

Gefährdung der Wälder in Mitteleuropa durch Luftschadstoffe und Möglichkeiten der Revitalisierung durch Düngung

– Karl-Eugen Rehfuess, München –

1. Einleitung

Im Rahmen dieses Symposiums besteht meine Aufgabe darin zu beurteilen,

- in welchem Umfang die Wälder in Mitteleuropa durch Luftschadstoffe bedroht oder zumindest in ihrer Vitalität beeinträchtigt sind und
- ob diese Schädigungen gegebenenfalls durch Düngung und Kalkung korrigiert werden können.

Dabei werde ich hauptsächlich die Verhältnisse in den alten Ländern der BRD beleuchten, aus denen meine Erfahrungen stammen. Auch konzentriere ich mich auf Erkrankungen der wichtigsten Baumarten und gehe auf schädliche Auswirkungen von Luftschadstoffen auf Böden und Hydrosphäre nur am Rande ein. Die Deposition von Stickstoff- und Schwefelverbindungen aus der Atmosphäre kann nämlich in den Böden nachteilige Veränderungen auslösen, ohne daß die Bäume darunter leiden.

Es liegt nahe, unserer Erörterung die Ergebnisse der jährlichen Waldzustandsinventuren zugrunde zu legen. Diese europaweite Erhebung verwendet als wichtigstes Merkmal der Schädigung Blattverluste, bei der Buche in Kombination mit Verzweigungsanomalien. Sie ist potentiell eine durchaus präzise und reproduzierbare Abschätzung der Blattmassen und ihrer zeitlichen Variation, aber keine echte Aufnahme von Schäden oder Vitalitätsschwächen von Waldbeständen; denn

- die regionalen oder standortsspezifischen Standards für die „normale“ Belaubung und ihre interannuelle natürliche Variation sind nur unscharf definiert,
- die Blattverluste werden nur ein einziges Mal im Jahr zu einem Zeitpunkt erhoben, an dem andere, differential-diagnostisch wichtige Merkmale nicht auftreten,
- es wird nicht unterschieden zwischen den Verlusten an jungen und alten Blattorganen,
- die Zusammenhänge zwischen Blattverlusten und Zuwachsgeschehen sowie physiologischen oder biochemischen Kennwerten der Vitalität sind vielfach noch unklar, zumindest bis zu Blattverlusten von rund 50 %, und
- schließlich sind Blattverluste ein völlig unspezifisches, keineswegs neuartiges Symptom, das keinen Rückschluß auf die Schadensursachen zuläßt. Sie eignen sich deshalb prinzipiell nicht dazu, durch Luftschadstoffe ausgelöste „neuartige“ Schäden zu erkennen.

Wer die Ergebnisse dieser Blattverlust-Inventur dennoch undifferenziert als großflächige, erhebliche und neuartige Schädigung der Wälder durch Immissionsfaktoren interpretiert, führt wider besseres Wissen die Öffentlichkeit in die Irre. Inzwischen regt sich auch internationale und nationale Kritik an dieser Erhebung und an der Interpretation ihrer Ergebnisse (z.B. SCHLÄPFER 1993, SKELLY & INNES 1994, KANDLER 1994, ELLENBERG 1995).

Ein weiteres, als Hinweis auf akute, aber ganz verschiedenartige Ernährungsstörungen wichtiges Kriterium der Waldzustandsinventur sind ausgeprägte Vergilbungen vor allem an

Coniferen. Chlorosen wurden jedoch in Süddeutschland in den letzten Jahren nur regional und auch hier nur an maximal 25 % aller Aufnahmepunkte registriert. Seit 1985 war ihr Anteil ständig rückläufig (< 10 %) und stieg erst 1994 wieder etwas an (vgl. KANDLER 1988).

Akute Nährelementmängel sind deshalb nur auf einem beschränkten Teil der Waldfläche der Bundesrepublik mit den festgestellten Blattverlusten gekoppelt. Dies engt die Chancen für einen Erfolg der Düngung von vornherein erheblich ein.

Die Ergebnisse der Zustandsinventur eignen sich aus den genannten Gründen nicht dazu, die wirkliche Gefährdung der Wälder in Mitteleuropa durch Luftschadstoffe einzuschätzen und die Chancen einer Revitalisierung durch Düngung zu bewerten. Nun hat jedoch der Forschungsbeirat Waldschäden/Luftverunreinigungen bereits 1986 in seinem 2. Bericht ein verbessertes Konzept zum Verständnis der Walderkrankungen vorgelegt. Basierend auf Vorschlägen von REHFUESS (1983a und b) wurde der undifferenzierte Komplex „neuartige“ Waldschäden aufgelöst in verschiedene Erkrankungstypen, die zwar alle mit Blattverlusten einhergehen und teilweise synchron auftreten, sich aber ansonsten hinsichtlich ihrer Symptome und der (plausiblen) Streßfaktoren deutlich voneinander unterscheiden. Für die Baumart Fichte sind bisher in den alten Ländern der BRD 5 verschiedene Erkrankungstypen ausgeschieden. Die Bodenformen, die bodenchemischen Zustände und die Nährelementversorgung der betroffenen Bestände haben im Ursachenbündel der einzelnen Erkrankungen ganz verschiedenartige Bedeutung. Deshalb ist es unerlässlich, daß wir das Potential von Düngung und Kalkung für das Revitalisieren von Wäldern getrennt nach den verschiedenen Erkrankungstypen beurteilen!

2. Über die Rolle von Ernährungszustand und Düngung bei den Erkrankungen der Fichte (*Picea abies* Karst.)

2.1 Magnesium-Mangel-Erkrankung der Fichte auf sauren Böden in den höheren Mittelgebirgslagen = montane Vergilbung; < 10 % der Fichtenfläche in der BRD

Eine maßgebliche Beteiligung des Bodens und daraus resultierender, überwiegend substratbedingter Nährstoffmängel bei wirklich neuartigen Waldschäden ist bislang in den alten Ländern der BRD nur für eine spezifische Erkrankung der Fichte auf sauren Böden in den höheren Lagen der Mittelgebirge nachgewiesen. Hier leiden die Fichten flächig unter Magnesiummangel (<0,7 mg.g⁻¹ Mg in den halbjährigen Nadeln der Kronenspitze) und knappem Calciumangebot (1-2 mg.g⁻¹ Ca), sind aber gleichzeitig gut mit Stickstoff, Phosphor und Kalium versorgt; das N/Mg-Verhältnis in den Nadeln ist auffallend weit.

Diese Erkrankung geht mit einer charakteristischen Vergilbung auf der Oberseite und an den Spitzen älterer Nadeln einher und kommt nur vor auf Bodenformen, die arm an austauschbarem Mg und Ca und dafür weitgehend Aluminium-gesättigt sind (austauschbares Mg in 0 – 10 cm Tiefe <50 µg.g⁻¹; vgl. ZÖTTL 1985, HOFMANN-SCHIELLE 1988, LIU & TRÜBY 1989, HOFMANN-SCHIELLE et al. 1994, EVERS 1994). Armut der Böden an rasch verfügbarem Mg und Ca ist also offensichtlich eine wichtige Vorbedingung für das Auftreten dieses Schadtyps, darin stimmen alle Geländeuntersuchungen (vgl. BOSCH et al. 1983, ZECH & POPP 1983, ZÖTTL & MIES 1983, ZÖTTL 1985, NEBE et al. 1987) und die Ergebnisse von Expositionsexperimenten in Kammern der GSF (BOSCH et al. 1986) widerspruchsfrei überein. Die Aufnahme des knappen Mg und Ca wird wahrscheinlich zusätzlich durch hohe Al-Aktivität im Substrat antagonistisch behindert.

