

# Über die Erkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst.) in den Hochlagen des Bayerischen Waldes

VON C. BOSCH, E. PFANNKUCH, U. BAUM UND K. E. REHFUESS

## 1 Einleitung

Seit etwa 1980 tritt in den Hochlagen des Bayerischen Waldes vor allem oberhalb 1000 m über NN und bei mittleren jährlichen Niederschlägen von 1250 mm und mehr ebenso wie in den Kammlagen des Oberpfälzer Waldes eine offensichtlich neuartige Erkrankung der Fichte auf. Sie betrifft Bestände aller Altersklassen und geht mit reduzierter Vitalität und Absterbeerscheinungen einher, deren Intensität in der Zwischenzeit noch zunahm. Für diese Erkrankung sind folgende Symptome typisch:

Chlorosen und nachfolgende Nekrosen älterer Nadeln, welche an den Spitzen beginnen und normalerweise auf der oberen (belichteten) Seite der Zweige stärker ausgeprägt sind (Goldspitzigkeit); Befall der Nadeln durch sekundäre Pilzparasiten wie *Rhizosphaera kalkhoffii*; vorzeitiges Schütten der älteren Nadeln; Abnahme der Kronendichte beginnend in den basalen und inneren Teilen der Krone; reduziertes Volumenwachstum (KASBERGER 1982); teilweise Verstärkung des Flechtenbesatzes; rascher Tod einzelner Bäume oder ganzer Baumgruppen, während unmittelbar benachbarte Fichten gesund erscheinen; Auflösung älterer Bestände.

Diese Symptome sind weitgehend identisch mit einer Erkrankung der Fichte in den höheren Lagen des Fichtelgebirges und des Frankenwaldes (ZECH u. POPP 1983) sowie an der Bärhalde im Südschwarzwald (ZÖTTL u. MIES 1983).

Im Inneren Bayerischen Wald mit seinem Gürtel natürlicher Fichten-Hochlagenwälder zwischen etwa 1150 m und den Berggipfeln (höchste Erhebung 1456 m), sind sowohl autochthone, naturnah und femelartig aufgebaute Wälder als auch gleichaltrige Fichtenbestände unbekannter Provenienz betroffen, jedoch scheinen die letzteren stärker zu leiden. Vorherrschende, mitherrschende und unterdrückte Bäume können dieselben Symptome aufweisen, die vielfach an den Bestandesrändern und an belichteten Kronenteilen besonders stark hervortreten. Die Absterbeerscheinungen sind verbreitet auf sauren und Podsol-Braunerden und flachen Podsolen, welche sich in Granit- oder Gneis-Hangschuttdecken entwickelt haben. Diese periglazialen Schuttmassen sind in charakteristischer Weise geschichtet und gegliedert in eine oberflächliche Lage (30-80 cm mächtig), locker und reich an Steinen und Blöcken, und in ein tieferes Stratum, das dicht - kompakt ist und plattige Struktur sowie hangparallele Ausrichtung der Steine aufweist. Die Wurzelsysteme der Fichte sind gewöhnlich auf die obere Lage beschränkt und deshalb häufig ziemlich flach ausgebildet. Auf Böden aus Granit scheint die Erkrankung schon tiefer in den Hanglagen ab etwa 700 m einzusetzen.

Da die auffallende Goldspitzigkeit älterer Nadeln auf eine Ernährungsstörung hinweist, gingen wir dieser seit November 1981 mit überwiegend standortkundlichen Methoden nach. Dabei war es das Ziel, durch einen möglichst umfassenden Vergleich gesunder und kranker Bäume auf verschiedenen Standorten eine Arbeitshypothese über die Entstehung dieser Erkrankung herzuleiten.

## 2 Probebestände und Untersuchungsmethoden

### 2.1 Elementgehalte der Nadeln

Die beiden typischen Probebestände aus unserer Studie, über die hier berichtet wird, sind in Tabelle 1 kurz charakterisiert.

Tabelle 1

Beschreibung der Probestandorte und -bestände  
Description of sample sites and stands

Probebestand Forstamt/Abt.	Höhe ü. NN (M)	Geländeform	Bodenform	Alter (Jahre)	Bonität
<i>Luchsplatzl</i> FA Bodenmais Distr. II Abt. 7	1200	S-W-Hang mäßig geneigt	Pods.-Braunerde aus Paragneis-Hangschutt	103	1,0 Fi IV,0
<i>Hochkamm-Dreisessel</i> FA Neureichenau Distr. X Abt. 5	1150	S-W-Hang mäßig geneigt	Pods.-Braunerde aus Granit-Hangschutt	27	1,0 Fi IV,5

Im November 1981 gewannen wir repräsentative Nadelproben von befallenen und gesund erscheinenden Fichten. In jedem Bestand wurden hierfür 3–5 Baumpaare ausgewählt und beerntet, deren jedes zwei benachbarte Fichten von ähnlichem Alter, gleicher Höhe, gleichem Durchmesser und gleicher Bestandesposition umfaßte. Beide Partner wuchsen offensichtlich unter denselben kleinstandörtlichen Bedingungen. Einer dieser Bäume zeigte jeweils ausgeprägte Symptome der Erkrankung, während der zweite frei von Absterbeercheinungen war. Wir gewannen die Nadeln aller Altersklassen aus dem obersten Wirtel und aus dem 5. bzw. 7. Quirl. Nach Trocknen bei 65° C wurden die Gewichte von jeweils 100 Nadeln bestimmt und die Nadelpulver anschließend nach Standard-Labormethoden auf ihre Gehalte an Nährelementen und Aluminium analysiert:

Stickstoff nach Kjeldahl; nach Veraschen bei 450° C und Aufnahme des Rückstandes mit 2 % HCl Phosphor kolorimetrisch mit Ammonium-Vanadat-Molybdat; Kalium und Calcium flammenphotometrisch; Magnesium, Eisen, Mangan, Kupfer und Zink atomabsorptionsspektrophotometrisch; Aluminium kolorimetrisch mit Aluminon.

### 2.2 Zucker und Stärke in den Nadeln

2 g tiefgefrorenes Nadelmaterial wurden im Mörser zerrieben, mehrmals mit 80 % Äthanol heiß extrahiert und abzentrifugiert. Nach Ergänzung des Extrakts auf 20 ml versetzte man 0,8 ml mit Aktivkohle, um Anthocyane und phenolische Verbindungen sowie die Saccharide daran zu binden. Die Mono- und Oligosaccharide wurden der Aktivkohle anschließend durch mehrmaliges Aufschlänmen und Abzentrifugieren mit 10 % Aceton wieder entzogen. Die so gereinigte Probe ließen wir im Labor des Botanischen Instituts der Universität München an einem Zuckeranalysator LC Biotronic auf Mono- und Oligosaccharide analysieren. Die Trennung erfolgte über Boratkomplexe in einem Anionenaustauscher, die Detektion mittels Orcin-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Aus dem Rückstand der äthanolischen Extraktion wurde Stärke mit 1,1 % HCl im kochenden Wasserbad extrahiert, mit Amyloglucosidase gespalten und die freie Glucose mit einem enzymatischen Test nach Boehringer gemessen.

