

# Diagnostische Düngungsversuche zur Revitalisierung geschädigter Fichtenbestände (*Picea abies* Karst.) in Südwestdeutschland

Von R. F. HÜTTL und S. FINK

## 1 Einführung und Problemstellung

Zur kausalen Charakterisierung der „neuartigen“ Waldschäden werden häufig anthropogen bedingte Streßfaktoren wie die Luftverunreinigungen und deren Folgeprodukte benannt. Diese können direkt über das Assimilationsgewebe der Waldbäume oder indirekt über den Boden wirken. Daneben haben weitere abiotische sowie biotische Stressoren wesentlichen Einfluß auf den Gesundheitszustand der Waldbestände. Aus dem Blickwinkel der Waldernährung ist eine optimale Ernährung Grundlage für größtmögliche Resistenz gegen von außen auf das Ökosystem Wald einwirkende Negativeinflüsse.

Eine Reihe wissenschaftlicher Untersuchungen haben auf einen Zusammenhang zwischen Waldschäden und Ernährungsstörungen hingewiesen (ZECH u. POPP 1983; BOSCH et al. 1983; REHFELSS 1983; ZÖTTL u. MIES 1983; BUCHNER u. ISERMANN 1984; EVERS 1984; ZÖTTL u. HÜTTL 1985; HÜTTL 1985a; HÜTTL u. ZÖTTL 1985).

Das Herstellen einer möglichst guten Nährelementversorgung durch Düngung soll der Belastung von Waldökosystemen durch Luftschadstoffe entgegenwirken (KLINK et al. 1983; RANET 1982; MATERNA 1962). Dabei geht man davon aus, daß Bäume, die an Nährelementmangel leiden, nach entsprechender Nährelementzufuhr versuchen werden, ihren Ernährungszustand durch verstärkte Aufnahme zu verbessern.

Eine breit angelegte Untersuchung des Ernährungszustandes von Nadelbaumbeständen in Südwestdeutschland (HÜTTL 1985b) zeigte ein vor allem nach Ausgangsgestein und Schädigungsgrad differenziertes Bild. Die häufig mangelhafte Nährelementversorgung war Anlaß für ein umfangreiches Programm diagnostischer Düngungsversuche. Basierend auf Nadelanalyseergebnissen wurden in leicht bis mäßig geschädigten Beständen auf 40 verschiedenen Standorten gezielt Mineraldünger auf Boden und/oder Blatt appliziert, um eine Verbesserung des Nährelementangebots zu erzielen. Im folgenden werden vorläufige Ergebnisse von 3 ausgewählten Düngungsversuchen im Untersuchungsgebiet vorgestellt und diskutiert.

Da nach FINK (1983) und PARAMESWARAN et al. (1985) die Schädigungen sich auch in deutlichen histologischen Veränderungen in den Nadeln widerspiegeln, sollte dabei zudem geklärt werden, inwieweit Regenerationserscheinungen der Bäume nach Düngung ebenfalls auf dieser mikroskopischen Ebene erkennbar sein könnten.

## 2 Material und Methoden

Je Bestand wurden von mindestens 7, in der Regel jedoch 10 repräsentativen Bäumen der herrschenden soziologischen Klassen jeweils im Herbst unter anderem die jüngsten Triebe des 1. Quirls geerntet und aus aliquoten Anteilen Mischproben hergestellt. Der Schädigungsstatus der Nadeln wurde protokollarisch vor Ort festgehalten. Dabei zeigte sich, daß die Nadeln des 1. Quirls immer grün waren und keine Nadelverluste aufwiesen.

Nach Aufbereitung der Nadeln (1. Trocknung 24 Std. bei 70° C; 2. Homogenisierung im Star-Mix; 3. Trocknung 24 Std. bei 105° C) wurde Gesamt-N nach Kjeldahl, P kolorimetrisch

am PL-4 (Phosphor-Blau-Methode/Phosphat-Molybdat-Komplex nach Jackson) und alle übrigen untersuchten Elemente (K, Ca, Mg, Mn, Zn, Fe, Al) nach Aufschluß im Büchi-Digestor ( $\text{HNO}_3$ -HCl-Aufschluß bei  $500^\circ\text{C}$  bzw.  $300^\circ\text{C}$ ) via Atomabsorptionsspektrometrie bestimmt.

Vor der Applikation (Frühjahr 1984) rasch aufnehmbare Düngemittel wurden auf den zur Düngung und als Kontrolle vorgesehenen Flächeneinheiten je nach Flächengröße 5–15 Bodenproben in zwei Bodentiefen (0–10, 20–30 cm) diagonal über die Fläche verteilt gezogen und zu Mischproben vermengt. Zudem wurden im Versuch Staufen 2 ein Jahr nach der Düngung (Frühjahr 1985) auf je 3 Düngungs- und Kontrollparzellen Bodenproben nach derselben Methode gezogen. Nach der Aufbereitung der Proben (Trocknung, Sieben < 2 mm) wurden die austauschbaren Kationen durch Extraktion mit  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -Lösung bestimmt (methodische Einzelheiten siehe TRÜBY u. ALDINGER 1984). Die Bestimmung von K, Mg, Ca, Fe und Mn erfolgte mittels Atomabsorptionsspektrometrie. Al und H wurden mit NaOH titriert und potentiometrisch mit dem METROHM-Titroprozessor ermittelt. Der pH-Wert des Bodens wurde in  $\text{CaCl}_2$  gemessen (Glaselektrode). Die C-Bestimmung erfolgte konduktometrisch an gemörserten Proben nach trockener Veraschung im Sauerstoffstrom in einer Wösthoff-Apparatur. Die N-Bestimmung (Gesamt-N) wurde nach Kjeldahl vorgenommen. Die P-Bodengehalte wurden mit Hilfe der Zitronensäureextraktion (1 %) bestimmt. Des Weiteren wurde eine Körnungsanalyse (Pipettenmethode) durchgeführt.

Die licht- und elektronenmikroskopische Untersuchung der Nadeln erfolgte in gleicher Weise wie bereits früher beschrieben (PARAMESWARAN et al. 1985).