Das Leaching von Mg und Ca aus den Sproßorganen der Fichte unter dem Einfluß realistischer Konzentrationen von O₃ in der Luft und von H⁺ im Niederschlagswasser trägt wohl nur untergeordnet zum Entstehen dieses Mg-Mangels bei; denn auf diese Weise gehen nur

geringe Anteile (<5 %) des in den Sprossen vorhandenen Mg (Ca) verloren. Eventuelle Verluste aus den Nadeln werden rasch kompensiert, sofern das Substrat genügend aufnehmbares Mg zur Verfügung stellt (vgl. BOSCH et al. 1986, BLANK et al. 1989, ROBERTS et al. 1989).

Die geringen Vorräte der Böden an austauschbarem Mg beruhen einerseits auf zu schwacher Nachlieferung durch Verwitterung; diese wiederum ist entweder auf zu kleinen Vorrat an Mg(Ca)-Silikaten im Substrat (vor allem auf Graniten, Orthogneisen, quarzitischen Sandsteinen) oder zu grobe Körnung der vorhandenen Mg-Silikate (z.B. auf Amphibolit, Paragneis; vgl. HOFMANN-SCHIELLE 1988, HOFMANN-SCHIELLE et al. 1994) zurückzuführen. Örtlich haben auch ungewöhnlich hohe Ernteentzüge in der Vergangenheit die Mg- und Ca-Ausstattung reduziert. Die knappen Mengen an austauschbarem Mg und Ca im Boden sind wegen zeitweise hoher Konzentrationen von Sulfat und Nitrat in der Bodenlösung stark auswaschungsgefährdet (FÖRSTER 1988, TÜRK 1992). Diese stammen z.T. aus relativ hoher S- und N-Deposition, z.T. aus beschleunigter Mineralisation organischer S- und N-Verbindungen im Boden (KREUTZER & HEIL 1989, FEGER 1992).

Allerdings führen niedrige Gehalte an austauschbarem Mg im Mineralboden keineswegs in jedem Fall zu der charakteristischen Vergilbung. Im Inneren Bayerischen Wald stocken bisher gesunde, grüne, dicht benadelte (vermutlich) autochthone Hochlagenbestände auf Böden, die mit Mg und Ca ähnlich schlecht ausgestattet sind wie die Standorte unmittelbar benachbarter, stark vergilbter Fichten (BOSCH 1986; vgl. EVERS 1979 und 1994). Die altbekannten Mg-Mangelstandorte der Oberpfalz mit tief verwitterten Böden aus Kreidesedimenten und Phyllit sind ebenfalls extrem arm an austauschbarem Mg; trotzdem fehlt hier die Erkrankung. Knappheit an rasch verfügbarem Mg (Ca) ist also im Stressorenbündel der Hochlagenkrankung sicher nur eine unter mehreren Ursachen (vgl. REHFUESS & BOSCH 1986); Unterschiede in der genetischen Konstitution, Rotfäule und Witterungsstreß, vor allem Frostschockphänomene, spielen ebenfalls eine wichtige Rolle (LÖCHELT et al. 1994).

Die Mg-Mangel-Chlorosen und die Photosynthese-Hemmung der Fichte lassen sich durch Düngung sowohl mit Mg-Sulfat als auch mit Mg-Carbonat beseitigen (vgl. z.B. ALDINGER 1987, KAUPENJOHANN et al. 1987, KAUPENJOHANN 1989, ZÖTTL et al. 1987, HÜTTL 1985, STURM et al. 1987, HÜTTL 1989, LANGE et al. 1989). Entgegen früheren Befürchtungen hat die Düngung mit dem leicht löslichen und physiologisch sauer wirkenden Mg-Sulfat nicht zu Aluminiumstreß oder anderen Formen der Säuretoxizität mit entsprechenden Wurzelschäden geführt, sondern in den meisten Experimenten die Mg-Spiegelwerte für bisher 3 – 6 Jahre erhöht. Nur auf sehr hochgelegenen Standorten im Inneren Bayerischen Wald und Schwarzwald mit flachgründigem, lockerem, skelettreichem Hauptschutt über verfestigtem und ver-

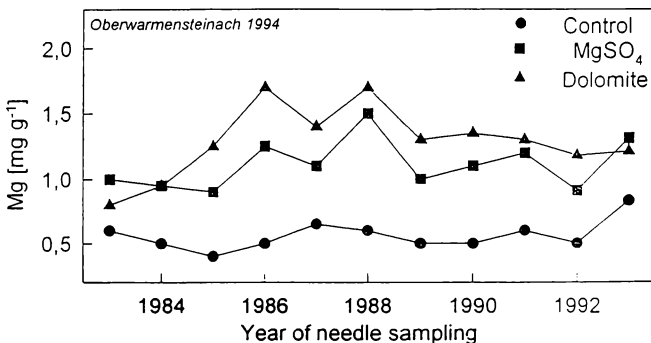


Abb. 1: Mg-Spiegelwerte in den halbjährigen Fichtennadeln nach Düngung im Mai 1983 mit MgSO₄ (160 kg. ha⁻¹ Mg) und Dolomit (1800 kg. ha⁻¹ Mg) auf dem Standort Oberwarmensteinach/ Fichtelgebirge (aus KAUPENJOHANN 1995).

dichtem Basisschutt schlug die Mg-Sulfatdüngung fehl. Hier werden die Oberböden häufig von großen Wassermassen durchströmt, so daß Mg-Sulfat schnell der Auswaschung unterliegt (BOSCH & REHFUESS 1986, STURM et al. 1987). In vielen Fällen ist die Düngung mit den langsamer löslichen (gewöhnlich auch in größeren Mengen verabreichten) Mg-Carbonaten und -Oxiden gegenüber Mg-Sulfat um so deutlicher überlegen, je länger die Versuche laufen (Abb. 1).

In zweijährigen Gefäßversuchen mit Tannen-Sämlingen, die im Hinblick auf die Ca- und Mg-Versorgung als besonders anspruchsvoll gelten, auf stark sauren, lehmigen Böden verglichen GONZALEZ et al. (1989 a und b) die Wirkungen sulfatischer und carbonatischer Bindungsformen beider Elemente. Sowohl die einmalige Ca- und Mg-Carbonat- als auch die wiederholte Ca- und Mg-Sulfatdüngung beschleunigten das Wachstum, erhöhten die Ca- und Mg-Gehalte in Nadeln und Wurzeln und ließen die Mg-Mangelsymptome der Nadeln verschwinden. Negative Effekte der Sulfatgaben auf Wurzeln oder Sproß wurden nicht beobachtet (Abb. 2). Die Versuchsergebnisse erlauben den Schluß, daß spezifische toxische Wirkungen des Aluminiums auf die Wurzelsysteme der Tannen in den Versuchssubstraten nicht vorliegen. Zu dem gleichen Ergebnis kam RASPE (1992) bei der Untersuchung der Wurzelsysteme älterer Fichten im Schwarzwald nach Mg-Sulfatdüngung.