### 2.3 Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenemissionsspektroskopie der Nadeln

Sämtliche Untersuchungen wurden an einem REM der Fa. JEOL Typ ISM 35 in den Laboratorien der Fa. Robert Bosch, Stuttgart, durchgeführt. Die Anregungsspannungen lagen zwischen 10 und 35 kV, wobei man die höheren für die Röntgenemissionsspektroskopie benötigte. Spannungen über ca. 20 kV führten schon zu sichtbaren Schäden an den Nadeloberflächen.

Die Proben wurden im Vakuum getrocknet und für morphologische Beobachtungen unter Kühlung mit Gold besputtert. Für die Elementanalysen verwendeten wir ein energiedispersives System der Fa. Getag Typ 5100. Proben, die sowohl analysiert als auch betrachtet werden sollten, erhielten eine Kohlebedampfung in einem Prototyp-Gerät der Fa. Bosch.

Die Röntgenstrahlung dringt ca. 10  $\mu\text{m}$  in die Gewebe ein. Da jedoch die Strahlungsausbeute mit der Tiefe der jeweiligen Quelle in der Probe exponentiell abnimmt, werden bei Aufsichtuntersuchungen an ganzen Nadeln wohl nur die Verhältnisse innerhalb der Cuticula und in den obersten Zellbereichen erfaßt.

### 2.4 Bodenanalysen

Im September 1982 ließen wir auf jeder Probebläche zwei bis drei repräsentative Bodenprofile aufgraben, die intensiv beschrieben, beprobt und analysiert wurden. Aus dieser Serie werden zwei typische Bodenformen in diese Studie einbezogen.

Der pH-Wert wurde in Wasser und 0,01 m  $\text{CaCl}_2$  mit einer Glaselektrode, der organische Kohlenstoff in einer Wösthoff-Apparatur und der Gesamt-Stickstoff nach Kjeldahl bestimmt. Im Flußsäure/Perchlorsäureaufschluß wiesen wir Gesamt-Phosphor kolorimetrisch mit der Molybdänblau-Methode, Gesamt-Kalium flammenphotometrisch, Gesamt-Calcium- und -Magnesium mittels Atomabsorptionsspektrophotometrie nach (Ca mit  $\text{SrCl}_2$ -Zusatz). Die effektive Kationenaustauschkapazität wurde nach ULRICH bestimmt; die hier mitgeteilten Werte für die einzelnen Elemente schließen auch die wasserlöslichen Bindungsformen mit ein, deren Anteil aber im Vergleich zu den austauschbaren Fraktionen erfahrungsgemäß vernachlässigbar klein ist.

## 3 Ergebnisse der Nadelanalysen

Auf allen untersuchten Probeblächen erwiesen sich sowohl die gesunden als auch die erkrankten Fichten als mit Stickstoff und Phosphor ausgezeichnet versorgt (Tab. 2 u. 4). Auch die Kalium-Ernährung war gewöhnlich ausreichend, obwohl die kranken Bäume geringfügig niedrigere K-Spiegelwerte aufwiesen.

Die Eisen-, Mangan-, Kupfer- und Zinkgehalte in den Nadeln gesunder Bäume übertrafen gewöhnlich die Vergleichswerte von benachbarten erkrankten Fichten. Diese Differenzierung fiel besonders auf für Mangan auf der Fläche „Dreisessel“ und für Zink in allen anderen Probebeständen (Tab. 3 u. 5). Trotzdem litten die meisten absterbenden Bäume vermutlich nicht unter Spurenelementmangel; denn ihre Spiegelwerte variierten normalerweise oberhalb der bekannten Mangelgrenzen, und die z. T. sehr typischen Spurenelement-Mangelsymptome waren nirgends zu beobachten. Die Aluminiumgehalte in den Fichtennadeln wichen zwischen gesunden und kranken Bäumen nicht signifikant voneinander ab und erreichten normale Größenordnung. Unsere Proben sind noch nicht auf Schwefel analysiert; die Bayerische Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt bestimmte indessen im Herbst 1981 in derselben Landschaft S-Gehalte der Fichtennadeln, die im natürlichen Variationsbereich zwischen 0,7 und 1,3 mg S/g schwankten. Da die Nadeln von gesunden und kranken Fichten annähernd gleich schwer waren, ist nicht mit Verdünnungs- oder Konzentrationseffekten zu rechnen.

Tabelle 2

Makronährelementgehalte 1981 in den Nadeln kranker und gesunder Altfichten im Probestand Luchsplatzl/FA Bodenmais

Macronutrient contents 1981 in the needles of diseased and healthy old spruce trees at site Luchsplatzl/FA Bodenmais

Element		Kranke Bäume			Gesunde Bäume		
		Min.	Max.	$\bar{x}$	Min.	Max.	$\bar{x}$
<i>Jahrgang 1981</i>							
N	mg/g	16,2	17,7	17,0	14,3	16,9	15,9
P		1,6	1,8	1,7	1,6	2,1	1,9
K		3,6	5,3	4,4	5,4	6,1	5,7
Ca		0,8	1,6	1,2	1,4	2,0	1,7
Mg		0,39	0,68	0,51	0,58	0,81	0,69
<i>Jahrgang 1978</i>							
N	mg/g	13,0	14,2	13,7	12,0	14,2	13,2
P		1,0	1,1	1,0	1,2	1,3	1,2
K		3,5	4,6	4,1	4,0	5,9	4,8
Ca		1,8	3,9	2,5	2,7	5,6	4,0
Mg		0,17	0,29	0,24	0,27	0,84	0,52

Tabelle 3

Mikronährelement- und Aluminiumgehalte 1981 in den Nadeln kranker und gesunder Altfichten im Probestand Luchsplatzl/FA Bodenmais

Micronutrient and aluminum contents 1981 in the needles of diseased and healthy old spruce trees at site Luchsplatzl/FA Bodenmais

Element		Kranke Bäume			Gesunde Bäume		
		Min.	Max.	$\bar{x}$	Min.	Max.	$\bar{x}$
<i>Jahrgang 1981</i>							
Fe	$\mu\text{g/g}$	35	40	37	40	52	45
Mn		112	187	158	173	193	181
Cu		3	7	5	3	5	4
Zn		7	18	13	16	24	20
Al <sup>1</sup>		71	100	83	92	97	94
<i>Jahrgang 1978</i>							
Fe	$\mu\text{g/g}$	59	68	64	64	92	74
Mn		168	209	194	178	306	221
Cu		3	4	3	2	5	4
Zn		8	12	10	12	20	15

<sup>1</sup> Wegen Materialknappheit gemessen teils im Nadeljahrgang 1981, teils im Jahrgang 1980.

Der auffälligste Unterschied zwischen gesunden und befallenen Probestämmen betraf die Magnesium- und Calciumernährung. In allen Untersuchungsbeständen lag das Versorgungsniveau insbesondere für Magnesium allgemein sehr niedrig, und auch die gesund erscheinenden Bäume waren nicht ausreichend versorgt. In jedem einzelnen Vergleichspaar wies jedoch die gesunde Fichte jeweils höhere Magnesium- und Calciumgehalte in den Nadeln auf als ihr kranker Nachbar.

