

Einführung

Über die Ursachen der sogenannten neuartigen Waldschäden gibt es eine Vielzahl verschiedenartiger Erklärungsversuche und Arbeitshypothesen. Sie beruhen auf intensiven Fallstudien über bestimmte Erscheinungsformen der Erkrankungen, auf Erwägungen und zum Teil auch auf Spekulationen. Allen Hypothesen ist gemeinsam, daß sie bislang nicht bestätigt und überprüft sind und deshalb nicht als gesicherte Erkenntnis gelten.

Der klassische Weg zur Überprüfung und Verifizierung von plausiblen, testbaren Hypothesen führt über Experimente, die sorgfältig geplant und möglichst vielseitig ausgewertet werden.

Im vorliegenden Schwerpunktheft des Forstwissenschaftlichen Centralblatts werden zwei Versuche vorgestellt, die in den vergangenen Jahren von verschiedenen vor allem im Münchner Raum tätigen Arbeitsgruppen durchgeführt bzw. begonnen wurden.

Beim ersten Versuch handelt es sich um ein Pilotexperiment mit jungen, verklonten Fichten in *neuartigen Klima- und Expositionskammern* der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung München in Neuherberg; die Münchner Arbeitsgemeinschaft Luftschadstoffe (MAGL) überprüfte damit eine weithin anerkannte und sehr komplexe Arbeitshypothese, welche die Erkrankung der Fichte in den Hochlagen der Mittelgebirge auf sauren Böden zu erklären versucht. In diesen Kammern können die Versuchsbedingungen sehr exakt eingestellt und kontrolliert werden; allerdings wird die Größe der Versuchspflanzen durch die Klimakammern bestimmt.

Der zweite Versuch folgt einem Konzept, das mit *Probebeständen im Freiland* arbeitet.

Untersucht wird der Einfluß erhöhten Säureeintrages und der kompensatorischen Kalkung im Wald. Es soll herausgefunden werden, welche Auswirkungen auf Bestand, Boden und Sickerwasser unter weitgehend kontrollierten Bedingungen am Standort auftreten. Das Versuchskonzept umfaßt saure Beregnungen und praxisübliche Kalkungen.

Beide Versuche werden gleichzeitig als Musterbeispiele einer interdisziplinären, experimentell-ökologischen Waldforschung vorgestellt.

Die Schriftleitung

Experimentelle Untersuchungen zur Erkrankung der Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) auf sauren Böden der Hochlagen: Arbeitshypothese und Versuchsplan¹

Von K. E. REHFUESS und CHR. BOSCH

1 Arbeitshypothese

Eine 1983 veröffentlichte Fallstudie und Arbeitshypothese (BOSCH u. a. 1983) über die Erkrankung der Fichte in den Hochlagen des Bayerischen Waldes (oberhalb 900 m ü. NN) erklärt die früher dort nicht bekannte Erkrankung durch das Zusammenwirken von hohen Ozonkonzentrationen bei Strahlungswetter, hoher Säuredeposition aus der Atmosphäre, intensiver Einstrahlung und von Frostschock-Ereignissen, wobei die Armut der Böden an leicht aufnehmbarem Magnesium und Calcium prädisponiert; auch Nadelparasiten können mitwirken. Die In-

¹Beitrag Nr. 1 zum Pilotexperiment der Münchner Arbeitsgemeinschaft Luftschadstoffe (MAGL).

tensität der Erkrankung wird außerdem durch die genetische Konstitution der Fichten maßgeblich bestimmt.

Folgender Ablauf der Ereignisse ist vorstellbar (Abb. 1):

Bei Strahlungswetter vor allem im Sommer treten besonders hohe Konzentrationen von Ozon und anderen Photooxidantien auf (vgl. PRINZ u. a. 1982). Sie können Kutikularwache und Zellmembranen schädigen und für Kationen durchlässiger machen. Ähnliche Schäden an den Membranen werden durch Frost gesetzt (BERINGER u. TROLLDENIER 1978); auch eine unzureichende Calciumernährung verändert den Zustand der Membranen nachteilig. Der häufige