Damit zeichnen sich mehrere Optionen für die Düngung von Fichten- und Tannenbeständen ab, die auf sauren, Mg-armen Substraten unter Mg-Mangel leiden und erhaltungswürdig sind:

- Auf Böden mit hohen Humus- und Stickstoffvorräten und relativ günstigen Humusformen, wo die N-Versorgung der Bestände gut ist und deshalb Nitratverluste zu befürchten sind, kommt der Einsatz von Mg-Sulfat in Frage. Diese Empfehlung gilt insbesondere dann, wenn bei höheren Ton- und Fe-Al-Oxidgehalten im Unterboden damit zu rechnen ist, daß zugeführtes Sulfat weitgehend ausgefällt wird. Der Verzicht auf carbonatische Düngung ist in diesem Fall ratsam, weil Kalkung auf allen jenen Standorten die Nitrifikation beschleunigt und die Nitratauswaschung verstärkt, welche schon zuvor Nitrat in der Bodenlösung führen und deshalb mit Stickstoff gut ernährte Bestände tragen (KAUPENJOHANN 1989, KREUTZER et al. 1991).
- Stark saure Böden mit ungünstigem, inaktivem Auflagehumus und schwacher N-Versorgung der Bestockung können dagegen mit dolomitischen Kalken gedüngt werden; denn hier ist eine pH-Erhöhung erwünscht, und es ist damit zu rechnen, daß der vermehrt freigesetzte Stickstoff von der Bestockung aufgenommen und so eine Nitratauswaschung vermieden wird.
- Auf Standorten, auf denen sowohl Nitrat (nach Kalkung) als auch Sulfat mobil sind und in größeren Mengen ausgewaschen zu werden drohen (z.B. Böden aus oxidarmen Sandsteinen in niederschlagsreichen Regionen), kann auf das ökologisch besonders günstige, obschon teure Ausbringen von feinst vermahlenem, Mg-silikatreichem Gesteinsmehl zurückgegriffen werden. Ergebnisse langfristiger Freilandexperimente in älteren Beständen liegen hierzu allerdings noch nicht vor (vgl. SAUTER 1991).

Selbstverständlich können alle drei Alternativen in verschiedener Weise manipuliert, abgewandelt und auch kombiniert werden.

Für die z.T. viel weiter verbreiteten anderen Erkrankungstypen der Fichte ist bislang eine entscheidende Rolle des Bodens für das Auftreten wirklich neuartiger Schäden bzw. Symptome nicht nachgewiesen.

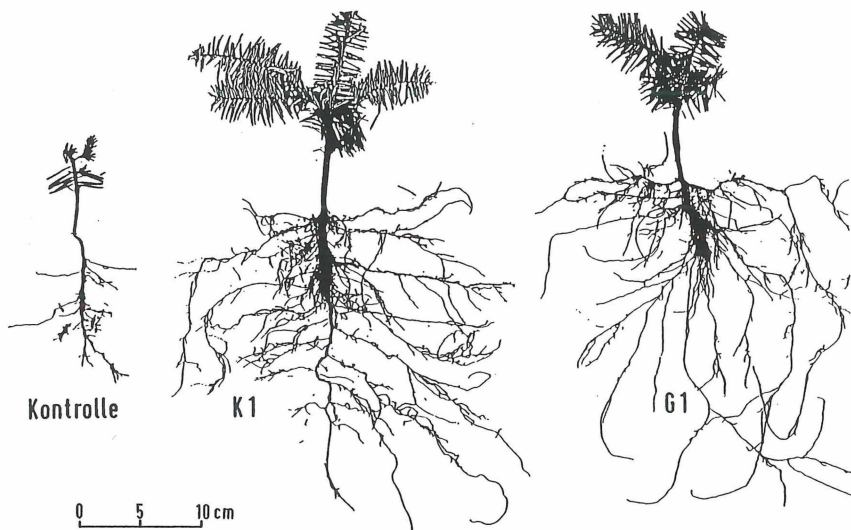


Abb. 2: Wurzelsysteme 3-jähriger Tannen in einem stark sauren, Ca- und Mg-armen Lehm (Bv der Podsol-Braunerde Waldsassen aus Phyllit). Links: ohne Düngung; Mitte: gedüngt mit CaMg-Carbonat; rechts: gedüngt mit CaMg-Sulfat (aus GONZALES et al. 1989b).

2.2 Fichtenerkrankung auf flachgründigen Rendzinen an steilen Südhängen der Kalkalpen in höherer Lage (<10 % der Fläche dieser Baumart in der BRD)

Diese Aussage gilt vor allem für die Erkrankung der Fichte an steilen Südhängen der Kalkalpen. Hier sind ohne Zweifel Ernährungsstörungen maßgeblich beteiligt, so akuter K- und Mn-Mangel mit charakteristischen Chlorosen sowie latenter N- und P-Mangel (BOSCH 1986, LIU et al. 1994). Diese Ernährungsstörungen sind jedoch altbekannt und können durch die spezifischen Bodeneigenschaften erklärt werden. Hinzu kommen Wassermangel trotz hoher Niederschläge wegen der geringen Wasserspeicherkapazität der Böden, Schütteplizpidemien während mehrerer Jahre (vor allem *Lophodermium pini* und *L. piceae*), starker Befall durch Wurzelparasiten wie *Heterobasidion annosum* und *Armillaria mellea*, Frostschocks und falsche Provenienz- bzw. Standortwahl. Ein Mitwirken der relativ geringen Säuredeposition aus der Atmosphäre ist auf diesen carbonatreichen, hochgepufferten Substraten unwahrscheinlich, jene von Photooxidantien plausibel, aber bisher nicht erwiesen. Obwohl diese Erkrankung also mit eindeutigem Nährstoffmangel einhergeht, ist Düngung nicht angebracht; denn Wuchsleistung und Vitalität der Fichten werden auf diesen Standorten durch viele andere, nicht beeinflussbare Faktoren beeinträchtigt. Deshalb hilft hier auf Dauer nur ein Umbau der Bestockung zugunsten standorttauglicher Baumarten wie Kiefer, Buche, Bergahorn und Mehlbeere, welche die natürliche Waldgesellschaft bilden.

2.3 Nadelröte-Erkrankung älterer Fichtenbestände auf vielen Standorten in Süddeutschland unter 900 m ü. NN (rund 80 % der entsprechenden Altersklassen dieser Baumart in Süddeutschland)

Der in Süddeutschland wichtigste Erkrankungstyp der Fichte war die Nadelröte. Sie trat nur in älteren Beständen auf allen vorkommenden Gesteinen, sämtlichen Bodentypen, in hervorragend ernährten Beständen wie auch in solchen auf, die standortbedingt unter Mangel eines oder mehrerer Nährelemente leiden. Nährstoffmangel ist daher sicher kein allgemeiner und konstitutiver Streßfaktor bei dieser Erkrankung! Dagegen spricht auch der Befund, daß

junge Fichten auf gleichem Standort nicht befallen waren. Zwar beobachteten ZÖTTL und HÜTTL (1985) in betroffenen Beständen des südwestdeutschen Alpenvorlands vor allem 1983 auffallend niedrige Kalium-Spiegelwerte; im Kristallin-Schwarzwald, in Bayrisch-Schwaben und im Bayerischen Wald wie auch im Jura trat die Nadelröte aber auch in vorzüglich mit K versorgten Beständen auf. Möglicherweise war diese Depression der K-Spiegel um 1983 zumindest teilweise eher ein vorübergehendes Phänomen, ausgelöst u.a. durch den extrem heißen Juli 1983 und/oder den vorzeitigen Abfall älterer Nadeln, die deshalb nicht mehr als Nährstoffreservoir für die Translokation von K verfügbar waren. Für lehmige Substrate mit ausgeprägtem Aggregatgefüge weist HILDEBRAND (1987, 1989, 1994) eine fortgeschrittene Verarmung der Aggregataußenzonen an Kalium nach und rechnet mit verschlechterter K-Versorgung der Fichten auf großen Flächen. Nach meinen Beobachtungen in Süddeutschland sind jedoch akute K-Mängel der Fichte mit deutlichen Chlorosen nach wie vor auf die seit langem bekannten K-Mangelstandorte (Hochmoore, Ca-reiche Niedermoore, steinige, feinerdearme und flachgründige Rendzinen) oder auf stark rotfaule Bestände begrenzt; eine Ausbreitung ist bisher nicht festzustellen (vgl. auch GULDER & KÖLBEL 1993).