Alle von der Erkrankung betroffenen Bäume litten unter extremem Magnesiummangel, und dieser war stärker ausgeprägt in den älteren als in den jüngeren Nadeln und auf Böden, die aus dem Mg-armen Granit hervorgingen, im Vergleich zu den relativ Mg-reichen

Tabelle 4

Makronährelementgehalte 1981 in den Nadeln kranker und gesunder junger Fichten im Probestand Dreisessel/FA Neureichenau

Macronutrient contents 1981 in the needles of diseased and healthy young spruce trees at site Dreisessel/FA Neureichenau

Element		Kranke Bäume			Gesunde Bäume		
		Min.	Max.	$\bar{x}$	Min.	Max.	$\bar{x}$
<i>Jahrgang 1981</i>							
N	mg/g	16,7	25,2	20,0	15,6	19,7	17,9
P		1,9	3,1	2,2	1,7	2,2	2,0
K		4,9	6,8	5,8	6,0	7,2	6,3
Ca		1,11	2,15	1,71	2,15	3,14	2,77
Mg		0,17	0,29	0,21	0,30	0,47	0,40
<i>Jahrgang 1978</i>							
N	mg/g	12,6	15,9	14,0	12,4	14,6	13,2
P		1,5	2,5	1,8	1,3	1,4	1,3
K		4,6	6,2	5,3	4,0	4,8	4,4
Ca		3,6	4,7	4,0	5,3	6,8	5,9
Mg		0,13	0,23	0,16	0,26	0,35	0,29

Tabelle 5

Mikronährelement- und Aluminiumgehalte 1981 in den Nadeln kranker und gesunder junger Fichten im Probestand Dreisessel/FA Neureichenau

Micronutrient and aluminum contents 1981 in the needles of diseased and healthy young spruce trees at site Dreisessel/FA Neureichenau

Element		Kranke Bäume			Gesunde Bäume		
		Min.	Max.	$\bar{x}$	Min.	Max.	$\bar{x}$
<i>Jahrgang 1981</i>							
Fe	$\mu\text{g/g}$	45	68	52	36	62	52
Mn		158	355	289	523	848	665
Cu		3	4	4	4	7	5
Zn		16	24	20	21	47	37
Al		54	129	102	72	112	89
<i>Jahrgang 1978</i>							
Fe	$\mu\text{g/g}$	74	124	92	62	101	78
Mn		438	632	561	674	1281	1044
Cu		4	5	4	3	4	4
Zn		21	46	29	26	48	32
Al		183	288	246	108	331	182

Paragneis-Substraten (Tab. 2 u. 4). Die Ergebnisse der Calciumanalysen sind schwieriger zu interpretieren, da man die Mangelgrenzen für dieses Element und für ältere Fichtenbestände noch nicht genau kennt. Jedoch liegen die beobachteten Calcium-Spiegel sehr niedrig im Vergleich zu den Ergebnissen aller Erhebungen über den Ernährungszustand von Fichtenbeständen in Süddeutschland (STREBEL 1960, REHFUESS und MOLL 1965, REHFUESS 1969 und 1973, ELLING u. a. 1976) und kommen nahe an die Schwellenwerte heran, bei deren Unterschreiten nach MORRISON (1974) und VAN DEN BURG (1979) mit Ca-Mangel zu rechnen ist.

Die Ergebnisse dieser konventionellen Nadelanalysen stimmen weitgehend überein mit

jenigen von ZECH und POPP (1983) in erkrankten Fichtenbeständen des Frankenwaldes und Fichtelgebirges sowie von ZÖTTI und MIES (1983) für das Feldberggebiet im Schwarzwald.

Die rasterelektronenmikroskopische Überprüfung repräsentativer 4-jähriger Nadeln ließ keine auffallenden Cuticula-Schäden erkennen. Wohl aber fehlten an den Nadeln kranker Fichten häufig die Stöpsel aus Wachsgeflecht, welche normalerweise die in die Epidermis eingesenkten Stomata bedecken. Der frühzeitige Verlust dieser transpirations- und benetzungshemmenden Wachspfropfen war dort besonders groß, wo vermehrt Pilzhypfen auf der Cuticula auftraten.

Röntgenemissionsspektroskopische Untersuchungen in Verbindung mit rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen von repräsentativen Nadeln (Standort „Luchsplatz“, untere Teile und Nordseite der Krone; 4-jährige Nadeln; Probenahme im März 1982) zeigten bei gesunden Fichten eine ausgeprägte Akkumulation von Calcium an der Nadeloberfläche in der unmittelbaren Umgebung der Stomata (Abb. 1). Diese Anreicherung war bei den Nadeln erkrankter Bäume weniger ausgeprägt (Abb. 2). Die Kalium-Verteilung in der Umgebung der Stomata erwies sich als durch die Erkrankung nicht verändert. Dieses Zurücktreten des Calciums bei gleichzeitig ausreichender Kaliumversorgung mag die normalen Stomata-Funktionen behindern. Leider reichte die Empfindlichkeit der Röntgen-

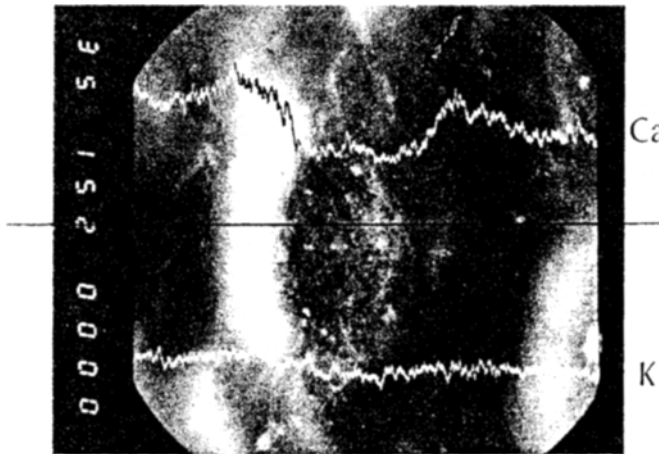


Abb. 1. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Spaltöffnung einer gesunden Nadel und Verteilung von Calcium und Kalium entlang einer Meßebeine (= schwarzer Strich), nachgewiesen durch Röntgenemissionsspektroskopie

Fig. 1. SEM photograph of a particular stomate of a healthy needle, and Ca and K distribution along a transect (= black bar) as determined by electron microprobe analysis

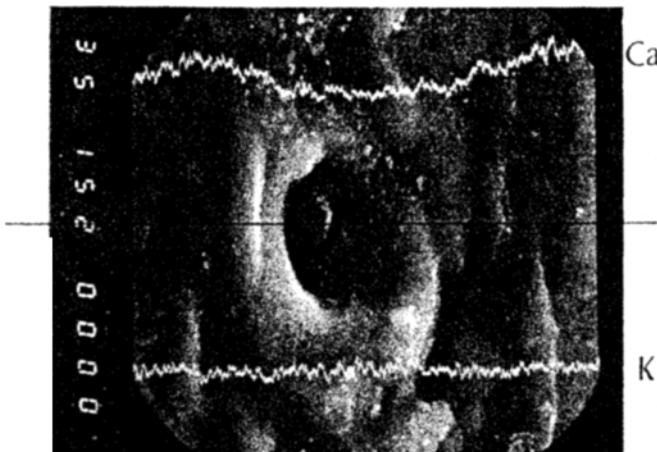


Abb. 2. Calcium- und Kaliumverteilung entlang einer Meßebeine durch die Spaltöffnung einer erkrankten, chlorotischen Nadel (Anmerkungen wie Abb. 1)