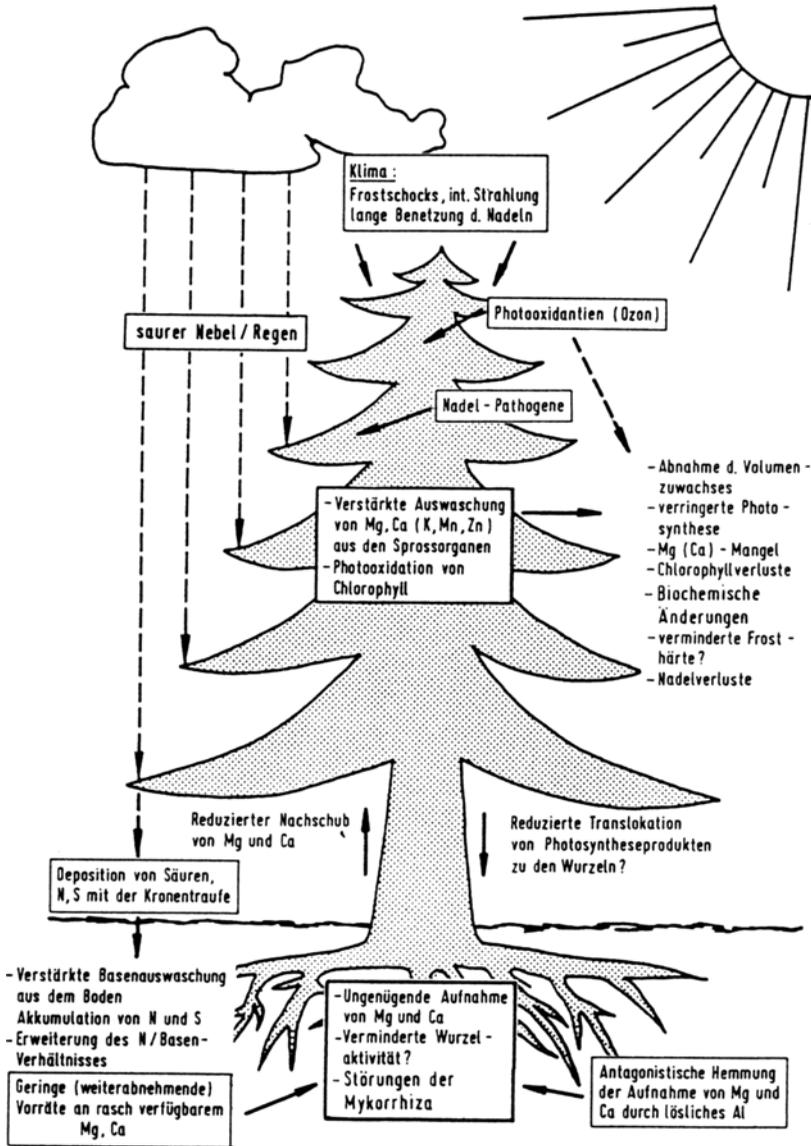


Abb. 1. Arbeitshypothese über die Erkrankung der Fichte auf sauren Böden in hohen Gebirgslagen

Fig. 1. Working hypothesis about the Norway spruce decline on acidic soils at high altitudes of the mountainous regions

(150–200 Nebel- bzw. Wolkentage im Jahr), z. T. besonders saure Nebelniederschlag wird danach Magnesium, Calcium, Kalium, Zink und Mangan verstärkt aus den Nadeln herauslösen (Leaching, vgl. TUKEY 1970). In den seit langem sauren, basenarmen und in den Mineralbodenhorizonten weitgehend mit Aluminium gesättigten Hochlagenböden (Podsol-Braunerden und flache Podsole aus Granit, Paragneis und Glimmerschiefer) ist zwar genügend K (Mn), nicht aber ausreichend Mg und Ca (Zn) für rasche Aufnahme und schnellen Ausgleich der Verluste im Sproßbereich verfügbar. Außerdem wird die Aufnahme von Mg und Ca durch Ionenantagonismen des Al in der Bodenlösung spezifisch behindert. Deshalb entwickelt sich allmählich ein Mg-(Ca-)Mangel, zumal der verfügbare Basenvorrat im Boden bei relativ hohem Eintrag von Protonen ($1-2 \text{ kmol H}^+ \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), Sulfat-Schwefel ($40-60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) und Nitrat-Stickstoff ($10-20 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) in der Kronentraufe wahrscheinlich durch beschleunigtes Auswaschen zurückgeht.