Die Nadelröte wird von Bodenkundlern interpretiert als eine witterungsgesteuerte Epidemie sekundärer Nadelparasiten (vor allem *Lophodermium*-Arten; REHFUESS & RODENKIRCHEN 1984, 1985, ZÖTTL & HÜTTL 1985). Vermutlich schwächten eine Serie von Frostschocks zwischen 1978/79 und 1983 ältere Nadeln so stark, daß die Schwächeparasiten die Nadeln infizieren oder – soweit es sich um Endophyten handelt – sich darin ausbreiten und sie beschleunigt abtöten konnten. Das Infektionsgeschehen wurde möglicherweise auch noch durch feuchte, niederschlagsreiche Frühsommer begünstigt. Die Epidemie brach etwa 1981 aus, fegte 1982 und 1983 wie ein Flächenbrand übers Land und nahm nach 1984 an Intensität mit Ausnahme einiger Befallsnester (z.B. in den Kalkalpen) stark ab. Gleichzeitig begann durch vermehrten Austrieb proventiver Ersatz- oder Regenerationstriebe eine kräftige Erholung, welche einen signifikanten Rückgang der Nadelverluste bewirkte. Die Nadelröte löste i.d.R. keine Zuwachsverluste aus; im Gegenteil stieg in den Befallsgebieten der Volumzuwachs in den vergangenen Jahrzehnten deutlich an.

Nach allen mir zugänglichen Beobachtungen ist deshalb davon auszugehen, daß auch eine sehr gute Versorgung der Fichten mit allen Nährelementen oder frühere, im Boden noch deutlich nachweisbare Kalkung (ALDINGER 1987) den Befall durch Nadelröte und hohe Nadelverluste nicht verhindern konnten. Diese Feststellung begrenzt das Potential für Düngungsmaßnahmen erheblich, schließt sie aber nicht völlig aus; denn der Erholungsvorgang verläuft wahrscheinlich auf nährstoffreichen und frischen Substraten rascher als auf nährstoffarmen. Deshalb kann eine gut geplante Düngung lokal auf allen jenen Standorten die Regeneration der Fichten nach Nadelrötebefall beschleunigen, wo Nährstoffmangel herrscht, nicht aber generell! Solche Nährstoffmängel lassen sich durch Nadelanalysen leicht diagnostizieren.

2.4 Kronenverlichtung der Fichte in mittleren Höhenlagen der Mittelgebirge (Odenwaldtyp) und in Küstennähe (Wingsttyp)

Der Forschungsbeirat Waldschäden/Luftverunreinigungen hat 1986 neben den drei genannten Erkrankungstypen der Fichte noch zwei weitere definiert und beschrieben: Den sogenannten Odenwald- und den Wingsttyp. Nach meiner Einschätzung werden sich beide wohl kaum auf Dauer halten lassen. Der Odenwaldtyp gehört wahrscheinlich teilweise zum Formenkreis der Nadelröte, teilweise zu jenem der Hochlagenerkrankung, die unter bestimmten Umständen (besonders Mg-armes Substrat, niederschlagsreiche Lee-Lagen von urban-industriellen Ballungsgebieten mit hohem atmogemem Säureeintrag) auch in tieferer Lage auftritt. So wurde inzwischen am Vorkommensort Wilhelmsfeld im Odenwald Mg-Mangel nachgewiesen. Der Wingst- oder Küstentyp sollte nach der ursprünglichen Arbeitshypothese

durch besonders hohen Stickstoffeintrag (als $\text{NH}_4\text{-N}$) bestimmt sein, verknüpft mit unharmonischer Ernährung und ungewöhnlichen Säureschäden an den Wurzeln. Diese Erklärung war schon aufgrund der früher vorgelegten Daten (vgl. BÜTTNER et al. 1986) nicht widerspruchsfrei. Bei einer Besichtigung der Musterbestände am Westerberg/Wingst durch die Sektion Waldernährung im Jahr 1988 zeigten die Nadelanalysen eine ausgewogene, normale bis sehr gute Nährstoffversorgung und eine kräftige Steigerung der Benadelungsdichte seit 1985. Außerdem wurde versichert, daß keine anhaltenden Zuwachsverluste vorliegen (ENDE 1989). Deshalb vermute ich, daß die vorübergehende Nadelschütte durch Vorgänge ausgelöst wurde, die ebenfalls der Nadelröte nahestehen. Düngungsmaßnahmen versprechen keinen Erfolg.

3. Tannenerkrankung

Die Erkrankung der Tanne kommt im Verbreitungsgebiet dieser Baumart sowohl auf fruchtbaren, basenreichen als auch auf sauren, nährstoffarmen Substraten nur an Altbäumen vor. Auf denselben Standorten verläuft bei Ausschluß von Wildverbiß die natürliche Verjüngung völlig problemlos, und auch Jungbestände entwickeln sich meist gut. Außerdem ist für die Tanne in Südwestdeutschland und in den Vogesen seit Beginn der 80er Jahre eine Zuwachsbeschleunigung und eine Zunahme der Benadelungsdichte seit etwa 1987 charakteristisch. Auf Nährstoffmangel beruhende Vergilbungen treten bei der Tanne stark zurück. Nichts deutet darauf hin, daß für diese Erkrankung bestimmte Ernährungsstörungen typisch und überall beteiligt sind. Nur auf einzelnen Standorten mit geringem Nährstoffangebot sind lokal (aber eben nicht generell) das Ausmaß der Nadelverluste durch Nährstoffmangel gesteigert und der Erholungsvorgang behindert, so z.B. durch Mg-Mangel und schwache Ca-Versorgung auf stark versauerten, podsolierten Standorten im Buntsandsteingebiet des nördlichen Schwarzwaldes, auf Graniten im Südschwarzwald und im Bayerischen Wald, ebenso durch K-Mangel auf Dolomit-Rendzinen in den Kalkalpen. Düngung ist folglich auch in diesem Fall kein großflächig einzusetzendes Heilmittel. Sie vermag nur örtlich zu lindern, wo zu dem noch weitgehend unbekanntem generellen Stressorenbündel erster Ordnung auch Nährstoffmangel hinzutritt (vgl. REHFUESS 1983 a und b).

4. Erkrankungen der Buche

Aus den alten Ländern der Bundesrepublik wurden bislang noch keine umfassenden Fallstudien über die Erkrankungen der Buche veröffentlicht, in denen die plausiblen, potentiellen Streßfaktoren eindeutig definiert wären. Deshalb ist es z.Zt. offen, ob und in welchem Umfang Ernährungsstörungen zu den festgestellten Blattverlusten (die örtlich ebenfalls zurückgehen) und zu den Verzweigungsanomalien beitragen. Im Hainsimsen-Buchenwald des Sollings bewirkte Kalkung zwar einen Anstieg der Ca- und Mg-Gehalte der Blätter, aber keine Erhöhung der photosynthetischen Leistungsfähigkeit (STICKAN 1989, STICKAN et al. 1993) und keinen Zuwachsanstieg (MAKOWKA et al. 1989), wohl aber höhere Chlorophyllgehalte und auch größere Fraßverluste an Blättern durch Phytophage (SCHENK et al. 1989). ZÖTTL & ENDE (1989) sowie ENDE (1991) konnten dagegen in einer Buchennaturverjüngung auf Münsterthaldegranit durch Düngung mit MgSO_4 die Mg-Mangelsymptome beseitigen und den Höhenzuwachs beschleunigen.

FLÜCKIGER et al. (1989 und 1994) fanden beim blattanalytischen Vergleich von Buchenbeständen in der Schweiz im Zeitraum 1984 – 1993 einen deutlichen Abfall der P- und Mg-Spiegelwerte, während die N-Gehalte der Blätter leicht anstiegen. Sie vermuten, dies führe zu erhöhter Anfälligkeit gegenüber abiotischen Stressoren wie z.B. Frost und Pathogenen. Noch ist nicht sicher zu entscheiden, ob es sich dabei um die normale, witterungsgesteuerte Varia-

tion der Elementspiegel von Jahr zu Jahr oder aber um einen langfristigen Trend handelt (Abb. 3).