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Diagnostischer Düngungsversuch Staufen 2

Im Forstbezirk Staufen wurde eine 8- bis 12jährige Fichtenkultur auf Gneissolifluktionsschutt (saure Braunerde) beprobt. Der Standort ist gemäß der Standortskartierung als saurer, mäßig frischer, lehmig, grusiger Flachhang einzustufen. Er liegt in 920 m über NN und weist NW-Exposition auf. Der mittlere jährliche Niederschlag beträgt etwa 1500 mm.

Phänotypisch zeigte der Bestand im Herbst 1983 typische Mg-Mangelsymptome (Goldspitzigkeit der älteren Nadeln). Zusätzlich waren verschiedene Bäume durch chlorotische Nadelverfärbungen aller Nadeln bei geringer Wüchsigkeit gekennzeichnet, was auf N-Mangel hinweist.

Der Ernährungszustand im Herbst 1983 zeigte neben mangelhafter Mg-Ernährung auch niedrige N-Werte, hingegen ausgezeichnete Versorgung mit P und gute K-Gehalte. Der Ca-Gehalt war ausreichend, der Zn-Wert gut (Tab. 1). Die Bodendaten vom Frühjahr 1984 stehen im Einklang mit den nadelanalytischen Ergebnissen (Tab. 2), denn die Bodenanalyse weist neben sehr geringen Gehalten der Kationenbasen (besonders Mg) auf die antagonistische Beeinflussung der Mg-Verfügbarkeit durch die hohe Al-Konzentration hin (Mg:Al-Verhältnis).

Im Mai 1984 wurden auf 3 Düngungspartellen verschiedene magnesiumbetonte Düngungen durchgeführt (Tab. 1). Auf allen 3 Partellen waren die Fichten im Herbst 1984 optisch revitalisiert. Die Kontrollpartellen hatten sich weiter verschlechtert. Der gute Eindruck der gedüngten Fichten wurde durch die Resultate der Nadelanalyse eindrucksvoll bestätigt. Bei allen Düngungsvarianten konnte sowohl die N- als auch die Mg-Versorgung über die Mangelgrenze gehoben werden (Tab. 1). Dort, wo Ca appliziert wurde, stiegen die Ca-Gehalte deutlich an. Die P- und K-Werte sind als optimal anzusehen. Interessant sind die meist höheren Zn-Werte der gedüngten Bäume.

Eine zweite nadelanalytische Untersuchung der Düngungs- und Kontrollpartellen im Herbst 1985 bestätigte die Ergebnisse vom Herbst 1984 und belegt bereits eine gewisse anhaltende Restabilisierung der gedüngten Fichten. Diese Aussage wird untermauert durch die Daten der Bodenuntersuchung, die 1 Jahr nach der Düngung durchgeführt wurde (Tab. 3). Bei der

Tabelle 1. Diagnostischer Düngungsversuch zu 8- bis 12jähriger Fichte: Staufen 2. Nadelanalysedaten von Düngungs-(V) und Kontrollparzellen (O) vor und nach der Düngung (Herbst 1983 und 1984 bzw. 1985). Düngerapplikation im Frühjahr 1984

Table 1. Diagnostic fertilisation trial in 8 to 12-yr-old Norway spruce: Staufen 2. Needle analysis data of fertilised (V) and control (O) plots before and after fertilisation (autumn 1983, 1984, and 1985). Fertiliser application in spring 1984

Probenahme	Parzelle	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Fe	Al
		mg g <sup>-1</sup> T.S.								
		<13,0	<1,1	<4,0	<2,0	<0,70	<20	<13	<17	-) <sup>1</sup>
1983	Gesamtfläche	12,7	2,3	6,1	3,4	0,57	509	33	43	170
1984	O <sub>1</sub>	14,3	1,9	10,0	3,0	0,53	540	32	50	120
1985		14,5	1,8	7,0	3,4	0,53	710	32	51	155
1984	V <sub>1</sub> <sup>2</sup>	17,5	2,0	9,1	4,2	0,75	630	41	54	135
1985		16,5	1,8	6,6	4,4	0,82	530	35	55	180
1984	O <sub>2</sub>	13,1	2,3	10,9	3,4	0,55	660	33	40	100
1985		12,6	2,5	8,8	3,2	0,60	680	33	63	140
1984	V <sub>2</sub> <sup>3</sup>	16,2	2,1	11,4	5,1	0,92	640	44	50	125
1985		17,3	2,8	9,3	4,7	0,86	630	41	78	190
1984	O <sub>3</sub>	10,0	1,6	8,8	2,9	0,54	360	23	34	115
1985		11,3	1,8	5,8	2,8	0,38	430	25	53	145
1984	V <sub>3</sub> <sup>4</sup>	14,5	1,7	8,2	2,8	0,75	510	27	50	125
1985		15,0	1,9	6,8	3,5	0,87	500	34	84	175

<sup>1</sup> Mangelbereich  
<sup>2</sup> Versuchsdünger I (3 % N als NO<sub>3</sub>-N, 11 % K<sub>2</sub>O als K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 18 % MgO als MgSO<sub>4</sub>, 13 % CaO als CaCO<sub>3</sub>), 1500 kg ha<sup>-1</sup>; Kalksalpeter, 650 kg ha<sup>-1</sup>.  
<sup>3</sup> Versuchsdünger II (12 % K<sub>2</sub>O als K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 18 % MgO als MgSO<sub>4</sub>, 7 % CaO als CaCO<sub>3</sub>), 1500 kg ha<sup>-1</sup>; Kalksalpeter, 650 kg ha<sup>-1</sup>.  
<sup>4</sup> Magnesiumnitrat, ca. 150 g pro Baum.