Die Ausprägung des Mg-Mangels (Goldspitzigkeit älterer Nadeln auf der Oberseite) wird in den hohen Mittelgebirgslagen wohl deshalb verstärkt, weil die N- und P-Versorgung der Fichten aus den stark humosen, mit lockerem, biologisch aktivem Rohhumus ausgestatteten Böden und aus dem beträchtlichen atmosphärischen N-Eintrag ausgezeichnet ist, so daß Nährstoffungleichgewichte vorliegen (REHFUESS u. a. 1983).

Dieser Mg-Mangel mindert die Photosynthesekapazität der Fichte (LANGE u. a. 1985), ihren Schaftvolumenzuwachs (FRANZ 1983; RÖHLE 1985) und die Versorgung der Wurzeln mit Kohlenhydraten; er könnte spezifisch auch die Frosthärte behindern. Deshalb wird vermutet, daß die zunächst latente Schädigung nach einer Serie von Frostschocks 1978/79, 1981, 1982 und 1983 manifest wurde, als arktische Kaltluftmassen nach ausgedehnten milden Wetterperioden einbrachen.

Das vorzeitige Schütten der älteren Nadeln und das daraus resultierende Verlichten der Kronen wird vermutlich durch die Frosteffekte, aber auch durch Nadelparasiten wie *Lophodermium piceae* und *Rhizosphaera kalkhoffii* vorangetrieben.

Die Intensität dieser spezifischen, komplexen Erkrankung ist auf den Berggipfeln am höchsten, weil dort hohe O_3 -Konzentrationen bei Strahlungswetter, ausgedehnte Perioden mit saurem Nebelniederschlag, beschleunigte Photooxidation des Chlorophylls infolge intensiver Strahlung, Armut der Böden an verfügbarem Mg und Ca, relativ hoher N-Eintrag aus der Atmosphäre und häufige Frostereignisse zusammentreffen. Die Beteiligung von Frost unter den Stressoren würde die auffallende Variation der Schadensintensität innerhalb der Bestände und zwischen diesen elegant erklären, da die Frosthärte genetisch kontrolliert ist. Die den klimatisch extremen Bedingungen der Hochlagen (Temperaturklima, hohe O_3 -Konzentrationen) besser angepaßten autochthonen Fichtenbestände leiden nämlich eindeutig weniger als – mutmaßlich – fremde Tieflagenherkünfte, die zur Aufforstung von Schadens-Kahlflächen und Hochschachten herangezogen wurden.

Diese Arbeitshypothese gilt allerdings nur, sofern keine durch Wurzelpathogene oder abiotische Faktoren hervorgerufene Wurzelschädigung vorliegt, welche in ganz spezifischer Weise die Aufnahme zweiwertiger Metallkationen – nicht aber jene von Stickstoff, Phosphor und Kalium – behindert (vgl. BINNS u. a. 1980); eine solche ist bisher nicht nachgewiesen.

2 Vergleich mit anderen Hypothesen

Dieser Erklärungsansatz deckt sich teilweise mit etwa gleichzeitig veröffentlichten Arbeitshypothesen anderer Forschergruppen über denselben Erkrankungstyp (PRINZ u. a. 1982; KRAUSE u. a. 1983, 1985; ZECH u. POPP 1983; ZÖTTL u. MIES 1983). Aus den Arbeitsergebnissen der LIS-Gruppe wurde die Mitwirkung von Ozon unter den Stressoren übernommen (PRINZ u. a. 1982). Unser Erklärungsversuch unterscheidet sich von anderen Hypothesen darin, daß er – besonders viele Stressoren in die Überlegung einbezieht, – dem Leaching von Mg und Ca aus den Nadeln eine besondere Rolle beimißt,

- Mg-Mangel der Fichten nicht nur auf eine Verarmung des Ökosystems an Mg, sondern auch auf erhöhten Stickstoffeintrag zurückführt,
- Frostchockereignissen (rasche Temperaturstürze in den Minusbereich nach ungewöhnlich milden Perioden, welche die Fichten zur Absenkung ihrer Frosthärte veranlaßten) ein besonderes Gewicht für das Sichtbarmachen der Schäden, die Nadelverluste und den Exitus der Bäume zuerkennt,
- die genetische Konstitution der Fichte als wichtigen, die Schadensintensität steuernden Faktor benennt.