Die vielen offenen Fragen erlauben z.Zt. noch kein Urteil darüber, unter welchen Voraussetzungen die Düngung schütterere Buchen revitalisiert. Viele Beobachtungen und Literaturvergleiche weisen darauf hin, daß sowohl die Belaubungsdefizite als auch die Bast- und Kambiumschäden exponierter, älterer Buchen vor allem durch Frosteffekte zwischen 1978/79 und 1985 sowie nachfolgenden Insekten- und Pilzbefall ausgelöst wurden (vgl. KOLBE 1986, V. DUBBEL, 1991, LEIBUNDGUT & FRICK 1943). Die Arbeitshypothese ist plausibel, daß eine gegenüber früher verbesserte Ernährung mit Stickstoff einhergeht mit schlechterer K- und/oder Mg-Versorgung und damit die Frostanfälligkeit steigt. Diese Hypothese ist jedoch bisher noch nicht konkret untersucht und schon gar nicht verifiziert worden.

Dieser Befund läßt vorläufig wenig Raum für einen sinnvollen, großflächigen Einsatz der Düngung in (vorübergehend) teilweise entlaubten Buchenbeständen.

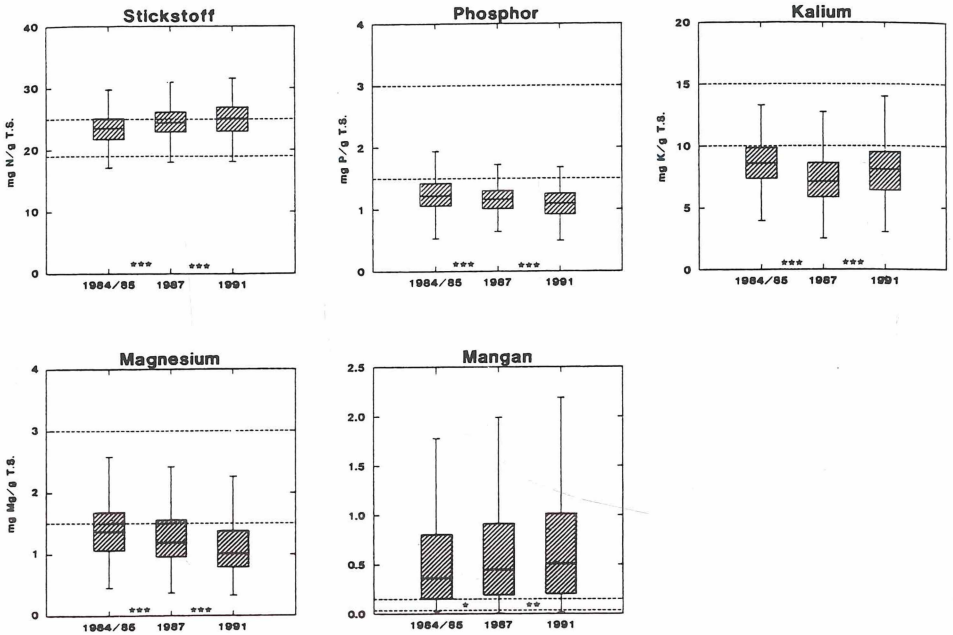


Abb. 3: Gehalt von Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium und Mangan im Buchenlaub (Trocken- substanz, TS) der drei Ernten 1984/85, 1987 und 1991. Daten von den gleichen 326 in allen drei Jahren beerdeten Bäumen an 51 Standorten. Die schraffierte Box enthält 50% der Werte, mit dem Zentralwert (Median) als Querstrich (SYGRAPH-Boxplot, WILKINSON 1990). Die gestrichelten Linien sind die Grenzen des ausreichenden Versorgungsbereiches nach Bergmann (1993) (aus FLÜCKIGER & BRAUN 1994).

5. Eichenerkrankungen

Ende Oktober 1991 führte die Kommission für Ökologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften jene Forscher zu einem Rundgespräch zusammen, die sich in Mitteleuropa in umfassenden Fallstudien mit den Erkrankungen von Eichen beschäftigten. Der intensive Gedankenaustausch führte zu folgenden Ergebnissen:

In den Stiel- und Traubeneichenwäldern zwischen Frankreich und Rumänien, Norddeutschland und der Schweiz treten mehrere Erkrankungstypen auf, die sich nach ihrem Verlauf, nach ihren Symptomen und ihren Ursachenbündeln deutlich voneinander unterscheiden. Bei keiner dieser Erkrankungen wurden bislang Luftschadstoffe als maßgebliche Stressoren nachgewiesen, weder in ihrer Wirkung auf die Blätter noch im Hinblick auf mittelbare Effekte über den Boden. Die bisherigen Ergebnisse eines umfangreichen Forschungsprojektes über Eichenschäden in Österreich weisen in dieselbe Richtung (HAGER, pers. Mitt. 1994). Die meisten Forscher setzen auf verschiedenartigen Witterungsstreß als Auslöser dieser häufig komplexen und langwierigen Erkrankungen bzw. Syndrome. Dabei kann es sich je nach Waldregion und Schadtyp um Spätfröste zur Zeit des Austriebs, extreme Wintertemperaturen oder ungewöhnliche Folgen von Trockenjahren (bzw. Grundwasserabsenkung) handeln. Sie setzen offensichtlich die Vitalität der Eichen herab und fördern blattfressende Insekten. Wiederholter Kahlfraß induziert eine weitere Vitalitätsschwächung, die u.a. Eichen-Prachtkäfer, pilzliche Bast- und Blattparasiten sowie Wurzelparasiten wie der Hallimasch (und *Phytophthora*-Arten?) ausnutzen, um die betroffenen Bäume weiter zu schwächen oder abzutöten. Ungünstige Bodenverhältnisse wie Dichtlagerung und Staunässe oder Grundwasserabsenkungen sind regional beteiligt und teils natürlich, teils anthropogen bedingt (DONAUBAUER 1993, BALDER 1993, BLANK & HARTMANN 1993, REINDL 1993, VARGA 1993, LANDMANN et al. 1993, HEILIG et al. 1995).

In keiner der damals vorgestellten und intensiv diskutierten Fallstudien findet sich der Nachweis, daß ungenügende Nährstoff-Versorgung eine maßgebliche prädisponierende, auslösende oder verstärkende Wirkung bei einem dieser Erkrankungstypen hat (vgl. BALDER et al. 1992, BALDER 1993, REINDL 1993, KANDLER & SENSER 1993). Die in einem Düngungsexperiment zu Traubeneichen auf stark versauerten Buntsandsteinstandorten in Unterfranken ausgebrachte Dolomitgabe verbesserte den Kronenzustand der Eichen bisher nicht (ZOLLNER 1994, pers. Mitt.). Deshalb spricht bisher nichts dafür, daß Nährstoffmangel als konstituierendes Element an einer dieser Eichenschädigungen mitwirkt. Eine Vitalisierung durch Düngungsmaßnahmen ist deshalb nur dort zu erwarten, wo Nährelementmängel in allgemeiner, unspezifischer und bislang weitgehend unbekannter Weise die Abwehrmechanismen der Eichen beeinträchtigen.

6. Kalkung

Bei den bisherigen Ausführungen behandelte ich Düngung ausschließlich als unmittelbare Nährstoffzufuhr für mangelhaft versorgte Bäume mit dem Ziel, diesen Mangel zu beheben.