Interpretation dieser Daten ist das jeweilige Düngemittelverfahren zu berücksichtigen; denn die Bodenproben wurden zur Vermeidung von größeren Wurzelschäden jeweils in der Mitte zwischen den Pflanzenreihen gezogen. Erwartungsgemäß zeigt demnach die Flächendüngung (V<sub>2</sub>) die deutlichsten Veränderungen. Deutlich erhöht ist die Ca-, Mg- und K-Sättigung des obersten Mineralbodens (0–10 cm) bei gleichzeitig deutlicher Reduktion der H<sup>+</sup>- und Al<sup>3+</sup>-Anteile an den Austauschern. Merklich angestiegen ist in 20–30 cm Bodentiefe neben der

Tabelle 2. Diagnostischer Düngungsversuch Staufen 2: Chemischer Bodenzustand und Körnung in verschiedenen Bodentiefen (Beprobung im Frühjahr 1984)

Table 2. Diagnostic fertilisation trial Staufen 2: Soil chemical properties and texture at different soil depths (sampling in spring 1984)

Elementgehalt	0–10 cm	20–30 cm	Parameter	0–10 cm	20–30 cm
K <sup>+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	2,9	1,4	pH (CaCl <sub>2</sub> )	3,8	4,0
Ca <sup>2+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	4,4	2,0	K/Ca (mol)	1,318	1,400
Mg <sup>2+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	1,3	0,6	Mg/Al (mol)	0,032	0,024
Mn <sup>2+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	0,3	0,2	Ca/Al (mol)	0,108	0,080
Fe <sup>2+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	0,1	0,1	Basensätt. (%)	10,4	8,6
Al <sup>3+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	61,1	37,5			
H <sup>+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	12,8	3,9			
C (mg g <sup>-1</sup> )	66,3	38,5	S (%)	48,4	48,4
N (mg g <sup>-1</sup> )	4,1	2,7	U (%)	27,6	27,9
P (ug g <sup>-1</sup> )	80	71	T (%)	24,0	23,7

Ca-Sättigung vor allem die Mg-Konzentration. Allerdings läßt sich hier noch keine Abnahme bei  $H^+$  und  $Al^{3+}$  feststellen. Aufgrund der Zunahme des Mg-Gehaltes ist auch für diese Bodentiefe das Mg:Al-Verhältnis deutlich besser als auf der Kontrollparzelle. Dadurch sollte die Mg-Aufnahme durch die Wurzel begünstigt werden. Ähnliches gilt auch für Ca. Was für die reine Flächendüngung dargelegt wurde, läßt sich in geringerem Maße auch bei der Kombinationsdüngung ( $V_1$ ) erkennen (Tab. 3). Keine düngungsspezifischen Veränderungen des Bodenchemismus sind erwartungsgemäß bei der reinen Einzelbaumdüngung ( $V_1$ ) festzustellen. Betrachtet man die Bodenanalysedaten der 3 Kontrollparzellen, so fällt auf, daß die Variation der Elementkonzentrationen im obersten Mineralboden (0–10 cm) größer ist als in 20–30 cm Bodentiefe. Zur chemischen Charakterisierung des Standorts ist also dieser Bodentiefenbereich besonders gut geeignet, wengleich ein wesentlicher Anteil der Feinwurzelmasse im Mineralboden von 0–20 cm anzutreffen ist.

Tabella 3. Diagnostischer Düngungsversuch Staufen 2: Gehalt austauschbarer Kationen in verschiedenen Bodentiefen von Düngungs- (V) und Kontrollparzellen (O) vor und nach der Düngung (Frühjahr 1984 und 1985)

Table 3. Diagnostic fertilisation trial Staufen 2: Content of exchangeable cations at different soil depths of fertilised (V) and control (O) plots before and after fertilisation (spring 1984 and 1985)

Parzelle (Probenahme)	Bodentiefe cm	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	H <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>
		uval g <sup>-1</sup>						
(1984)								
Gesamtfläche	0–10	2,87	4,44	1,34	0,28	0,13	12,78	61,09
	20–30	1,36	1,95	0,55	0,16	<0,05	8,87	37,54
(1985)								
O <sub>1</sub>	0–10	3,96	5,46	2,13	0,37	0,29	15,90	62,35
	20–30	1,59	1,49	0,67	0,14	<0,05	9,98	40,64
V <sub>1</sub> <sup>1</sup>	0–10	4,37	9,77	4,35	0,60	0,31	12,50	51,03
	20–30	1,87	1,71	0,89	0,15	<0,05	7,61	32,73
O <sub>2</sub>	0–10	2,83	4,34	1,77	0,27	0,19	14,59	56,45
	20–30	1,29	0,94	0,57	0,15	<0,05	8,53	32,35
V <sub>2</sub> <sup>2</sup>	0–10	7,83	76,22	9,31	0,57	<0,05	5,27	10,09
	20–30	1,55	1,67	3,34	0,19	<0,05	8,39	32,03
O <sub>3</sub>	0–10	3,81	5,84	2,06	0,29	0,24	13,41	57,36
	20–30	1,67	1,50	0,58	0,15	<0,05	8,62	41,84
V <sub>3</sub> <sup>3</sup>	0–10	4,83	5,49	2,73	0,32	n.b.	17,63	64,87
	20–30	1,54	1,42	0,81	0,16	n.b.	8,11	47,80

<sup>1</sup> 80 % der Düngermengen als Einzelbaumdüngung, 20 % der Düngermengen als Flächendüngung.  
<sup>2</sup> Flächendüngung.  
<sup>3</sup> Einzelbaumdüngung.

Auf einer weiteren Versuchsparzelle sollte geprüft werden, ob die Mg-Aufnahme bei gleichzeitiger Applikation von  $NO_3$  als „Kationenschlepper“ im Vergleich zur Mg-Düngung in Sulfatform begünstigt wird (vergl. PFAFF u. BUCHNER 1958). Die Daten in Tabelle 4 zeigen, daß sich aus den Versuchen in Staufen eine solche Annahme nicht bestätigen läßt. Denn auch die Applikation von Magnesiumsulfat bewirkte innerhalb einer Vegetationsperiode eine deutliche Verbesserung des Mg-Ernährungszustandes. Die Nitratvariante führte wie erwartet bei den schwach mit N ernährten Fichten zu erhöhten N-Spiegelwerten.