3 Ergebnisse der bisherigen Überprüfung durch andere Gruppen

In den vergangenen beiden Jahren wurden mehrere Beobachtungen publiziert, welche die Arbeitshypothese stützen:

- So konnte die postulierte Beschleunigung des Leachings insbesondere von Mg und Ca durch das Einwirken von Ozon und von versauertem Nebelniederschlag sowohl in Kammerexperimenten (KRAUSE u. a. 1983, 1985; MENGEL 1985) als auch im Freiland (KREUTZER 1985, pers. Mitteilung) nachgewiesen werden. Allerdings ließ sich dadurch bisher in keinem Fall Mg- oder Ca-Mangel der Fichten induzieren (vgl. auch SKEFFINGTON u. a. 1985 a + b).
- Die Behinderung der Mg- und Ca-Aufnahme von Fichten durch hohe Aktivität des Aluminiums im Substrat wurde mehrfach bestätigt (vgl. u. a. EVERS 1983; MAKONEN-SPIECKER 1985; JÖRNS u. HECHT-BUCHHOLZ 1985), wobei genetische Unterschiede im Verhalten von Klonen auftraten.
- Zwischen Ozonbegasung und der genetisch bestimmten, variierenden Frostresistenz von Fichtenklonen wurden Beziehungen aufgedeckt (BROWN u. a. 1986; GUDERIAN u. a. 1985).

4 Versuchsplan

Die experimentelle Überprüfung unserer Arbeitshypothese bedarf moderner Expositions-kammern, in denen die wichtigsten physikalischen und chemischen Klimaparameter in den Hochlagen der Mittelgebirge und die Bodenverhältnisse realitätsnah simuliert werden können. Solche Kammern sind seit Januar 1985 bei der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung München in Neuherberg installiert. Der Lenkungsausschuß der Münchner Arbeitsgemeinschaft für Luftschadstoffe (MAGL) beschloß, bereits die Phase der technischen Erprobung dieser Kammern für die Durchführung eines halbjährigen, interdisziplinären Pilot-Experiments zu nutzen. Dem Versuchsplan für diese Vorexperimente wurde die o. g. Arbeitshypothese zugrunde gelegt. Der Versuch sollte es den beteiligten standortskundlichen, botanischen und to-

| Grosskammer: Normalklima (-Fr) | | | |
|---------------------------------------|-----|--|-----|
| Nebel pH 5,6 (-O ₃ -Ne) | | Ozon + Nebel pH 5,6 (+O ₃ -Ne) | |
| +Dü | -Dü | +Dü | -Dü |
| Nebel pH 3,0 (-O ₃ +Ne) | | Ozon + Nebel pH 3,0 (+O ₃ +Ne) | |
| +Dü | -Dü | +Dü | -Dü |

Abb. 2. Versuchsplan für das MAGL-Pilot-experiment im Normalklima

Fig. 2. Experimental design for the pilot experiment of MAGL under normal climatic conditions

ökologischen Arbeitsgruppen ermöglichen, ihre spezifischen Methoden und Arbeitsansätze zur Vorbereitung auf die nachfolgende Hauptstudie zu erproben.

Der nach gründlicher Beratung aller Beteiligten erstellte faktorielle Versuchsplan (Abb. 2) umfaßt insgesamt 16 Prüfvarianten, und zwar

- 2 (physikalische) Klimavarianten in 2 Großkammern
- 4 Immissionsvarianten in 4 Kleinkammern pro Großkammer und
- 2 Varianten der Magnesium-Calcium-Ernährung in jeder Kleinkammer.

Diese Varianten werden durch folgende Buchstabenkombinationen gekennzeichnet:

| Normalklima | | Extremklima (mit Frostschocks) | |
|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| -Fr-O ₃ -Ne-Dü | -Fr+O ₃ -Ne-Dü | +Fr-O ₃ -Ne-Dü | +Fr+O ₃ -Ne-Dü |
| -Fr-O ₃ -Ne+Dü | -Fr+O ₃ -Ne+Dü | +Fr-O ₃ -Ne+Dü | +Fr+O ₃ -Ne+Dü |
| -Fr-O ₃ +Ne-Dü | -Fr+O ₃ +Ne-Dü | +Fr-O ₃ +Ne-Dü | +Fr+O ₃ +Ne-Dü |
| -Fr-O ₃ +Ne+Dü | -Fr+O ₃ +Ne+Dü | +Fr-O ₃ +Ne+Dü | +Fr+O ₃ +Ne+Dü |

