngten Versuchsglieder kein Zusammenhang. Bei den ungedüngten Pflanzen dagegen wies die Variante mit dem stärksten Leaching (+O<sub>3</sub>+Ne) auch besonders tiefe Mg-Spiegel auf. Nur die Freilandfichten – bei denen wegen hoher Benetzungszeiten ebenfalls mit starkem Leaching gerechnet werden muß – waren mit Mg noch schlechter versorgt. Allerdings beruhte die unzureichende Mg-Ernährung der +O<sub>3</sub>+Ne-Dü-Fichten in den Kammern keineswegs allein auf Kronenauswaschung; denn die in der Kronentraufe aufgefangene Mg-Menge (52 µg·g<sup>-1</sup> NTS) war viel kleiner als der Unterschied zur Vergleichsvariante -O<sub>3</sub>-Ne-Dü im Mg-Gehalt des Nadeljahrgangs 1984 (405 gegenüber 600 µg·g<sup>-1</sup> NTS). Die besonders schwache Ausstattung des Bodens mit Mg und

Ca gerade bei dem Prüfglied +O<sub>3</sub>+Ne-Dü trug sicher ebenfalls maßgeblich zum Mg-Mangel der Fichten bei. Der mögliche Anteil des Leachings bleibt trotzdem beachtlich, wenn man bedenkt, daß der saure Nebel nur in fünf Nebelperioden an 17 Tagen mit insgesamt 120 Stunden Einwirkungszeit appliziert wurde.

Die in Tabelle 6 dargestellten Mikronährelement-Spiegelwerte variierten mit geringen, durch das Verpflanzen der Fichten im Jahr 1984 bedingten Abweichungen ohne Differenzierung nach Varianten im üblichen Rahmen. Bemerkenswert sind die niedrigen Zn- und Al-Gehalte in den Nadeln der Kammerfichten (Abb. 7). Die Düngung und der damit verbundene pH-Anstieg reduzierten in allen Belastungsvarianten die Al-Spiegel. Die signifikant höheren Al-Nadelgehalte der Freilandfichten dürften zumindest teilweise auf dem Einfluß von Al-haltigem Hangzugwasser beruhen. Die Gehalte der Nadeln an Cd, Pb, Ni und Ti wurden ebenfalls überprüft; dabei fanden wir unabhängig von der Behandlung normale, unauffällige Werte.

Tabelle 6

Mn-, Fe- und Zn-Spiegelwerte in den Nadeln der Fichten bei Abschluß des Experiments  
Levels of Mn, Fe and Zn in the spruce needles at the end of the experiment

Element: Nadeljahrgang: Varianten	Mn			Fe			Zn		
	1983	1984	1985	1983	1984	1985	1983	1984	1985
-O <sub>3</sub> -Ne-Dü	791	260	182	98	71	101	60	14	35
-O <sub>3</sub> -Ne+Dü	768	281	168	101	58	53	62	19	33
+O <sub>3</sub> -Ne-Dü	630	227	151	103	63	136	48	13	37
+O <sub>3</sub> -Ne+Dü	737	341	193	100	58	55	58	14	36
-O <sub>3</sub> +Ne-Dü	868	323	193	107	66	102	67	16	38
-O <sub>3</sub> +Ne+Dü	902	313	183	98	54	51	56	17	34
+O <sub>3</sub> +Ne-Dü	788	324	170	101	61	47	48	15	33
+O <sub>3</sub> +Ne+Dü	843	312	183	93	50	45	61	16	36
Fl.-Dü	708	186	126	173	98	50	49	10	22
Fl.+Dü	972	378	211	186	127	98	69	18	23

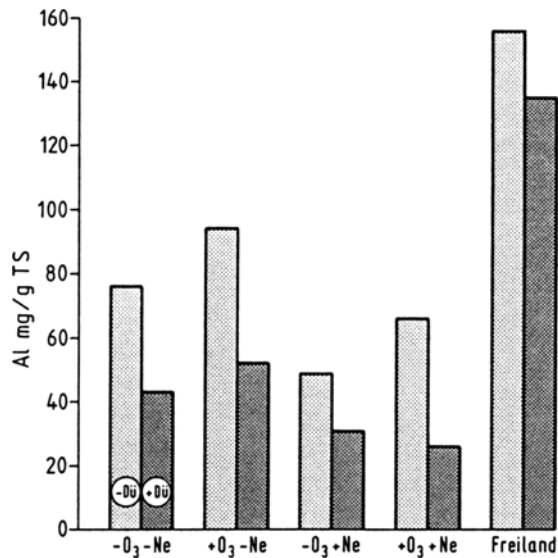


Abb. 7. Al-Gehalte in den Nadeln gedüngter und ungedüngter Fichten am Ende des Experiments (Nadeljahrgang 1984)