Analog zu dem bereits makroskopisch erkennbaren verbesserten Gesundheitszustand der gedüngten Bäume ließen sich auch mikroskopisch entsprechende Regenerationsvorgänge in ursprünglich vergilbten und nach Düngung wiederergrünten Nadeln nachweisen. Gegenüber einem intakten Leitbündel einer gesunden Nadel mit funktionsfähigen, offenen Siebzellen im

Tabelle 4. Diagnostischer Düngungsversuch zu 8- bis 12jähriger Fichte: Staufen 2. Nadelanalysedaten von Düngungs- und Kontrollparzellen (Herbst 1984)

Table 4. Diagnostic fertilisation trial in 8-to 12-yr-old Norway spruce: Staufen 2. Needle analysis data of fertilised and control plots (autumn 1984)

Element	Kontrollparzelle 3	Düngungsparzelle 3 <sup>1</sup>	Kontrollparzelle 4	Düngungsparzelle 4 <sup>2</sup>
mg g <sup>-1</sup> T.S.				
N	10,0	14,5	11,8	10,9
P	1,6	1,7	1,9	2,4
K	8,8	8,2	10,3	10,8
Ca	2,9	2,8	3,4	3,8
Mg	0,54	0,72	0,64	1,00
ug g <sup>-1</sup> T.S.				
Mn	360	510	680	880
Zn	23	27	30	42
Fe	34	50	36	40
Al	115	125	120	130

<sup>1</sup> Magnesiumnitrat, ca. 150 g pro Baum.  
<sup>2</sup> Kieserit (MgSO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O; 27 % MgO), ca. 150 g pro Baum.

Phloem (Abb. 1) zeigt sich bei den vergilbten Nadeln ein oft vollständiger Kollaps der Siebzellen mit Hypertrophie bei Strasburger-Zellen und Kambialzellen (Abb. 2). Bei den wiederergrünten Nadeln erwiesen sich diese zwar gestörten, aber noch lebenden und teilungsfähigen Kambialzellen nun offensichtlich in der Lage, sich wiederholt zu teilen (Abb. 3) und schließlich wieder funktionsfähige Siebzellen auszudifferenzieren (Abb. 4). In einem solchen regenerierten Leitbündel deuten dann noch die Bereiche des alten, kollabierten Phloems mit einigen hypertrophierten Strasburger-Zellen darin auf die ursprüngliche Schädigung hin (Abb. 4).

Auch die Chloroplasten zeigen sich zu einer gewissen Regeneration fähig. Während in den vergilbten Nadeln die Chloroplasten deformiert erscheinen, mit deutlicher Desorganisation der Thylakoidmembranen, zahlreichen Plastoglobuli und zum Teil großen Stärkekörnern (Abb. 5), zeichnen sich die wiederergrünten Nadeln durch eine weitgehend reguläre Struktur der Chloroplasten aus, mit weniger Stärke, aber auch noch einem erhöhten Vorkommen von Plastoglobuli (Abb. 6).

### 3.2 Diagnostischer Düngungsversuch Dischingen 1b

Nadelanalysen von Fichtenbeständen der Wuchsgebiete Schwäbische Alb und Südwestdeutsches Alpenvorland wiesen als neuen Befund häufig K-Unterversorgung nach (ZOTTI u. HÜTTL 1985). So zeigten auch 1983 beprobte, 41jährige Fichten auf frischem Kalkverwitterungslehm der Weißjuraformation (Parabraunerde-Pseudogley) im Thurn-und-Taxischen Forstbezirk Dischingen (530 m über NN, ca. 700 mm Niederschlag/Jahr) typische K-Mangelsymptome (zitronengelbe Verfärbung besonders der älteren Nadeljahrgänge, teilweise auch Rotspitzigkeit; vergl. BAULE u. FRICKER 1967). Die Nadelanalyse bestätigt den K-Mangel bei sonst gutem bis sehr gutem Ernährungszustand (Tab. 5). Ebenso ist der Wert für austauschbares K<sup>+</sup> im Boden niedrig (Tab. 6). Desweiteren dürfte die K-Aufnahme aufgrund des sehr ungünstigen K:Ca-Verhältnisses (K/Ca-Antagonismus) behindert sein.

Aufgrund der Mangelsituation wurde im Frühjahr 1984 rasch lösliches Kalimagnesia (270 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>) ausgebracht. Die Düngung bewirkte innerhalb einer Vegetationsperiode ein Ergreifen der Fichten. Der K-Gehalt der Nadeln hatte am Ende der 2. Vegetationsperiode nach der Düngung auf der Düngungsparzelle den Bereich guter Versorgung erreicht (Tab. 5). Vermutlich aufgrund der günstigeren Witterungsbedingungen (Vegetationsperiode 1984 und 1985 jeweils höhere Niederschläge als 1983) hatten sich auch bei den Kontrollbäumen die K-Spiegel leicht