Fig. 2. Ca and K distribution along a transect crossing a particular stomate of a diseased, chlorotic needle (for comments see fig. 1)

0 10 20  $\mu$



0 20 40  $\mu$

Abb. 3. Gipskristalle auf der Oberfläche einer Fichtennadel; REM - Aufnahme

Fig. 3. Gypsum crystals at the surface of a spruce needle; SEM photograph



0 10 20  $\mu$

Abb. 4. Gipskristalle in der Spaltöffnung einer gesunden, grünen Fichtennadel; REM - Aufnahme

Fig. 4. Gypsum crystals in the antestomatal cavity of a healthy and green spruce needle; SEM photograph

emissionsspektroskopie nicht aus, um auch Magnesium auf und in den Nadeln zu lokalisieren.

Bei den Arbeiten mit dem Rasterelektronenmikroskop entdeckten wir an Nadeln, die im März 1982 eingeholt wurden, Gipskristalle auf den Nadeloberflächen, und zwar bevorzugt in den Stomatahöhlungen und in der Umgebung der Spaltöffnungen (Abb. 3 u. 4). Sie treten vermutlich nur bei besonderen Witterungsbedingungen auf, lösen sich und verschwinden wieder bei kräftigen Niederschlägen. Diese Gipskristalle waren viel zahlreicher auf den grünen und relativ Ca-reichen Nadeln gesunder Bäume als auf vergleichbaren Blattorganen erkrankter Fichten.

Die Nadeln gesunder Altlichten (Probestand Luchsplatzl; 7. Wirtel; Nadelalter 1–5 Jahre) enthielten im November 1981 unabhängig von ihrem Alter gewöhnlich weniger Stärke, aber mehr Raffinose als vergleichbare Nadeln von erkrankten Bäumen. Diese signifikante Verschiebung im Stärke/Raffinose-Verhältnis (Abb. 5) läßt auf geringere Frosthärte der Nadeln bei befallenen Bäumen zum Untersuchungszeitpunkt schließen (KANDLER u. a. 1979; VOGL u. a. 1972; RANFT u. a. 1979).

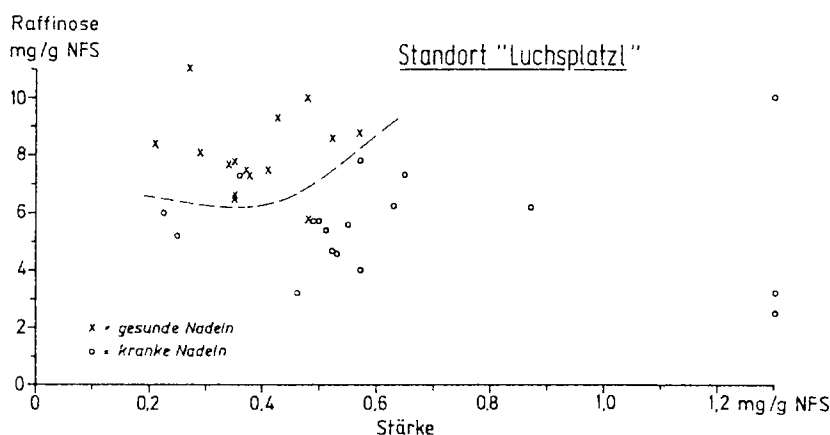


Abb. 5. Streudiagramm der Raffinose- und Stärkegehalte in den Nadeln gesunder und kranker Fichten  
Fig. 5. Scatter diagram of raffinose vs. starch contents in the needles of healthy and diseased spruce trees

#### 4 Ergebnisse der Bodenanalysen

Die Podsol-Braunerden beider Versuchsflächen sind auffallend humos und zeichnen sich durch hohe Stickstoff- und Phosphorgehalte aus (Tab. 6). Die für die Höhenlage engen C/N- und C/P-Quotienten sowie die günstigen Humusformen (biologisch aktiver, feinhumusreicher, lockerer Moder und Rohhumus) sprechen für regen Streuumsatz und intensive N- und P-Mineralisation; dies erklärt die reichliche Versorgung aller Fichten mit beiden Nährstoffen. Die Bodenreaktion ist sauer; die pH-Werte variieren indessen in jenem Bereich, der seit langem als charakteristisch für Böden in den Hochlagen des Bayerischen Waldes gilt (vgl. REHFUESS 1969; DBG 1975). Die Ausstattung mit Gesamt-Kalium, -Calcium und -Magnesium hängt vom Muttergestein ab und ist für die untersuchten Bodenformen ganz verschieden (Tab. 7). Die aus dem armen Dreissessel-Granit hervorgegangene Podsol-Braunerde weist minimale Gehalte beider Elemente auf, besitzt dafür aber außergewöhnlich viel Kalium. Die Herkunft der Podsol-Braunerde Luchsplatzl aus einem dunklen, biotitreichen Paragneis spiegelt sich in hohen Gehalten an  $\text{Ca}_t$  und  $\text{Mg}_t$  wider, die sicher



Tabelle 6

Gehalte an organischem Kohlenstoff, Gesamt-Stickstoff und -Phosphor  
in repräsentativen Bodenformen

Contents of organic carbon, total nitrogen and phosphorus in representative soils

Standort Bodentorm	Horizont	Tiefe cm	C <sub>org</sub>	N <sub>t</sub> mg/g	P <sub>t</sub>	C <sub>org</sub> /N <sub>t</sub>	C <sub>org</sub> /P <sub>t</sub>
<i>Luchsplatztz (C<sub>3</sub>)</i>							
Podsol-Braun- erde aus	OF	9- 2	505	21,0	1,49	24	339
	OH	2- 0	468	20,3	1,64	23	285
Paragneis	A <sub>eh</sub>	0-10	120	7,7	1,88	16	64
	A <sub>h</sub> B <sub>v</sub>	10-21	62	3,6	1,34	17	46
	B <sub>v</sub>	21-41	42	1,9	0,98	22	43
	II B <sub>v</sub>	41-68	29	1,2	0,81	24	36
	C <sub>v</sub> B <sub>v</sub>	68-94	12	0,5	0,83	24	14
<i>Dreisessel (A<sub>1</sub>)</i>							
Podsol-Braun- erde aus	OF	7- 3	462	20,3	1,15	23	402
	OH	3- 0	312	15,1	1,24	21	252
Granit	A <sub>eh</sub>	0-28	72	3,5	1,34	21	54
	(Go)A <sub>h</sub> B <sub>v</sub>	28-49	42	1,9	1,17	22	36
	B <sub>v</sub>	49-	7	0,4	1,04	20	7

Tabelle 7

## Reaktion und Gehalte an Gesamt-Kalium, -Calcium und -Magnesium repräsentativer Bodenformen

Reaction and contents of total potassium, calcium and magnesium in representative soils