Daneben werden für saure Substrate großflächige sogenannte Kompensations-Kalkungen mit dolomitischen Kalken (gelegentlich ergänzt durch Phosphat) empfohlen. Sie bezwecken, im Oberboden (organische Auflage und Mineralboden bis ca. 30 cm Tiefe) den pH-Wert, den Basensättigungsgrad sowie die Vorräte an austauschbarem Mg und Ca zu steigern, die Pufferkapazität gegenüber Säuren in Form von carbonatisch gebundenem und austauschbarem Ca und Mg zu erhöhen, den Streuumsatz und den Nährstoffkreislauf zu beschleunigen, die Humusform und das Nährstoffangebot langfristig zu verbessern, potentiell schädliche Elemente wie Al und Mn auszufällen und auf diese Weise die Vitalität der Bäume zu steigern. Diese Maßnahme wird in einzelnen Bundesländern bereits in großem Umfang durchgeführt.

In Bayern geht man dagegen nur sehr zurückhaltend vor und empfiehlt sorgfältige standorts- und waldernährungskundliche Diagnosen vor Durchführung solcher Kalkungen. Sie sind auf bestimmten Standorten vorteilhaft; auf anderen bergen sie ökologische Risiken. Diese Vorsicht gründet auf folgenden Befunden und Überlegungen:

- Es ist zwar plausibel anzunehmen, daß hoher atmogener Eintrag von S und N auf durchlässigen Standorten vor allem der höheren Mittelgebirgslagen die Auswaschung von Basen-Kationen und die Versauerung vorantreibt. Das genaue Ausmaß der regional noch immer stark variierenden Säuredeposition, der dadurch ausgelösten Verluste an Ca und Mg(K) und anderer nachteiliger Effekte im einzelnen ist jedoch häufig unbekannt. Saure Deposition kann, muß aber nicht in jedem Fall Basen-Kationen-Verluste induzieren. Auch die Pufferkapazitäten sind nur unzureichend bekannt; insbesondere wurde bislang die Pufferkapazität des Auflagehumus i.d.R. erheblich unterschätzt.
- Die von der Göttinger Schule vorgeschlagenen neuen Entscheidungskriterien für die Planung von Kalkungen haben sich nach unseren Erfahrungen in Fichten-, Kiefern-, Tannen- und Buchenbeständen nicht bewährt. Im Gegenteil zeigte die Auswertung von Meliorationsversuchen zu Kiefer in der Oberpfalz, daß insbesondere die für die Bodenlösung (Gleichgewichtsbodenlösung, Wasserextrakte, Saugkerzenwässer) angegebenen Grenzzahlen unbrauchbar sind, weil man sie aus kurzfristigen Nährlösungsexperimenten mit jungen mykorrhizafreien Fichten und Buchen abgeleitet hat (FRANCKE-CAMPANA et al. 1987, REHFUESS 1988 und 1989, EBBEN 1989, ZÖTTL 1994, pers.Mitt., KREUTZER 1994).
- Bisher deutet nichts darauf hin, daß sich die Verhältnisse für die Streuzersetzung als Folge einer allenfalls stattgefundenen Versauerung generell verschlechtert hätten. Ganz im Gegenteil legen blattanalytische Untersuchungen (Anstieg der N- und teilweise auch der P-Spiegelwerte auf ungedüngten Standorten; vgl. Abb. 4 und 5), vegetationskundliche Befunde (z.B. BÄUML 1989, HERTEL 1989, ROST-SIEBERT & JAHN 1988) und bodenchemische Studien (v. ZEWSCHWITZ 1985) den Schluß nahe, daß viele Humusformen gegenüber früher biologisch aktiver und N-reicher wurden.
Auch die N-Mineralisation, die Nitrifikation und der Stickstoff-Umsatz dürften als Folge des überall erhöhten N-Eintrags sogar unter sehr sauren Bedingungen zugenommen haben, möglicherweise auch gefördert durch günstige Witterung in den 80er Jahren. Diese Entwicklung dürfte sich vorläufig fortsetzen.
- Auf durchlässigen Standorten mit stickstoffreichen Auflagehumusformen verstärkt Kalkung die N-Mineralisation soweit, daß die schon gut versorgte Bestockung und die Bodenvegetation das zusätzliche Angebot nicht aufnehmen und im Ökosystem halten können. Damit steigt aber die Gefahr von Nitrifikation, Nitrat auswaschung und Nitratkontamination von Grundwasser und Oberflächenabfluß, und dieses Risiko wird sich bei anhaltendem atmogenen N-Eintrag ausbreiten (vgl. KREUTZER et al. 1989, 1991, ZECH u. Mitarb. 1989, WIEDEY & ULRICH 1989, MATZNER et al. 1989, IBROM & RUNGE 1989, KAUPENJOHANN 1989).
- Entgegen früheren Befürchtungen gelang es bisher nicht nachzuweisen, daß auf sauren Substraten wirklich neuartige Schäden am Feinwurzelsystem unserer Hauptbaumarten und eine Verflachung des Wurzelwerks auftreten, die auf toxischen Effekten von Al, Mn und/oder H beruhen. Die auf solchen Böden beobachteten Feinwurzeldefekte können zwanglos durch Mg- bzw. Ca-Mangel sowie durch die Tatsache erklärt werden, daß auf solchen Standorten das Stickstoffangebot besonders stark im Oberboden konzentriert ist (GONZALEZ et al. 1989 a, RASPE 1992). Die beobachteten Störungen des Wurzelsystems lassen sich durch relativ geringe Gaben von CaMg-Sulfat oder -Carbonat beseitigen; ein kräftiges Aufkalken des Unterbodens, das nur über tiefreichende Bodenbearbeitung möglich wäre, ist nicht erforderlich (REHFUESS 1988, 1989). Eine solche Gewaltmelioration würde die Auswaschung von Nitrat, Basen-Kationen und Aluminium enorm steigern (WENZEL & ULRICH 1989, MATZNER et al. 1989). I.ü. belegen ältere und neue Studien (vgl. RASPE 1992), daß gerade Kalkungen die Fichte dazu veranlassen, ihre Feinwurzeln im humosen Oberboden zu konzentrieren.

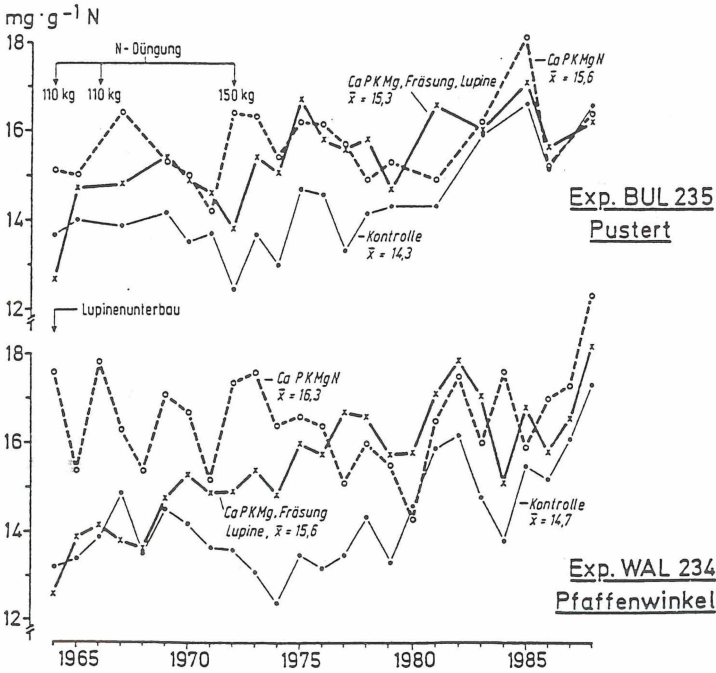


Abb. 4: Zeitliche Veränderungen der N-Spiegelwerte in den 1/2-jährigen Nadeln von Kiefernbeständen in Oberpfälzer Meliorationsexperimenten.