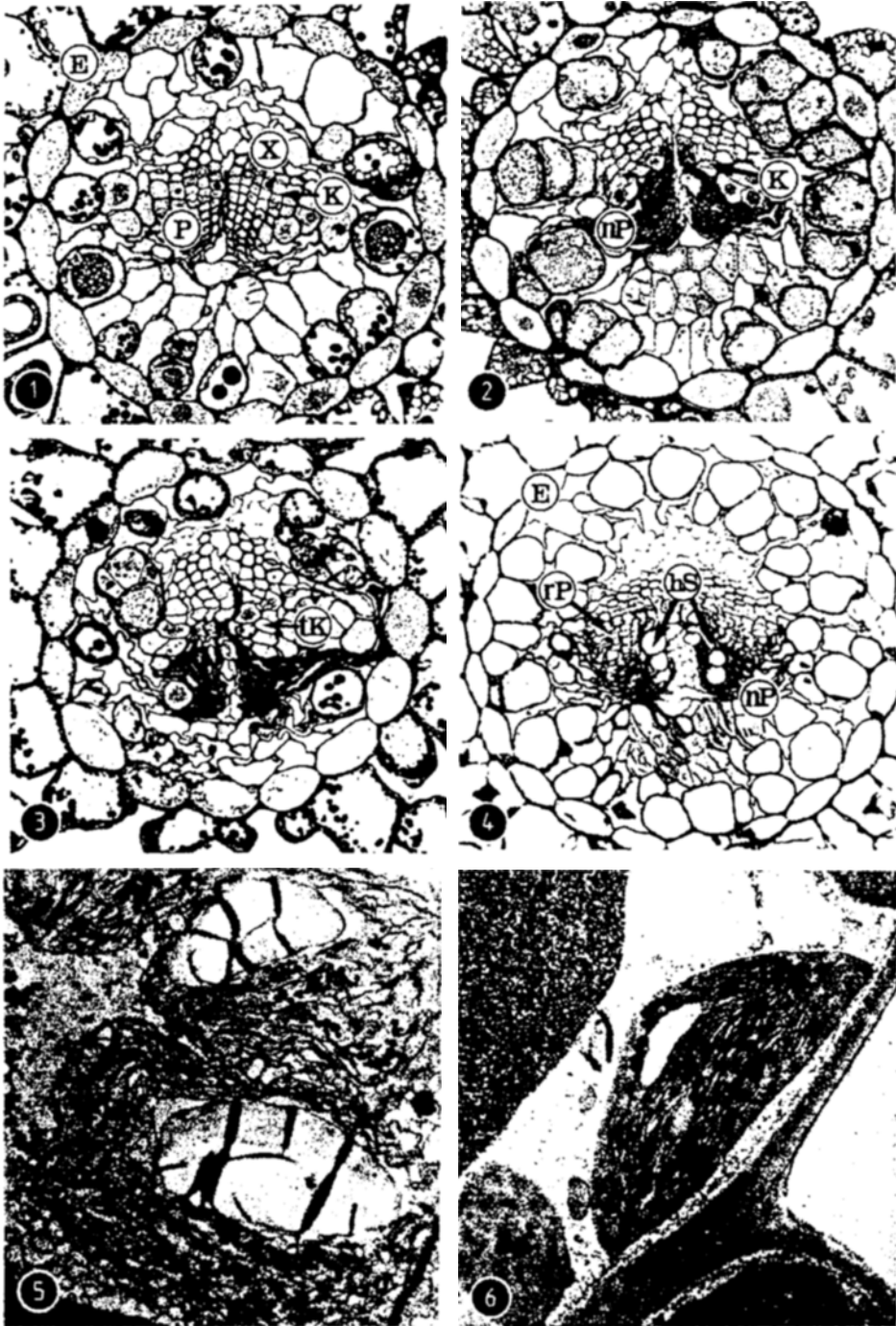


Abb. 1. Zentrales Leitbündel einer 2-jährigen grünen Fichtennadel. E - Endodermis, X - Xylem, K - Kambium, P - Phloem. X 250

Fig. 1. Central vascular bundle of a 2-yr-old green Norway spruce needle. E - Endodermis, X - Xylem, K - Cambium, P - Phloem. X 250

erhöht, liegen aber noch immer im Bereich schwacher Versorgung. Dies wird auch deutlich, betrachtet man die K-Gehalte der verschiedenen alten Nadeln des 4. Quirls (Tab. 5; vergl. HÜTTL 1985b). Obwohl durch die Kalimagnesiagabe auch etwa 90 kg MgO ha<sup>-1</sup> appliziert worden waren, konnte der ohnehin sehr gute Mg-Versorgungsgrad der Fichten nicht gesteigert werden.

Die Nadelgehalte für N, P, Ca und Mg sind 1985 auf beiden Parzellen als gut bis sehr gut einzustufen. Die jahresweisen Fluktuationen der Elementgehalte (Herbst 1983 und Herbst 1985) sind hier sehr gering (vergl. EVERS 1972). Interessant ist das Ansteigen der Mn- und Zn-Spiegel auf der Düngungsparzelle im Vergleich zur Kontrolle.

### 3.3 Diagnostischer Düngungsversuch Immendingen 7

Abschließend sei die Düngung eines Fichtenjungbestandes im Forstbezirk Immendingen (südwestliche Donaualb) vorgestellt. Die 23jährigen Fichten stocken auf mäßig trockenem bis mäßig frischem Mergelton auf braunem Jura (Rendzina). Der nach S flach geneigte Standort liegt 750 m über NN und erhält jährlich 700 mm Niederschlag. Im Herbst 1983 fiel die hell- bis ockergelbe Verfärbung der jüngsten Nadeln auf. Zudem wurden schwach ausgebildete Höhentriebe und geringe Nadellängen beobachtet.

Die Nadelanalyse ergab eine schwache N-Ernährung und extremen Mn-Mangel (Tab. 7; vergl. KREUTZER 1972) bei guter K-, Ca- und Zn-Ernährung. Ebenfalls als schwach war die P- und Mg-Versorgung einzustufen. Der akute Mn-Mangel ist hier eng mit dem chemischen Bodenzustand verknüpft, der bei hohem pH-Wert und hohem Redoxpotential eine starke Festlegung von Mn verursacht (Tab. 8).

Durch Anwendung von Mn-Chelat als Blattdünger konnte der Mn-Mangel korrigiert werden, was sich auch im Verschwinden der Mn-Mangelsymptome zeigte (Tab. 7).

---

*Abb. 2.* Leitbündel einer 2jährigen vergilbten Fichtennadel mit nekrotischem Phloem (nP), aber noch intaktem Kambium (K). X 240

*Fig. 2.* Vascular bundle of a 2-yr-old yellowed Norway spruce needle with necrotic phloem (nP), but still functional cambium (K). X 240

*Abb. 3.* Leitbündel einer 2jährigen Fichtennadel im Stadium der Regeneration nach Düngung mit sich erneut teilendem Kambium (tK). X 210

*Fig. 3.* Vascular bundle of a 2-yr-old Norway spruce needle in the process of regeneration after fertilisation with newly differentiating cambium (tK). X 210

*Abb. 4.* Leitbündel einer 3jährigen Fichtennadel nach Wiederergrünung infolge Düngung. Im Anschluß an das nekrotische Phloem (nP) hat sich neues Phloem durch Kambiumtätigkeit regeneriert (rP); erkennbar sind noch hypertrophierte Strasburger-Zellen (hS) im geschädigten älteren Phloem. Zur besseren Sichtbarmachung der Zellwände wurde in diesem Schnitt der Zellinhalt entfernt. X 180