Standort Bodentorm	Horizont	pH		K <sub>t</sub>	Ca <sub>t</sub> mg/g	Mg <sub>t</sub>	C <sub>org</sub> /Ca <sub>t</sub>	C <sub>org</sub> /Mg <sub>t</sub>
		H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub>					
<i>Luchsplatztz (C<sub>3</sub>)</i>								
Podsol- Braunerde aus Paragneis	OF	4,38	3,45	1,6	0,58	0,27	871	1870
	OH	4,15	3,40	1,8	0,91	0,37	514	1265
	A <sub>eh</sub>	4,37	3,70	13,1	5,53	3,05	22	39
	A <sub>h</sub> B <sub>v</sub>	4,35	3,95	15,4	5,56	3,48	11	18
	B <sub>v</sub>	4,42	4,15	16,0	6,78	3,50	6	12
	II B <sub>v</sub>	4,57	4,35	17,2	7,18	7,63	4	4
	C <sub>v</sub> B <sub>v</sub>	4,67	4,60	19,2	8,50	9,13	1	1
<i>Dreisessel (A<sub>1</sub>)</i>								
Podsol- Braunerde aus Granit	OF	4,45	3,70	3,0	1,88	0,54	246	856
	OH	4,13	3,25	15,1	1,52	0,56	205	557
	A <sub>eh</sub>	4,46	4,35	28,0	0,79	0,76	91	95
	(Go)A <sub>h</sub> B <sub>v</sub>	4,60	4,25	30,0	1,04	1,00	40	42
	B <sub>v</sub>	4,76	4,45	35,0	2,01	1,33	4	5

<sup>1</sup> Abweichungen der Analysenwerte von früher veröffentlichten Daten für Profil C<sub>3</sub> beruhen auf Wiederholung an Parallelproben

auch mit großen Vorräten an nachlieferbarem Calcium und Magnesium einhergehen. Der 1975 mit gleichen Methoden untersuchte Hochlagen-Podsol am Lusen (Tab. 9, DBG 1975) war erheblich saurer und mit Ca<sub>t</sub> und Mg<sub>t</sub> schlechter ausgestattet als die Bodenform Luchsplatztz; dennoch waren die aufstockenden Fichten damals völlig gesund.

Die Gehalte an austauschbarem Calcium und Magnesium sowie die Basensättigung sind

Tabelle 8

Kationen-Austauschigenschaften repräsentativer Boden  
Cation exchange properties of representative soils

Standort Bodenform	Horizont	KAK eff.	Ca	Mg	K mmol	Na IA/100g	Al	H	V %
Luchsplatzl (C <sub>3</sub> ) Pods.-Braunerde aus Paragneis	OF	27,57	1,72	0,92	1,73	0,26	17,79	4,44	17
	OH	46,66	1,16	0,66	0,64	0,11	40,43	2,10	6
	A <sub>eh</sub>	16,29	0,41	0,31	0,21	0,06	14,52	0,14	6
	A <sub>h</sub> B <sub>v</sub>	10,35	0,28	0,11	0,08	0,01	9,70	-	5
	B <sub>v</sub>	8,72	0,24	0,09	0,10	0,06	7,82	0,29	6
	II B <sub>v</sub>	6,97	0,15	0,03	0,06	0,01	5,79	0,91	4
	C <sub>v</sub> B <sub>v</sub>	3,80	0,10	0,05	0,08	0,02	2,63	0,91	7
Dreissessel (A <sub>1</sub> ) Pods.-Braunerde aus Granit	OF	25,83	6,44	2,63	3,64	-	1,67	7,72	49
	OH	22,15	2,25	0,80	0,10	-	11,79	7,15	14
	A <sub>eh</sub>	9,43	0,18	<0,01	0,15	0,01	8,21	0,74	4
	(GO)A <sub>h</sub> B <sub>v</sub>	6,87	0,41	0,03	0,07	0,01	6,22	0,10	8
	B <sub>v</sub>	3,86	0,14	<0,01	0,05	0,01	3,66	-	5

Fe<sub>a</sub> in OF u. OH 0,7-1,6; im Mineralboden <0,6 mmol IÄ - Mn<sub>a</sub> in OF u. OH <0,1-2,7;  
im Mineralboden <0,1 mmol IÄ

Tabelle 9

Allgemeine bodenchemische Kenndaten des Hochlagen-Podsols B 4 aus Granithangschutt;  
Nationalpark Bayerischer Wald; 1230 m; unter Fichte (DBG 1975)  
General chemical characteristics of the podzol B 4 (at high altitudes) derived from granitic slope  
deposits in the National Park „Bayerischer Wald“; 1230 m; under a spruce stand (DBG 1975)

Horizont	Tiefe cm	pH (KCl)	C <sub>t</sub>	N <sub>t</sub>	C/N	Ca <sub>t</sub>	Mg <sub>t</sub>	C/Ca	C/Mg
			mg/g			mg/g			
OF	4- 2	2,6	504	17,6	29	2,0	0,4	252	1260
OH	2- 0	2,2	466	19,0	25	2,1	0,5	222	932
A <sub>e</sub>	1- 5	3,0	33	1,5	22	3,3	0,6	10	55
B <sub>sh</sub>	5-10	3,4	49	2,2	22	3,3	0,8	15	61
B <sub>hsv1</sub>	10-20	3,6	54	2,4	23	3,9	1,8	14	30
C <sub>v</sub>	<30	4,3	9	0,4	23	5,7	3,6	2	3

in den Mineralbodenhorizonten in Übereinstimmung mit der sauren Reaktion gering; dafür liegen die Gehalte an Austausch-Aluminium sehr hoch (Tab. 8). Die Kationenaustausch-Charakteristika unterscheiden sich aber nicht grundsätzlich von den Verhältnissen, wie sie schon früher im Lusengebiet angetroffen wurden (DBG 1975). Im Auflagehumus beider untersuchten Böden sind Austausch- Ca, -Mg und -K angereichert.

## 5 Folgerungen

Aus diesen Beobachtungen und Analyseergebnissen leiten wir eine Arbeitshypothese ab, welche die aktuelle Erkrankung der Fichte in den höheren Lagen des Bayerischen Waldes erklärt. Sie gilt nur, sofern keine Wurzelpathogene oder abiotische Wurzelschädigung als primäre Schadensursachen auftreten; solche sind bislang nicht nachgewiesen.

Sowohl die gesunden als auch die erkrankten Fichten sind ausgezeichnet mit Stickstoff und Phosphor ernährt und mit Kalium ausreichend versorgt. Dieser Befund weist darauf hin, daß die befallenen Bäume nicht unter einer drastisch verminderten Aufnahmekapazität ihrer Wurzelsysteme im Verhältnis zur Nadelmasse leiden, jedenfalls nicht am Beginn der Erkrankung.

Die Untersuchung lieferte für unser Gebiet bisher keine Hinweise, daß Schwermetall- oder Aluminiumvergiftung vorliegt. Zu demselben Ergebnis kamen auch ZÖTTL und MIES (1983) für den Südschwarzwald, ZECH und POPP (1983) für Oberfranken sowie PRINZ u. a. (1982) für Schwarzwald und Eggegebirge.