Fig. 7. Al-contents in the needles of fertilized and unfertilized spruces at the end of the experiment (needle age class 1984)

## 5 Biomasseproduktion

Die Gesamtbiomassen und die Sproßachsenmassen der Fichten aller Prüfvarianten am Ende des Experiments wiesen eine hohe Streuung auf, die wohl in erster Linie auf der verschiedenartigen Bewurzelung der Fichten nach dem Abstecken und auf der Konkurrenz im Stecklingsbeet beruhte. Deshalb ist es sinnvoll, neben den Gesamtbiomassen vor allem den Zuwachs an Sproßachsenmasse während der Laufzeit des Experiments in den Jahren 1984 und 1985 zu betrachten. Läßt man die Freiland-Varianten außer acht, zeigt sich hierbei ein deutlicher Vorsprung der gedüngten vor den ungedüngten Fichten. Der Austrieb letzterer war 1985 um etwa eine Woche verzögert (Tab. 7). Die Fichten der mit Ozon belasteten, aber nicht gedüngten Prüfgruppen (+O<sub>3</sub>-Dü) zeichneten sich durch besonders kleine Biomassen und geringen Sproßachsenzuwachs aus.

Tabelle 7

### Biomassen von Sprossen und Wurzeln, Sproß/Wurzel-Verhältnisse und Sproßachsenzuwachs 1984/1985 der Versuchsfichten

Biomass of shoots and roots, shoot/root-ratios and leader shoot growth 1984/1985 of the experimental trees

Varianten	Organ				Zuwachs an Sproßachsen	
	Sproß	Wurzeln <sup>1</sup>	Sproß + Wurzeln	Sproß/ Wurzeln	1984	1985
	g/Baum				g/Baum	
-O <sub>3</sub> -Ne-Dü	97	18	115	5,4	4,5	0,6
-O <sub>3</sub> -Ne+Dü	80	21	101	3,7	4,5	1,0
+O <sub>3</sub> -Ne-Dü	62	14	76	4,3	3,4	0,4
+O <sub>3</sub> -Ne+Dü	102	22	124	4,7	4,4	1,2
-O <sub>3</sub> +Ne-Dü	94	20	113	4,8	4,3	0,6
-O <sub>3</sub> +Ne+Dü	89	19	108	4,7	5,3	0,9
+O <sub>3</sub> +Ne-Dü	59	13	72	4,4	4,0	0,4
+O <sub>3</sub> +Ne+Dü	85	22	107	4,0	4,8	1,1
Fl-Dü	82	24	106	3,4	4,3	1,0
Fl+Dü	73	24	97	3,0	3,3	0,9

<sup>1</sup> Daten in dankenswerter Weise zur Verfügung gestellt von M. WEISS u. R. AGERER

### Danksagung

Das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten förderte die Vorbereitung des Experiments im Rahmen des Forschungsprojekts FVA B 37; das Bayerische Staatsministerium für Unterricht und Kultur unterstützte die Durchführung durch eine Beihilfe im Rahmen der Bayerischen Forschungsgruppe Forsttoxikologie.

Dr. M. Roberts/Leatherhead und Dr. W. O. Binns/Alice Holt Lodge berieten uns bei der Entwicklung des Versuchsplans. H. Holzmüller führte einen Teil der Analysen durch; J. Skrebsky fertigte die Diagramme, E. Ruhl die Reinschrift des Manuskripts.

Allen Beteiligten gilt unser herzlicher Dank.