*Fig. 4.* Vascular bundle of a 3-yr-old Norway spruce needle after regreening due to fertilisation. Adjacent to the necrotic phloem (nP), new phloem was regenerated by cambium activity (rP); still visible are hypertrophic Strasburger cells (hS) in the damaged older phloem. For better visibility of the cell walls the cell content has been removed in this section. X 180

*Abb. 5.* Desorganisierte Chloroplasten mit großen Stärkekörnern und zahlreichen Plastoglobuli im Mesophyll einer vergilbten 3jährigen Fichtennadel. X 21.000

*Fig. 5.* Disorganized chloroplasts with starch grains and numerous plastoglobuli in the mesophyll of a yellowed 3-yr-old Norway spruce needle. X 21.000

*Abb. 6.* Weitgehend normal erscheinender Chloroplast mit kleinem Stärkeeinschluß, aber ebenfalls zahlreichen Plastoglobuli, im Mesophyll einer 3jährigen, nach Düngung wiederergrüneten Fichtennadel. X 19.000

*Fig. 6.* Largely normal appearing chloroplast with small starch enclosure, but also numerous plastoglobuli, in the mesophyll of a 3-yr-old, after fertilisation regreened Norway spruce needle. X 19.000

**Tabelle 5. Diagnostischer Düngungsversuch zu 41-jähriger Fichte: Dischingen lb. Nadelanalysedaten von Düngungs- und Kontrollparzelle vor und nach der Düngung (Herbst 1983 und 1985). Düngerapplikation im Frühjahr 1984**

*Table 5. Diagnostic fertilisation trial in 41-yr-old Norway spruce: Dischingen lb. Needle analysis data of fertilised and control plot before and after fertilisation (autumn 1983 and 1985). Fertiliser application in spring 1984*

Elementgehalte	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Fe	Al
	mg g <sup>-1</sup> T.S.					ug g <sup>-1</sup> T.S.			
Kontrollparzelle Herbst 1983 1. Quirl	14,1	1,5	3,7	7,3	1,4	900	26	42	40
Kontrollparzelle Herbst 1985 1. Quirl	14,5	1,4	4,5	5,9	1,3	900	33	46	35
4. Quirl (1984)	14,5	1,2	6,0	7,2	1,1	1030	36	45	25
(1983)	13,5	1,0	6,8	9,4	0,9	1430	35	54	45
(1982)	12,0	1,1	5,3	11,3	0,8	1670	33	60	55
	11,1	1,0	4,3	11,0	0,8	1490	26	64	40
Düngungsparzelle <sup>1</sup> Herbst 1985 1. Quirl	14,8	1,4	6,5	6,9	1,3	1270	45	45	40
4. Quirl (1984)	14,5	1,2	8,3	7,8	1,2	1380	46	45	25
(1983)	13,0	0,9	8,4	8,0	0,9	1640	40	64	45
(1982)	12,2	0,9	6,2	10,1	0,8	1920	34	63	45
	10,8	0,8	5,3	9,2	0,7	1510	26	58	50

<sup>1</sup> Kalmagnesia (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · MgSO<sub>4</sub>; 30 % K<sub>2</sub>O, 10 % MgO), 900 kg ha<sup>-1</sup>.

**Tabelle 6. Diagnostischer Düngungsversuch Dischingen lb: Chemischer Bodenzustand und Körnung in verschiedenen Bodentiefen (Beprobung im Frühjahr 1984)**

*Table 6. Diagnostic fertilisation trial Dischingen lb: Soil chemical properties and texture at different soil depths (sampling in spring 1984)*

Elementgehalt	0-10 cm	20-30 cm	Parameter	0-10 cm	20-30 cm
K <sup>+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	2,3	1,3	pH (CaCl <sub>2</sub> )	3,9	5,0
Ca <sup>2+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	94,3	83,3	K/Ca (mol)	0,049	0,031
Mg <sup>2+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	8,0	9,0	Mg/Al (mol)	0,976	∞
Mn <sup>2+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	1,9	0,2	Ca/Al (mol)	11,5	∞
Fe <sup>2+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	0,3	0	Basensätt. (%)	81,6	96,4
Al <sup>3+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	12,3	0			
H <sup>+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	8,0	3,4			
C (mg g <sup>-1</sup> )	51,6	9,4	S (%)	24,6	21,8
N (mg g <sup>-1</sup> )	2,9	0,6	U (%)	52,1	52,7
P (ug g <sup>-1</sup> )	35	26	T (%)	23,3	25,5

#### 4 Folgerungen

Die hier vorgestellten und weitere eigene Ergebnisse (ZÖTTL u. HÜTTEL 1986; HÜTTEL 1985a; HÜTTEL 1985b) sowie Befunde anderer Autoren (z. B. ZECH u. POPP 1983; PRINZ et al. 1984; ISERMANN 1985; KAUPENJOHANN et al. 1985) zeigen, daß dort, wo die „neuartigen“ Waldschäden mit Ernährungsstörungen einhergehen, die spezifische Zufuhr von Nährstoffen, basierend auf der genauen Kenntnis des Ernährungszustandes (Blattanalyse, Bodenanalyse, Symptomansprache)



Tabelle 7. Diagnostischer Düngungsversuch zu 23jähriger Fichte: Immendingen 7. Nadelanalysedaten von Düngungs- und Kontrollparzelle (Herbst 1984). Düngerapplikation im Frühjahr 1984

Table 7. Diagnostic fertilisation trial in 23-yr-old Norway spruce: Immendingen 7. Needle analysis data of fertilised and control plot (autumn 1984). Fertiliser application in spring 1984

Element	Kontrollparzelle	Düngungsparzelle
mg g <sup>-1</sup> T.S.		
N	10,1	10,5
P	1,2	1,2
K	8,3	8,9
Ca	6,8	6,3
Mg	0,67	0,71
ug g <sup>-1</sup> T.S.		
Mn	3	20
Zn	28	31
Fe	24	24
Al	< 50	< 50

Mn-Chelat, 7 %ige Lösung; Blattapplikation.