Es bedeutet:

| | | | |
|----------------|--------------------------|-----------------|---|
| Fr | - Frostschock | -Fr | - Normalklima ohne Frostschocks |
| | | +Fr | - Extremklima mit Frostschocks |
| O ₃ | - Ozonbelastung | -O ₃ | - geringe O ₃ -Konzentrationen |
| | | +O ₃ | - hohe O ₃ -Konzentrationen |
| Ne | - saurer Nebel | -Ne | - pH-Wert des Nebels 5.6 |
| | | +Ne | - pH-Wert des Nebels 3.0 |
| Dü | - MgCa-Düngung | -Dü | - keine Düngung mit Mg und Ca |
| | | +Dü | - Düngung mit Mg und Ca; pH-Anhebung im Boden |
| Fl | - Exposition im Freiland | | |

Als Versuchspflanzen verwendeten wir 4jährige Stecklinge eines Fichtenklons, dessen Mutterbaum in den Bayerischen Alpen zwischen 900–1300 m ü. NN stockte. Sie wurden im April 1984 aus einem nährstoffreichen Pflanzgartenboden in Vlies-Container (2 l Volumen) verpflanzt, die mit grusig-sandigem Lehm aus dem B_v-Horizont einer Podsol-Braunerde aus Granit am Dreisessel (FoA Neureichenau) verfüllt waren. Alle Container erhielten vor dem Einpflanzen eine einheitliche NPK-Düngung; die Hälfte der Container wurde zusätzlich mit Mg-Sulfat, Ca-Sulfat, Mg-Carbonat und Ca-Carbonat gedüngt.

Die Pflanzen standen über den Sommer schattiert im Freien in Mooseurach im Alpenvorland und wurden mit destilliertem Wasser gegossen. Im Oktober 1984 wurden sie in ein ungeheiztes Gewächshaus und Ende Januar 1985 in die Expositions-kammern überführt. Dabei war der Wurzel- vom Sproßraum abgeschottet, so daß die Kronentraufe nicht in den Boden eindringen konnte. Pro Prüfvariante konnten 6 Pflanzen untergebracht werden, die ca. 60 cm hoch waren. Zusätzlich wurde jeweils ein Satz ungedüngter und mit Mg-Ca gedüngter Pflanzen im Freiland (Fl) am Dreisessel bei 900 m ü. NN, d. h. im Verbreitungsgebiet der Erkrankung, exponiert.

Zusammenfassung

Eine spezifische Erkrankung der Fichte in den Hochlagen der deutschen Mittelgebirge auf sauren Böden wird hypothetisch erklärt durch das Zusammenwirken von Ozonbelastung, saurem (Nebel-) Niederschlag, hohem Stickstoffeintrag, Armut der Böden an verfügbarem Magnesium und Calcium, intensiver Einstrahlung und Frostschocks; dabei leiden autochthone Bestände weniger als (vermutlich) fremde Provenienzen. Ausgehend von dieser Hypothese wurde für ein Pilotexperiment in neuen Expositions-kammern ein Versuchsplan entwickelt, der die Interaktionen von Immissionsfaktoren, bodenchemischem Zustand und Witterungsstreß zu überprüfen gestattet.

Summary

Experimental studies on the Norway spruce (Picea abies [L.] Karst.) decline on acidic soils at high altitudes: Working hypothesis and experimental design

The decline of Norway spruce on acidic soils at high altitudes of the German „Mittelgebirge“ (subalpine mountains) is suggested to be caused by an interaction of ozone stress, acid (mist) precipitation, high N deposition from the atmosphere, inadequate amounts of available Mg and Ca in the soils, intensive radiation and frost shock events; autochthonous populations are suffering less than (presumably) foreign spruce provenances. On the basis of this hypothesis an experimental design was developed for a pilot experiment in modern exposure chambers.