Die auffallende Goldspitzigkeit älterer Fichtennadeln vor allem an der Oberseite der Zweige und an stark belichteten Kronenteilen ist eindeutig auf Magnesiummangel bei gleichzeitig schwacher Versorgung mit Calcium zurückzuführen. Dieser Mg-Mangel tritt an den älteren Nadeln ausgeprägt u. a. deshalb auf, weil der Baum in einer solchen Situation den alternden Geweben viel Magnesium entzieht, um damit die jüngsten Triebe besser zu versorgen. Die Symptome werden durch intensive Einstrahlung verstärkt, da der Abbau des Chlorophylls durch Photooxidation beschleunigt ist. Die erkrankten Nadeln scheinen nicht mehr in der Lage zu sein, das photolabile Chlorophyll hinreichend zu stabilisieren, und seine Neusynthese ist durch Mg-Mangel behindert.

Die ungenügende Ernährung mit Magnesium und Calcium tritt auch auf Böden auf, die mit beiden Elementen gut ausgestattet sind (Gesamtgehalte) und diese durch Verwitterung wohl ausreichend nachliefern. Die Erschöpfung der Bodenvorräte dürfte deshalb kein entscheidender Faktor sein. Wohl aber wird gesteinsbedingte Armut der Böden an Magnesium und Calcium den Mangel ebenso verstärken wie fortschreitende Basenverarmung.

Mg-Mangel und knappe Ca-Versorgung der Fichten in unserem Untersuchungsgebiet lassen sich am besten erklären durch ein beschleunigtes Herauslösen (Leaching) beider Elemente aus den Nadeln. Dieser Vorgang kann auf verschiedene Weise durch Säuredeposition aus der Atmosphäre gefördert sein:

- $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  lösen sich in Wasserfilmen auf den Nadeln und in den Zellwänden und bilden dabei – gegebenenfalls nach Oxidation – Schwefelsäure. Ihre Protonen verdrängen zunächst Metallkationen von den Bindungsplätzen in den Zellwänden; später werden Ionen auch aus dem Symplasten herausgelöst.
- Diese Extraktion wird vermutlich auch durch Schwefel- und Salpetersäure vorangetrieben, welche mit dem Niederschlag auf die Nadeln gelangen (vgl. die Auswaschungsexperimente von HORNTVEDT 1979; HORNTVEDT u. a. 1980; PRINZ u. a. 1982; TUKEY 1970). Nebelniederschlag weist gewöhnlich besonders hohe Säurekonzentrationen auf.
- Die Abgabe von Metallsulfaten aus den Nadeln könnte auch veranlaßt sein durch erhöhte Sulfat-Aufnahme aus dem Boden als Folge der gesteigerten atmosphärischen Sulfat-Deposition. Die von der Pflanze aus den Blättern ausgeschiedenen Sulfat-Anionen würden in diesem Fall aus Gründen der Elektroneutralität von Metall-Kationen in äquivalenten Mengen begleitet.

Ein solches Auswaschen von Magnesium und Calcium aus den Nadeln wird wahrscheinlich begünstigt durch Membranschäden in den Zellen, wie sie hervorgerufen werden durch das Einwirken von

- Schwefeldioxid (vgl. JÄGER u. KLEIN 1980),
- Photooxidantien; so fanden PRINZ u. a. 1982, daß die Auswaschung von Magnesium aus Fichtennadeln durch künstlichen sauren Regen (pH 3) erheblich anstieg, wenn die Zweige zuvor mehrwöchig mit Ozon begast worden waren, und
- Frost (vgl. TUKEY 1970, BERINGER u. TROLLDENIER 1978).

Der Magnesiummangel an Fichte ist in den Hochlagen wahrscheinlich deshalb so ausgeprägt, weil dort das Herauslösen von Mg und Ca durch Nebel- und Wolkenhäufigkeit gefördert wird und gleichzeitig an Strahlungstagen hohe Ozon-Konzentrationen auftreten können (PRINZ u. a. 1982). Er wird außerdem verstärkt durch den Umstand, daß die nasse

und die trockene Deposition hier viel Stickstoff und Schwefel, aber nur wenig Calcium und Magnesium in die Ökosysteme eintragen (auf einer Waldlichtung bei Bodenmais in 950 m Höhe ü. NN 1980/81 in kg/ha: a 20 N; 19 SO<sub>4</sub>-S; 1 Mg; 5 Ca; 0,5 H<sup>+</sup>; pH 4,4; DUNKL 1982).

Schwierig zu erklären ist das Verhalten des Kaliums, denn dieses Element sollte von Auswaschungsprozessen aus den Nadeln wohl am stärksten betroffen sein (TUKEY 1970). In unseren Probebeständen wiesen die erkrankten Bäume aber keine deutlich reduzierten K-Spiegel in ihren Nadeln auf. Da die fraglichen Böden sehr reich an Kalium sind, wird dieses Nährelement wahrscheinlich durch vermehrte Aufnahme rasch über die Wurzeln nachgeführt (vgl. TUKEY 1970; HORNTVEDT 1979). Dagegen ist der Nachschub von Magnesium und Calcium offensichtlich nicht effizient genug, um die erhöhten Verluste aus den Nadeln auszugleichen. Dies könnte teilweise auf einer spezifischen Beeinträchtigung der Mg-(Ca-)Aufnahme in Gegenwart von viel löslichem Aluminium beruhen (GRIMME 1982; EVERS 1982 pers. Mitt.). Das Überwiegen von Al an den Oberflächen der Kationenaustauscher ist allerdings kein neuartiges Phänomen, sondern für saure Hochlagen-Böden schon seit langem typisch (vgl. DBG 1979)!

Die unzureichende Versorgung der Fichte mit Mg und Ca sollte besonders ausgeprägt sein auf Böden, die aus erdalkaliarmen Gesteinen (z. B. Granite, Buntsandstein, bestimmte metamorphe Schiefer) hervorgegangen sind, auf stark podsolierten und skelettreichen Bodenformen sowie auf Substraten, welche der Fichte nur eine flache Bewurzelung in einem blockigen Hangschutt erlauben (vgl. ZÖRRL u. MIES 1983). Sie wird verstärkt durch das Auswaschen beider Nährstoffe aus den obersten Bodenhorizonten als Folge hoher, atmo-gener Säuredeposition dort, wo dieser Säureeintrag mengenmäßig relevant ist (vgl. ABRAHAMSEN 1980; REHFUESS 1981).

Der Magnesiummangel der Fichte bei gleichzeitig schlechter Ernährung mit Calcium könnte bewirken

- eine Beeinträchtigung des Quellungszustands in den Zellen und der Membranstrukturen durch erweiterte K/Ca- und K/Mg-Relationen.
- eine Störung der Photosynthese auch durch Reduktion der Nadelmasse,
- Einbußen im Wurzelsystem, ausgelöst durch eine schwächere Versorgung mit Kohlenhydraten aus dem Sproß,
- erhöhte Anfälligkeit gegen Blatt- und Wurzelparasiten und
- verminderte Kälteresistenz vor allem der älteren, Mg- und K-armen, photosynthetisch weniger effizienten Nadeljahrgänge. Frosthärte und Austriebsverhalten variieren jedoch innerhalb einer Fichtenpopulation erheblich von Baum zu Baum, gesteuert auch durch genetische Faktoren.