Tabelle 8. Diagnostischer Düngungsversuch Immendingen 7: Chemischer Bodenzustand und Körnung in verschiedenen Bodentiefen (Beprobung im Frühjahr 1984)

Table 8. Diagnostic fertilisation trial Immendingen 7: Soil chemical properties and texture at different soil depths (sampling in spring 1984)

Elementgehalt	0-10 cm	20-30 cm	Parameter	0-10 cm	20-30 cm
K <sup>+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	0,41	0,20	pH (CaCl <sub>2</sub> )	7,3	7,4
Ca <sup>2+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	46,21	45,56	K/Ca (mol)	0,318	0,009
Mg <sup>2+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	0,58	0,44	Mg/Al (mol)	∞	∞
Mn <sup>2+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	0,006	0,006	Ca/Al (mol)	∞	∞
Fe <sup>2+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	0,02	0,02	Basensätt. (%)	(100)	(100)
Al <sup>3+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	0	0			
H <sup>+</sup> (uval g <sup>-1</sup> )	0	0			
C (mg g <sup>-1</sup> )	121,2	147,7	S (%)	16,6	14,6
N (mg g <sup>-1</sup> )	3,2	5,1	U (%)	65,5	67,6
P (ug g <sup>-1</sup> )	5	8	T (%)	18,9	17,8

die Mangelsymptome zum Verschwinden bringt und die Schäden erheblich mildert. Nur bei sehr kranken Bäumen bzw. Beständen scheint dies nicht mehr möglich.

Auch auf histologischer Ebene konnte eine solche Regenerationsfähigkeit mäßig vergilbter Nadeln nachgewiesen werden. Hierbei scheint es von Bedeutung, daß die Mesohyllzellen selbst bei stärkerer Vergilbung zwar eine Desorganisation der Organellen zeigen, aber noch lange lebend bleiben und nicht nekrotisch werden (PARAMESWARAN et al. 1985), so daß bei günstigerer Nährstoffversorgung offensichtlich eine teilweise Reorganisation möglich wird. Die einzigen bei der Vergilbung tatsächlich kollabierenden Zellen sind die Siebzellen im Leitbündel, die jedoch von lebend gebliebenen Kambialzellen durch Neubildungen ersetzt werden können. Dieser spezifische Phloemkollaps scheint im übrigen eine direkte Folge des Mg-Mangels zu sein, wie an Bäumen in Mg-Mangelversuchen nachgewiesen werden konnte (FINK 1987), so daß die Wiedererholung nach Düngung verständlich erscheint.

Die rasche Aufnahme der gedüngten Nährelemente und die schnelle Verbesserung des Ernährungszustandes sind Indizien dafür, daß die Funktionalität des Wurzelsystems der Versuchsbäume nicht wesentlich gestört sein kann. Gleiches dürfte für den Mykorrhizabesatz gelten (vergl. ZÖRTL 1985).

Es sei betont, daß die beschriebenen Düngungsversuche in erster Linie eine diagnostische Zielsetzung verfolgten. Ob und in welchem Umfang die Düngung von geschädigten Waldbeständen mit Ernährungsstörungen zu einer langfristigen Revitalisierung führt, ist anhand dieser vorläufigen Ergebnisse noch nicht zu sagen. Hier wird die Weiterführung der Untersuchungen in den folgenden Jahren Aufschluß geben.

### Danksagung

Für die finanzielle und technische Unterstützung dieser Arbeit danken wir dem BMFT und der Landesforstverwaltung (MELUF) in Baden-Württemberg.

### Zusammenfassung

Nadelanalytische Untersuchungen im südwestdeutschen Raum ergaben verbreitete Nährelementmängel. Aufgrund dieser Befunde wurden an 40 Standorten diagnostische Düngungsversuche angelegt. Vor der Applikation von rasch löslichen Boden- und Blattdüngemitteln im Frühjahr 1984 wurden Bodenproben gezogen. In fast allen Fällen hatte die Gabe der in den Nadeln der Versuchsbäume nicht ausreichend vorhandenen Nährelemente bereits nach einer Vegetationsperiode eine deutliche Verbesserung des äußeren Erscheinungsbildes bewirkt. Die Nadelanalysergebnisse der Beprobung vom Herbst 1984 und 1985 bestätigten diesen Befund. Erste Untersuchungen des chemischen Bodenzustandes ein Jahr nach der Düngung ergaben je nach Düngemittel eine Erhöhung des Anteils basischer Kationen (Ca, Mg, K) bei gleichzeitiger Reduktion von H und Al an den Austauschern.

Mikroskopische Untersuchungen der Nadeln konnten auch auf histologischer Ebene eine Regenerationsfähigkeit mäßig vergilbter Nadeln nach Düngung aufzeigen.

Demnach lassen sich die mit Ernährungsstörungen verbundenen Waldschäden durch Verbesserung der Nährelementversorgung (basierend auf Daten der Blattanalyse, Bodenanalyse und Symptomsprache) beheben oder wenigstens mildern. Ziel muß dabei eine möglichst ausgewogene Ernährung sein. Dies macht die Beachtung bestimmter Antagonismen bei der Nährelementaufnahme nötig. Schließlich hat sich gezeigt, daß nach Erreichen eines gewissen Schadgrades eine Revitalisierung durch Düngung nicht mehr möglich ist.

### Summary

#### *Diagnostic fertilisation trials for revitalisation of declining Norway spruce stands (Picea abies Karst.) in southwest Germany*

Needle analytical investigations in southwest Germany indicated widely spread nutrient deficiencies. Due to these findings diagnostic fertilisation trials were established at 40 sites. Prior to the application of fast soluble soil and foliar fertilisers, soil samples were taken in spring 1984. In almost all cases, specific application of nutrients not sufficiently supplied in the needles of the trial trees led to a pronounced improvement of the visual appearance over just one growing season. Needle analysis results of samples taken in autumn 1984 and 1985 proved these observations. First investigations of the soil chemical properties one year after fertilisation revealed - in relation to the applied fertiliser - an increase of exchangeable basic cations (Ca, Mg, K) and simultaneously a reduction of H and Al at the exchange sites.