Literatur

- BERINGER, H.; TROLLDENIER, 1978: Influence of K nutrition on the response to environmental stress. Potash Institute, Bern, 189–222.
- BINNS, W. O.; MAYHEAD, G. J., MCKENZIE, J. M., 1980: Nutrient deficiencies of conifers in British forests. Forestry Commission Leaflet 76, HMSO.
- BOSCH, CHR.; PFANNKUCH, E.; BAUM, U.; REHFUESS, K. E., 1983: Über die Erkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst.) in den Hochlagen des Bayerischen Waldes. Forstw. Cbl., 102 167–181.
- BROWN, K. A.; ROBERTS, T. M.; BLANK, L. W., 1986: Interaction between ozone and cold sensitivity in Norway spruce: A factor contributing to the forest decline in Central Europe. Submitted to Nature.
- EVERS, F. H., 1983: Ein Versuch zur Aluminium-Toxizität bei der Fichte. Der Forst- und Holzwirt 38, 305–307.
- FRANZ, F., 1983: Auswirkungen der Waldkrankheiten auf Struktur und Wuchsleistung von Fichtenbeständen. Forstw. Cbl. 102, 186–200.
- GUDERIAN, R.; KÜPPERS, K.; SIX, R., 1985: Wirkungen von Ozon, Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid auf Pappel und Fichte bei unterschiedlicher Versorgung mit Magnesium und Kalzium sowie auf die Blattflechte Hypogymnia physodes. VDI-Berichte 560, 657–703.
- JORNS, A.; HECHT-BUCHHOLZ, CH., 1985: Aluminium-induzierter Magnesium- und Calciummangel im Laborversuch bei Fichtensämlingen. Allgem. Forstzeitschrift 50, 1248–1252.
- KRAUSE, G. H. M.; JUNG, K. D.; PRINZ, B., 1983: Untersuchungen zur Aufklärung immissionsbedingter Waldschäden. Verein Deutscher Ingenieure – Berichte 500, 257–266.
- KRAUSE, G. H. M.; JUNG, K. D.; PRINZ, B., 1985: Experimentelle Untersuchungen zur Aufklärung der neuartigen Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland. Verein Deutscher Ingenieure – Berichte 560, 627–656.
- LANGE, O. L.; GEBEL, J.; SCHULZE, E. D.; WALZ, H., 1985: Eine Methode zur raschen Charakterisierung der photosynthetischen Leistungsfähigkeit von Bäumen unter Freilandbedingungen – Anwendung zur Analyse „neuartiger Waldschäden“ bei Fichte. Forstw. Cbl. 104, 186–198.
- MAKKONEN-SPIECKER, K., 1985: Auswirkungen des Aluminiums auf junge Fichten (*Picea abies* Karst.) verschiedener Provenienzen. Forstw. Cbl. 104, 341–353.
- MENGEL, K., 1985: Forschungsbericht anl. Statusseminar „Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Waldbäume und Waldböden“, Jülich, 2.–4. 12. 85.
- PAYER, H. D.; BLANK, W. L., u. a., 1986: Simultaneous exposure of forest trees to various pollutants and climatic stress – a new approach at the GSF. Submitted to “Water, Air and Soil Pollution”, Int. Journal of Environmental Pollution.
- PRINZ, B.; KRAUSE, H. M.; STRATMANN, H., 1982: Vorläufiger Bericht der Landesanstalt für Immissionsschutz über Untersuchungen zur Aufklärung der Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland. LIS-Berichte Nr. 28, Essen.
- REHFUESS, K. E.; BOSCH, CHR.; PFANNKUCH, E., 1983: Nutrient imbalances in coniferous stands in southern Germany. In K. K. Kolari (ed.) Growth Disturbances of Forest Trees. Proc. Int. Workshop Jyväskylä. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 116, 122–130.
- ROHLE, H., 1985: Ertragskundliche Aspekte der Walderkrankungen. Forstw. Cbl. 104, 225–242.
- SKEFFINGTON, R. A.; ROBERTS, T. M., 1985: The effects of ozone and acid mist on Scots pine saplings. Oecologia 65, 201–206.
- SKEFFINGTON, R. A.; ROBERTS, T. M.; BLANK, L. A., 1985: Schadsymptome an Fichte und Kiefer nach Belastung mit Ozon und saurem Nebel. AFZ 50, 1359–1362.
- TUKEY, H. B., 1970: The leaching of substances from plants. Annual Review of Plant Physiology 21, 305–324.
- ZECH, W.; POPP, E., 1983: Magnesiummangel, einer der Gründe für das Fichten- und Tannensterben in Nordostbayern. Forstw. Cbl. 102, 50–55.
- ZÖTTL, H. W.; MIES, E., 1983: Die Fichtenerkrankung in den Hochlagen des Südschwarzwalds. Allgem. Forst- und Jagdztg. 154, 110–114.

Anschrift der Verfasser: Prof. Dr. K. E. REHFUESS und Dipl.-Forstw. CHR. BOSCH, Lehrstuhl für Bodenkunde, Universität München, Amalienstraße 52, D-8000 München 40