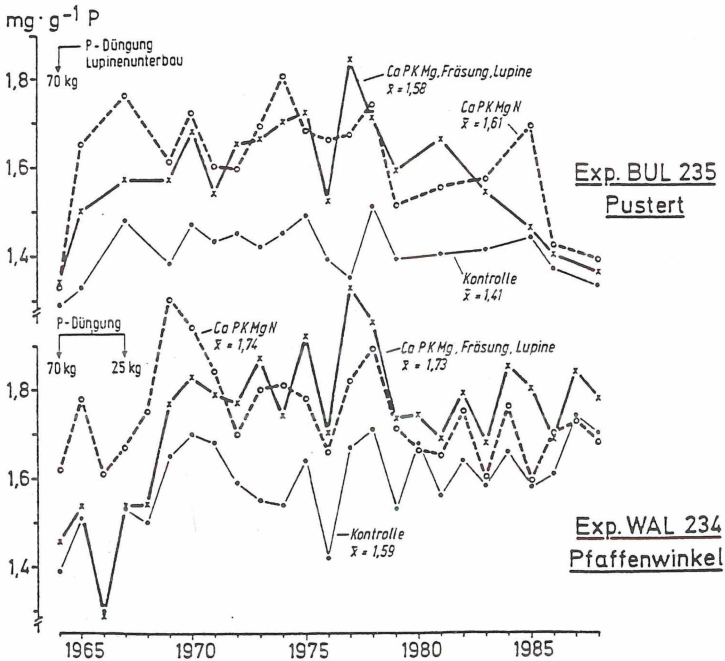


Abb. 5: Zeitliche Veränderungen der P-Spiegelwerte in den 1/2-jährigen Nadeln von Kiefernbeständen in Oberpfälzer Meliorationsexperimenten.

Aus diesen Gründen halte ich Meliorationskalkungen auf Standorten der Hauptbaumarten nur dann für angebracht, wenn die herkömmlichen, seit Jahrzehnten bewährten Kriterien erfüllt sind. Demnach müssen zusammenfallen:

- Tiefer pH-Wert und geringe Basensättigung im Oberboden, die nicht durch hohe Gehalte an Basen-Kationen im noch durchwurzelten Unterboden ausgeglichen werden,
- ungünstiger, biologisch inaktiver, feinhumusarmer Moder und Rohhumus, der scharf vom Mineralboden abgegrenzt ist,
- eine zwergstrauchreiche, gras- und kräuterarme, durch saure Moose gekennzeichnete Bodenvegetation, die auf Mangel an Basen-Kationen und Stickstoff hinweist und außerdem
- Stickstoffmangel (nachgewiesen durch Blattanalysen!) und deshalb unbefriedigendes Wachstum der Bestockung (vgl. Düngerichtlinien 1987 für den Bayerischen Staatswald).

Nur wo mehrere dieser Merkmale kombiniert auftreten, kann man sicher sein, daß Kalkung keine ökologisch unerwünschten Nebenwirkungen auslöst. Auf solchen Substraten ist sie nach wie vor ein hervorragendes Meliorationsverfahren und insbesondere dann angezeigt, wenn Fichten- oder Kiefernreinbestände in laubbaumreiche Mischbestände überführt werden sollen. Bei der Planung solcher Meliorationskalkungen muß selbstverständlich berücksichtigt werden, daß diese Maßnahmen zu Veränderungen in der Artenstruktur von Vegetation und Fauna führen. Viele Waldökosysteme auf sauren (devastierten) Standorten leiden unter Nährstoffmängeln, sind aber trotzdem stabil und im Sinne der Biodiversität erhaltungswürdig.

7. Schlußfolgerungen

Die differenzierte Übersicht über die Chancen von Düngung und Kalkung zum Abmildern sogenannter „neuartiger“ Waldschäden läßt sich in wenigen Sätzen zusammenfassen. Sie drücken nur die jahrzehntelange Erfahrung der Waldernährungslehre und Meliorationspraxis und somit eigentlich eine Binsenwahrheit aus:

Beide Eingriffe sind mit Sicherheit kein Allheilmittel! Gezielt eingesetzt als spezifisches und sorgfältig bemessenes Therapeutikum werden sie jedoch auf begrenzter Fläche bei den wenigen Erkrankungstypen die Blattmasse von Nadel- und Laubbaumarten vermehren und Mangel-Chlorosen beseitigen, bei denen Ernährungsstörungen nachweislich zum Syndrom gehören. Auch bei Blattverlusten, welche unabhängig vom Ernährungszustand durch andersartige biotische oder abiotische Ursachen ausgelöst wurden, können Düngung und Kalkung die Erholung und das Wiederauffüllen der Kronen auf jenen Standorten fördern, wo Nährstoffmängel zu beseitigen sind.

8. Literatur

- ALDINGER, E. (1987): Elementgehalte im Boden und in Nadeln verschieden stark geschädigter Fichten-Tannenbestände auf Praxiskalkungsflächen im Buntsandstein-Schwarzwald. – Freiburger Bodenkundl. Abh. 19.
- BÄUML, S. (1989): Pflanzensoziologische Untersuchungen in Oberpfälzer Kiefernbeständen unter dem Aspekt depositionsbedingter Veränderungen. – Dipl.Arbeit Univ. München.
- BALDER, H., D. DUJESIEFKEN & E. KILZ (1992): Nähr- und Schadstoffeinträge in die Berliner Forsten – prädisponierende Faktoren für die Eichenerkrankung? -In: Senatsverw. f. Stadtentwicklung u. Umweltschutz) 2: 53-60.
- BALDER, H. (1993): Absterbeerscheinungen an Eichen – Symptome, Ursachen und Verbreitung. – In: Rundgespräche der Kommission für Ökologie Nr. 5 (Her. Bayer. Akad. d. Wiss.): 33-43. Verlag Dr. F. Pfeil. München