Furthermore, microscopic investigations of needles indicated the regeneration potential at the histological level for moderately yellowed needles after fertilisation. Thus, forest damages associated with nutritional disturbances can be eliminated or at least alleviated by improving the nutrient supply (based on data of foliar analysis, soil analysis and symptomatology), aiming at a well balanced nutrition. To reach this aim, specific antagonisms for nutrient uptake have to be considered. Finally, it has been found that once a certain degree of decline has been reached revitalisation via fertilisation is not possible any more.

### Literatur

- BAULE, H.; FRICKER, C., 1967: Die Düngung von Waldbäumen.  
 BOSCH, C.; PEANNRUCH, 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.  
 BUCHNER, A.; ISERMANN, K., 1984: Wie sind Waldschadensursachen aus der Sicht der Pflanzenernährung zu beurteilen? Allg. Forstz. 39, 781-784.  
 EVERS, F. H., 1972: Die jahrweisen Fluktuationen der Nährelementkonzentrationen in Fichtennadeln und ihre Bedeutung für die Interpretation nadelanalytischer Befunde, Allg. Forst- u. Jagdz. 143, 68-74.  
 - 1984: Welche Erfahrungen liegen bei Kalium- und Magnesium-Düngungsversuchen auf verschiedenen Standorten in Baden-Württemberg vor? Allg. Forstz. 39, 767-769.

- FINK, S., 1983: Histologische und histochemische Untersuchungen an Nadeln erkrankter Tannen und Fichten im Südschwarzwald. *Allg. Forstz.* 38, 660–663.
- 1987: Anatomie und Histochemie von Koniferennadeln als Diagnosemittel zur Klärung der Beteiligung biotischer und abiotischer Schadfaktoren am „Waldsterben“. *Kernforschungszentrum Karlsruhe, PEF-Berichte*, 12, 113–122.
- HÜTTL, R. F., 1985a: Jüngste Waldschäden, Ernährungsstörungen und diagnostische Düngung. *VDI-Berichte*, 560, 863–886.
- 1985b: „Neuartige“ Waldschäden und Nährelementversorgung von Fichtenbeständen (*Picea abies* Karst.) in Südwestdeutschland. *Freiburger Bodenkundl. Abh.*, 16.
- HÜTTL, R. F.; ZÖTTL, H. W.; 1985: Ernährungszustand von Tannenbeständen in Süddeutschland – ein historischer Vergleich. *Allg. Forstz.* 40, 1011–1013.
- ISERMANN, K., 1985: Diagnose und Therapie der „neuartigen Waldschäden“ aus der Sicht der Waldernährung. *VDI-Berichte*, 560, 897–920.
- KAUPENJOHANN, M.; HANISCHIEL, R.; HORN, R.; ZECH, W., 1985: Nährstoffversorgung gedüngter, unterschiedlich geschädigter Fichten auf immissionsbelasteten Standorten in Nordost-Bayern. *Mitteilungen Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 43, 969–974.
- KENK, G.; EVERS, F. H.; UNERFIED, P.; SCHROTER, H., 1983: Düngung als Therapie gegen Immissionswirkungen in Tannen-Fichten-Beständen? *Allg. Forst- u. Jagdz.* 154, 153–169.
- KREUTZER, K., 1972: Die Wirkung des Manganmangels auf die Farbe, die Pigmente und den Gaswechsel von Fichtennadeln (*Picea abies* Karst.). *Forstw. Cbl.*, 91, 80–98.
- MATERNA, J., 1962: Düngung als Therapie gegen Immissionen. *Wiss. Zeitschr. der TH Dresden*, 11, 589–593.
- PARAMESWARAN, N.; FINK, S.; LILSE, W., 1985: Feinstrukturelle Untersuchungen an Nadeln geschädigter Tannen und Fichten aus Waldschadensgebieten im Schwarzwald. *Eur. J. For. Path.*, 15, 168–182.
- PEAFF, C.; BUCHNER, A., 1958: Die Abhängigkeit der Magnesiumwirkung vom Kalkzustand und von der Form der Stickstoffernährung. *Z. Pflanzenern., Düng., Bodenk.*, 81, 102.
- PRINZ, B.; KRAUSE, G. H. M.; JUNG, K. D., 1984: Neuere Untersuchungen der LIS zu den neuartigen Waldschäden. *Düsseldorfer Geobot. Kolloq.* 1, 11–23.
- RANFT, H., 1982: Düngung als Anpassungsmaßnahme im Immissionsschadengebiet Oberes Erzgebirge. *Beitr. f. d. Forstwiss.* 3, 119–124.
- REHELES, K. E., 1983: Wälderkrankungen und Immissionen – eine Zwischenbilanz. *Allg. Forstz.* 38, 601–610.
- TRÜBY, P.; ALDINGER, E., 1984: Eine Methode zur schnellen Bestimmung der effektiv austauschbaren Kationen. In: TRÜBY, P., 1984: Düngung von Waldstandorten – eine Möglichkeit zur Milderung der Waldschäden? *Allg. Forstz.* 39, 1302–1304.
- ZECH, W.; POPP, E., 1983: Magnesiummangel, einer der Gründe für das Fichten- und Tannensterben in Nordostbayern. *Forstw. Cbl.* 102, 50–55.
- ZÖTTL, H. W., 1985: Waldschäden und Nährelementversorgung. *Düsseldorfer Geobot. Kolloq.* 2, 31–41.
- ZÖTTL, H. W.; HÜTTL, R. F., 1985: Schadsymptome und Ernährungszustand von Fichtenbeständen im Südwestdeutschen Alpenvorland. *Allg. Forstz.* 40, 197–199.
- 1986: Nutrient supply and forest decline. *Water, Air and Soil Pollution* 31, 449–462.
- ZÖTTL, H. W.; MIES, E., 1983: Nährelementversorgung und Schadstoffbelastung von Fichtenökosystemen im Südschwarzwald unter Immissionseinfluß. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 38, 429–434.

*Anschriften der Autoren:* Dr. R. F. HÜTTL, Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre, Bertoldstraße 17, D-7800 Freiburg i. Br.; Dr. habil. S. FINK, Institut für Forstbotanik und Holzbiologie, Bertoldstraße 17, D-7800 Freiburg i. Br.