Für eine Verbindung zwischen Erkrankung und Kälteresistenz gibt es analytische Hinweise (Abb. 5). Wir nehmen deshalb an, daß plötzliche, extreme Temperaturstürze nach warmen Perioden der Frostenthärtung im zeitigen Frühjahr oder im Winter die Chlorosen intensivieren, vorzeitigen Tod der Nadeln und Bäume herbeiführen oder über Membranschäden das Herauslösen von Metallen aus den Blättern weiter fördern (BERINGER u. TROLLENIER 1978). Nach TUKEY (1970) kann man allgemein davon ausgehen, daß von ungünstigen Witterungsereignissen, Ernährungsstörungen oder sonstigen physiologischen Schwächen betroffene Blattoorgane empfindlicher gegenüber Auswaschungsprozessen sind als jene von gesunden kräftigen Pflanzen.

Für ein Mitwirken von Frostereignissen in dem Ursachen- und Ablaufgefüge „Säuredeposition/Membranschäden durch Photooxidantien (z. B. Ozon)/Herauslösen von Metallen aus den Nadeln (v. a. durch saure Nebelniederschläge)/Photooxidation“ sprechen auch:

- der rasche Vorstoß von Kaltluftmassen nach Süddeutschland nach vorhergehenden warmen Phasen im April 1980 und 1981 ebenso wie in der Nacht vom 31. 12. 1978 auf 1. 1. 1979,
- die Beobachtungen von KLIMO (1979), daß in einem mährischen Fichtenbestand nach dem Temperatursturz in der Silvesternacht 1978/79 das Schütten von Nadeln im Zeit-

- raum April – Juni 1979 auf 1500 kg Trockenmasse je Hektar stieg verglichen mit 550 bzw. 750 kg/ha in den beiden Vorjahren, und
- die grundsätzliche Übereinstimmung vieler Symptome der Fichtenerkrankung in den Hochlagen des Bayerischen Waldes mit jenen einer Spätfrostschädigung im April 1981 an Sitkafichten-Pflanzungen in Westschottland (REDFERN 1982, pers. Mitt.).
- Die vermutete Mitwirkung von Advektionsfrösten würde die extreme individuelle Variation im Schädigungsgrad der Fichten auf unseren Probestellen ebenso erklären wie den plötzlichen Ausbruch der Erkrankung in den Jahren 1980 und 1981.

### Zusammenfassung

In den höheren Lagen des Bayerischen Waldes oberhalb etwa 1000 m über NN tritt in Fichtenbeständen aller Altersklassen extremer Magnesiummangel auf. Er geht einher mit niedrigen Calcium-Gehalten in den Nadeln, mit vorzüglicher Stickstoff- und Phosphorer-nährung sowie mit ausreichender Kaliumversorgung. Die erkrankten Bäume zeigen typische Mangel-Symptome (Goldspitzigkeit), vorzeitiges Schütten älterer Nadeln, reduzierten Volumenzuwachs und sterben teilweise rasch ab. Die befallenen Bestände wachsen auf Podsol-Braunerden und Podsolen aus Granit- und Gneishangschutt, die sich in ihren Gehalten an Gesamt- Magnesium und -Calcium unterscheiden. Vieles spricht dafür, daß Säuredeposition aus der Atmosphäre an dieser Erkrankung mitwirkt, indem sie Magnesium und Calcium aus den Nadeln und aus den Böden beschleunigt auswäscht. Die Extraktion aus den Nadeln wird vermutlich gefördert durch episodische Ozon- oder Frostschäden an Cuticulae und Zellmembranen. Der Magnesiummangel setzt möglicherweise die Frosthärte der Fichtennadeln herab. Es gibt keine Anhaltspunkte dafür, daß toxische Effekte von Schwermetallen die Erkrankung hervorrufen.

### Summary

*On the Norway spruce (Picea abies Karst.) decline at high altitudes of the Bavarian Forest (Bayerischer Wald)*

Extreme magnesium deficiency was observed in stands of Norway spruce (*Picea abies* Karst.) growing at high altitudes (>1000 m) in the Bavarian Forest irrespective of stand age. It is associated with low calcium contents of the needles, but with excellent nitrogen and phosphorus nutrition and adequate potassium supply. The trees affected exhibit typical deficiency symptoms, premature shedding of older needles, and growth depressions. The stands grow on acid to podzolic brown forest soils and podzols derived from granite and gneiss slope deposits, which differ considerably in the contents of total and exchangeable magnesium and calcium.

There is evidence that acid deposition from the atmosphere may contribute to these growth disturbances; it adds nitrogen to the ecosystem but may leach out magnesium and calcium from needles and soils. The leaching from the foliage is presumably accelerated by episodic ozone or frost damage to cuticles and cell membranes. The magnesium deficiency seems to lead to decreased frost hardiness of the spruce needles. There is no indication that toxic effects of heavy metals may be causing the disease.

### Danksagung

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprojektes B 38 der Bayerischen Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt durchgeführt und durch die Bayerische Staatsforstverwaltung finanziert. Den beteiligten Forstämtern verdanken wir umfangreiche technische Hilfe (Forstamt Bodenmais: FD. SPONSEL, FOR KLARHAUSER, FAM REITMAYER; Forstamt

Neureichenau: FD HENSELER). Prof. DITTRICH vom Botanischen Institut der Universität München ließ die Kohlenhydratanalysen für uns durchführen. Dr. WÖRNER von der Robert Bosch GmbH, Stuttgart, stellte die Einrichtungen für Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenemissionsspektroskopie zur Verfügung. Wir danken herzlich für diese vielseitige und großzügige finanzielle und technische Unterstützung.