### Zusammenfassung

Der Frostschock im Extremklima mit Minimaltemperaturen um -18 °C führte zum Absterben fast aller betroffenen Fichten, weil sowohl die mit MgCa gedüngten als auch die ungedüngten Fichten nicht ausreichend kälteresistent waren (bis -15 bzw. -12 °C). Alternierende Applikation von saurem Nebel und Ozonbegasung steigerten die Kronenauswaschung von Mg, Ca, Fe und Mg bei ungedüngten Fichten signifikant. Beschleunigtes Leaching war jedoch nur auf Substrat, das besonders arm an austauschbarem Mg und Ca war, mit Mg- und Ca-Nadelspiegelwer-

ten im Mangelbereich verknüpft. Auf MgCa-gedüngten Böden konnten die Fichten die geringen Verluste im Sproßbereich durch Mehraufnahme kompensieren. Mg-Mängelsymptome traten trotz tiefer Mg-Spiegelwerte nicht auf, vermutlich weil alle Kammerfichten auch unter N-Mangel litten. Der Sproßachsenzuwachs 1984 und 1985 war durch MgCa-Düngung deutlich gefördert; die Belastung mit Ozon und saurem Nebel wirkte sich dagegen nicht aus.

### Summary

*Effects of magnesium and calcium fertilization, ozone and acid mist on the mineral nutrition, frost resistance and biomass production of young spruce trees (Picea abies [L.] Karst.)*

A frost shock with minimum temperatures down to  $-18^{\circ}\text{C}$  caused the death of nearly all affected trees due to the fact, that the spruces fertilized with MgCa as well as the unfertilized ones were not adequately frost-resistant (down to  $-15$  and  $-12^{\circ}\text{C}$ , respectively). Alternate spraying with acid mist and fumigation with ozone increased the leaching of Ca, Mg, Fe, and Mn from shoots of unfertilized spruces significantly. Accelerated leaching, however, went along with foliar deficiency levels of Mg and Ca only on soils especially poor in exchangeable Mg and Ca. Trees on soils amended with both elements obviously were able to compensate for the minor losses in the foliage by additional uptake from the soil. Shoot increment in 1984 and 1985 increased after MgCa-fertilization, but was not significantly affected by ozone and acid mist treatment.

### Literatur

- BOSCH, C., u. a., 1983: Über die Erkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst.) in den Hochlagen des Bayerischen Waldes. Forstw. Cbl. 102, 167–181.
- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 1975: Exkursionsführer zur Jahrestagung 1975 in Regensburg. Mitt. DBG 21.
- ELLING, W., u. a., 1976: Nationalpark Bayerischer Wald – Klima und Böden. Bayer. Staatsmin. f. Ern., Landw. u. Forsten.
- FIEDLER, H. J., u. a., 1973: Forstliche Pflanzenernährung und Düngung. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag.
- HORNTVEDT, R., u. a., 1980: Effects of acid precipitation on soil and forest. 2. Atmosphere-vegetation interactions. In: DRABLOS, D., and TOLLAN, A. (eds.), Ecological Impact of Acid Precipitation, 192–193.
- MIES, E.; ZÖTTL, H. W., 1985: Zeitliche Änderungen der Chlorophyll- und Elementgehalte in den Nadeln eines gelb-chlorotischen Fichtenbestandes. Forstw. Cbl. 104, 1–8.
- MORRISON, J. K., 1974: Mineral nutrition of conifers with special reference to nutrient status interpretation. A review of literature. Dept. Environment, Can. Forestry Service Publ. No. 1343, Ottawa.
- POPOVIC, B., 1961: Die jahreszeitlichen Veränderungen des Nährstoffgehaltes von Fichten- und Kiefernadeln auf gedüngten und ungedüngten Flächen. Diss. Univ. Göttingen.
- REEMTSMA, J., 1964: Untersuchungen an der Fichte und anderen Nadelbaumarten über den Nährstoffgehalt der lebenden Nadeljahrgänge und der Streu. Diss. Univ. Göttingen.
- SENER, M.; BECK, E., 1979: Kälteresistenz der Fichte II. Einfluß von Photoperiode und Temperatur auf die Struktur und photochemischen Reaktionen von Chloroplasten. Ber. Deutsch. Bot. Ges. 92, 243–259.
- ZÖTTL, H. W.; MIES, E., 1983: Die Fichtenerkrankung in den Hochlagen des Südschwarzwaldes. Allgem. Forst- und Jagdzeitung 154, 110–114.

*Anschriften der Autoren:* Dipl.-Forstw. CHR. BOSCH, Dipl.-Biol. E. PFANNKUCH, Prof. Dr. K. E. REHFUESS, Lehrstuhl für Bodenkunde der Universität München, Amalienstraße 52, D-8000 München 40; Dr. K. H. RUNKEL, Dr. P. SCHRAMEL, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung München, Ingolstädter Landstraße 1, D-8042 Neuherberg; Dr. M. SENER, Botanisches Institut der Universität München, Menzingerstraße 67, D-8000 München 19