### Literatur

- ABRAHAMSEN, G., 1980: Acid precipitation, plant nutrients and forest growth. Proc. Intern. Conference on Ecological Impact of Acid Precipitation, Sandefjord, Norway, 58–63.
- BERINGER, H.; TROLLDENIER, 1978: Influence of K nutrition on the response to environmental stress. Potash Institute, Bern, 139–222.
- VAN DEN BURG, J., 1979: Calcium status of Corsican pine (*Pinus nigra* ssp. *laricio*) and top-dying. Rapport Nr. 212 Rijksinstituut „De Dorschkamp“ Wageningen.
- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 1975: Exkursionsführer zur Jahrestagung 1975 in Regensburg. Mitt. DBG 21.
- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 1979: Führer zu den Exkursionen anlässlich der Jahrestagung in Freiburg/Brsg. DBG – Mitt. Bd. 28.
- DUNKL, J., 1982: Der Stoffeintrag mit dem Freiland- und Bestandesniederschlag an drei Stationen in verschiedenen Waldgebieten Bayerns. Dipl. Arbeit Univ. München.
- ELLING, W., ET AL., 1976: Nationalpark Bayerischer Wald. Klima und Böden, Bayer. Staatsmin. f. Ern., Landw. u. Forsten.
- GRIMME, H.: The effect of Al on Mg uptake and yield of oats. Proc. 9th Intern. Plant Nutrition Coll. Warwick, 1, 198–203.
- HORNTVEDT, R., 1979: Leaching of chemical substances from tree crowns by artificial rain. Mitt. IUFRO Tagung S. 2.09 „Luftverunreinigung“. Ljubljana 1978, 115–125.
- HORNTVEDT, R.; DOLLARD, G. J.; JORANGER, E., 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.
- JACOBSON, J. S., 1980: The influence of rainfall composition on the yield and quality of agricultural crops. In: *Drablos, D.*, and *Tollan, A.* (eds.), Ecological Impact of acid precipitation, 41–46.
- JÄGER, H. J.; KLEIN, H., 1980: Biochemical and physiological effects of SO<sub>2</sub> on plants. Angew. Botanik 54, 337–348.
- KANDLER, O.; DOVER, C.; ZIEGLER, P., 1979: Kälteresistenz der Fichte. I. Steuerung von Kälteresistenz, Kohlenhydrat- und Proteinstoffwechsel durch Photoperiode und Temperatur. Ber. Deutsch. Bot. Ges. 92, 225–241.
- KASBERGER, G., 1982: Schaftaufbau, Wachstumsgang und Kronenstrukturmerkmale wuchsgeschädigter Fichten im FA. Bodenmais. Dipl. Arbeit Universität München.
- KLIMO, E., 1979: Nutrient cycling within the ecosystems of a man-made spruce forest. Proc. Symp. „Stability of spruce forest eco-systems“, Brno 1979 (ed. K. Klimo).
- 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.
- PRINZ, B.; KRAUSE, H. M.; STRATMANN, H., 1982: Vorläufiger Bericht der Landesanstalt für Immissionschutz über Untersuchungen zur Aufklärung der Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland. LIS-Berichte 28.
- RANFT, H., ET AL., 1979: Untersuchungen zum Zusammenwirken von Immissions- und Frosteinfluß im Fichten-Rauchschadgebiet. Beitr. f. d. Forstwirtsch. 4, 160–165.
- REHFUESS, K. E., 1969: Ernährungszustand und Kernfäulebefall älterer Fichtenbestände auf der Schwäbischen Alb. Mitt. Verein Forstl. Standortskunde u. Forstpflanzenzüchtung 19, 6.
- REHFUESS, K. E., 1969: Der Ernährungszustand süddeutscher Tannenbestände (*Abies alba* Mill.) in Abhängigkeit von den Nährelementvorräten im Boden. Forstwiss. Centralbl. 88, 359–372.
- REHFUESS, K. E., 1973: Kernfäulebefall und Ernährungszustand älterer Fichtenbestände (*Picea abies* Karst.) im Wuchsgebiet „Baar-Wutach“. Mitt. Verein Forstl. Standortskunde u. Forstpflanzenzüchtung 22.
- REHFUESS, K. E., 1981: Über die Wirkungen der sauren Niederschläge in Waldökosystemen. Forstwiss. Centralbl. 100, 353–400.
- REHFUESS, K. E.; MOLL, W., 1965: Orientierende Untersuchungen über den Ernährungszustand von Fichtenbeständen auf Jungmoräne in Oberschwaben. Allgem. Forst- u. Jagdztg. 136, 211–223.
- STREBFL, O., 1960: Mineralstoffernährung und Wuchseistung von Fichtenbeständen in Bayern. Forstwiss. Centralbl. 79, 17–42.
- TUKEY, H. B., 1970: The leaching of substances from plants. Annual Review of Plant Physiology 21, 305–324.
- VOGL, M., et al., 1972: Untersuchungen zur individuellen Rauch- und Frostresistenz von Fichten aus

- einem Schadgebiet im oberen Erzgebirge. Archiv Pflanzensch. 8, 233-243.
- ZECH, W.; POPP, E., 1983: Magnesiummangel, einer der Gründe für das Fichten- und Tannensterben in NO-Bayern. Forstwiss. Centralbl. 102, 50-55.
- ZÖTTL, H. W.; MIES, E., 1983: Die Fichtenerkrankung in den Hochlagen des Südschwarzwaldes. Allgem. Forst- u. Jagdztg., i. Dr.

*Anschrift der Verfasser:* cand. forest C. BOSCH, Dipl.-Biol. E. PFANNKUCH, Dr. U. BAUM und Prof. Dr. K. E. REHFESS, Lehrstuhl für Bodenkunde, Amalienstr. 52, D-8000 München 40.

## Möglichkeiten der Anreicherung von Schwefelsäure in Baumkronen

VON E. TEUCHERT UND INGRID TEUCHERT

### Unzulänglichkeit statistisch gemittelter Immissionsraten

Ein Überblick über den derzeitigen Kenntnisstand zu den Vorgängen des Baumsterbens ergibt sich durch das Symposium „Saurer Regen – Waldschäden“ (1). Bei den bisher bekannten Untersuchungen zur Klärung der Schädigungsvorgänge werden relativ einfache Annahmen über die Deposition der Schadstoffe auf den Bäumen zugrunde gelegt. Insbesondere werden für die Eintragung der Schadstoffe jeweils mittlere Werte angesetzt, wie sie sich aus langzeitigen Meßreihen ergeben. Diesem Vorgehen steht gegenüber, daß die Schädigung der Bäume seit wenigen Jahren nahezu sprunghaft eskaliert, während die mittlere Schadstoffimmission kontinuierlich nun eine mäßige jährliche Zunahme aufweist. Es ist bekannt, daß die mittlere SO<sub>2</sub>-Emission bereits seit mehreren Jahren stagniert (2). Hieraus ergibt sich der Hinweis, daß zwischen der mittleren Schadstoffeinwirkung und der Schädigung offensichtlich kein linearer Zusammenhang besteht.

Im biologischen Bereich ist bekannt, daß Schädigungen normalerweise erst oberhalb gewisser Schwellwerte der Schadstoffeinwirkungen stattfinden. Bei derartigen Schwellreaktionen hat ein Mittelwert über eine zeitlich variable Schadstoffeinwirkung keine Relevanz für das Maß der Schädigung. Indessen werden die Schädigungen durch die Belastungsspitzen bedingt, und in den Zeitintervallen zwischen Belastungsspitzen werden bisweilen sogar Ausheilungseffekte beobachtet.

Bei der Eintragung von Schadstoffen auf Baumkronen treten Belastungsspitzen in zweierlei Hinsicht auf. Einmal in den direkten Einwirkungen aus der Atmosphäre in Tautropfen und Regen. Diese sind sehr starken zeitlichen Schwankungen unterworfen, und sie können im Laufe des Verdunstungsvorganges zum Aufbau einer beträchtlichen Anreicherung führen. Zum anderen in der Akkumulierung der Schadstoffe über längere Zeitperioden. Diese kann zur Eintragung beträchtlicher Mengen führen, sie unterliegt aber auch anderweitigen Einflüssen, die einen Abbau bewirken.

Im Folgenden werden einige Situationen erläutert, in welchen die Baumkronen bzw. Blätter und Nadeln besonderen Belastungsspitzen speziell durch Schwefelsäure ausgesetzt sind. SO<sub>2</sub> und die chemischen Folgeprodukte haben mengenmäßig den größten Anteil im Spektrum der Schadstoffe, und es ist zu vermuten, daß in den Zeitpunkten der Spitzenbelastung sogar die direkte ätzende Wirkung der Schwefelsäure am Schädigungsprozeß be-