- BLANK, L.W., H.D. PAYER, T. PFIRRMANN & K.E. REHFUESS (1989): Effects of ozone, acid mist and soil characteristics on clonal Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) – overall results and conclusions of the joint long-term exposure experiment. – Environm. Pollution **64**: 189-207.
- BLANK, R. & G. HARTMANN (1993): Eichensterben in Norddeutschland – Symptomatik und mögliche Ursachen. – In: Rundgespräche der Kommission für Ökologie Nr. 5 (Her. Bayer. Akad. d. Wiss.): 45-56. Verlag Dr. F. Pfeil. München.
- BOSCH, CHR., E. PFANNKUCH, U. BAUM & K.E. REHFUESS (1983): Über die Erkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst.) in den Hochlagen des Bayerischen Waldes. – Forstwiss. Centralbl. **102**: 167-181.
- BOSCH, CHR. et al. (1986): Einfluß einer Düngung mit Magnesium und Calcium, von Ozon und saurem Nebel auf Frosthärte, Ernährungszustand und Biomasseproduktion junger Fichten (*Picea abies* L. Karst.). – Forstwiss. Centralbl. **105**: 218-229.
- BOSCH, CHR. & K.E. REHFUESS (1986): Die Erkrankung der Fichte in den Hochlagen des Bayerischen Waldes – ein diagnostischer Düngungsversuch. – Tag. Ber. IMA – Querschnittseminar „Restabilisierungsmaßnahmen – Düngung“, KfK-PEF: 15-20.
- BOSCH, Chr. (1986): Standorts- und ernährungskundliche Untersuchungen zu den Erkrankungen der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) in höheren Gebirgslagen. – Forstl. Forschungsber. München **75**.
- BÜTTNER, G., N. LAMERSDORF, R. SCHULTZ & B. ULRICH (1986): Deposition und Verteilung chemischer Elemente in küstennahen Waldstandorten – Fallstudie Wingst, Abschlußbericht. – Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme/Waldsterben, Reihe B1.
- DONAUBAUER, E. (1993): Zustand und Gefährdung der Laubwälder. – In: Rundgespräche der Kommission für Ökologie Nr. 5 (Her. Bayer. Akad. d. Wiss.): 13-20. Verlag Dr. F. Pfeil. München.
- DUBBEL, V. (1991): Frostschäden an Altbuchen. – Mitt. Deutsch. Phytomed. Ges. **21** (1): 35.
- EBBEN, U. (1989): Die toxische Wirkung von Aluminium auf das Wurzelwachstum der Buche. – Allgem. Forstzeitschr. **44**: 781-783.
- ELLENBERG, H. (1995): Allgemeines Waldsterben – ein Konstrukt? – Naturw. Rdsch. **48**: 93-96.
- ENDE, H.P. (1989): Wirkung hoher Stickstoffeinträge auf Waldökosysteme. – Forst u. Holz **44**: 176-183.
- ENDE, H.-P. (1991): Wirkung von Mineraldünger in Buchen- und Fichtenbeständen des Grundgebirgs-Schwarzwalds. – Freiburger Bodenkundl. Abh., Heft 27.
- EVERS, F.H. (1979): Über bleibende Differenzierungen im Mineralstoffgehalt der Nadeln bei verschiedenen Klonen der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.). – Mitt. Ver. f. Forstl. Standortkunde u. Forstpflanzenzüchtung **27**: 60-64.
- EVERS, F.H. (1994): Magnesiummangel, eine verbreitete Erscheinung in Waldbeständen – Symptome und analytische Schwellenwerte. – Mitt. Ver. Forstl. Standortskde. u. Forstpflanzenzüchtung **37**: 7-16.
- FEGER, K.H. (1992): Bedeutung von ökosysteminternen Umsätzen und Nutzungseingriffen für den Stoffhaushalt von Waldlandschaften. – Freiburger Bodenkundl. Abh., Heft 31.
- FLÜCKIGER, W. & S. BRAUN (1989): Waldschadensbericht. Untersuchungen in Buchenbeobachtungsflächen 1984-1988. – Eigenverlag.
- FLÜCKIGER, W. & S. BRAUN (1994): Waldschadensbericht – Untersuchungen in Buchenbeobachtungsflächen 1984 – 1993. – Inst. f. Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch/Schweiz.
- FÖRSTER, H. (1988): Bodenkundliche und hydrologisch-hydrochemische Untersuchungen in ausgewählten Hochlagegebieten des Inneren Bayerischen Waldes. – Diss. Univ. München.
- FORSCHUNGSBEIRAT WALDSCHÄDEN/LUFTVERUNREINIGUNGEN DER BUNDES-REGIERUNG UND DER LÄNDER (1986): 2. Bericht. Mai 1986.
- FRANCKE-CAMPANA, S., F. MAKESCHIN & K.E. REHFUESS (1987): Über die Eignung verschiedener Bodenanalysen-Verfahren zum Nachweis von Meliorationseffekten und zur Bestimmung des Kalkungsbedarfs in Kiefernbeständen. – Allgem. Forst- u. Jagdzgt. **158**: 156-164.
- GONZALEZ CASCON, M., M. ALCUBILLA & K.E. REHFUESS (1989 a): Entwicklung von Tannensämlingen (*Abies alba* Mill.) in Abhängigkeit von der Basensättigung natürlicher Substrate. – Allgem. Forst- u. Jagdzgt. **160**: 233-241.
- GONZALEZ CASCON, M., M. ALCUBILLA & K.E. REHFUESS (1989 b): Wirkungen von Magnesium- und Calcium-Sulfat und -Carbonat auf Sproß- und Wurzelentwicklung junger Weißtannen (*Abies alba* Mill.) im Topfversuch. – Allgem. Forst- u. Jagdzgt. **161**: 21-29.

- GULDER, H.-J. & M. KÖLBEL (1992): Waldbodeninventur in Bayern. – Forstl. Forschungsberichte München **132**.
- HEILIG, M., H. SCHUME, W. GROSSMANN & H. HAGER (1995): 4. Zwischenbericht zur Forschungs-Initiative II Eiche, Wien.
- HERTEL, H. (1989): Vegetationskundliche Untersuchungen an der Waldvegetation des Forstamtsbezirks Waldsassen und seiner Umgebung unter dem Aspekt zeitlicher Veränderungen zwischen 1946 und 1987 und immissionsbedingter Einflüsse. – Dipl.Arbeit Univ. München.
- HILDEBRAND, E.E. (1987): Zustand und Entwicklung chemischer Eigenschaften von Mineralböden aus Standorten mit erkrankten Waldbeständen. – Forschungsbericht KfK-PEF **28**.
- HILDEBRAND, E.E. (1990): Die Bedeutung der Bodenstruktur für die Waldernährung, dargestellt am Beispiel des Kaliums. – Forstwiss. Centralbl. **109**: 2-12.
- HILDEBRAND, E.E. (1994): The heterogeneous distribution of mobile ions in the rhizosphere of acid forest soils – Facts, causes and consequences. – J. Environ. Sci Health, A **29** (9): 1973-1992.
- HOFMANN-SCHIELLE, C. (1988): Bodenkundliche Untersuchungen in den Hochlagen des Bayerischen Waldes unter besonderer Berücksichtigung des Mineralkörpers. – Diss. Univ. München 1988.
- HOFMANN-SCHIELLE, C., H. FÖRSTER & K.E. REHFUESS (1994): Bodenkundliche und hydrologische Untersuchungen in den Hochlagen des inneren Bayerischen Waldes – ein Beitrag zur Aufklärung der montanen Vergilbung von Fichtenbeständen. – Forstl. Forschungsber. München Nr. **139**.
- HÜTTL, R. (1985): „Neuartige“ Waldschäden und Nährelementversorgung von Fichtenbeständen (*Picea abies* Karst.) in Südwestdeutschland. – Freiburger Bodenkundl. Abh. **16**.
- HÜTTL, F.H. (1989): Neuartige Waldschäden aus dem Blickwinkel der Waldernährungslehre. – Kali-Briefe **19** (6): 367-389.
- IBROM, A. & M. RUNGE (1989): Die N-Mineralisation im Boden eines Sauerhumusbuchenwaldes unter dem Einfluß von Kalkung oder N-Düngung. – Posterbeitrag Intern. Kongreß Waldschadensforschung Friedrichshafen.
- KANDLER, O. (1988): Epidemiologische Bewertung der Waldschadenserhebungen 1983 bis 1987 in der Bundesrepublik Deutschland. – Allgem. Forst- u. Jagdztg. **159**: 179-194.
- KANDLER, O. (1994): 14 Jahre Waldschadensdiskussion. – Naturwissenschaftl. Rundschau **47**: 419-430.
- KANDLER, O. & M. SENSER (1993): Eichenvergilbung im Raum München – eine Fallstudie. – In: Rundgespräche der Kommission für Ökologie Nr. 5 (Her. Bayer. Akad. d. Wiss.): 153-168. Verlag Dr. F. Pfeil. München.
- KAUPENJOHANN, M. (1989): Chemischer Bodenzustand und Nährelementversorgung immissionsbelasteter Fichtenbestände in NO-Bayern. – Bayreuther Bodenkundl. Ber. **11**.
- KAUPENJOHANN, M. (1995): Magnesium deficiency in forest ecosystems. – Manuskript.
- KAUPENJOHANN, M., W. ZECH, R. HANTSCHERL & R. HORN (1987): Ergebnisse von Düngungsversuchen mit Magnesium an vermutlich immissionsgeschädigten Fichten (*Picea abies* L. Karst.) im Fichtelgebirge. – Forstwiss. Centralbl. **106**: 78-84.
- KOLBE, W. (1986): Auswirkungen der Winterfröste im Januar/Februar 1985 auf Obstbau und Pflanzenschutz im Vergleich zu strengen Wintern früherer Zeiten. – Erwerbsobstbau **27**: 286-296.
- KREUTZER, K. (1994): Folgerungen aus der Höglwaldforschung. – Allgem. Forstzeitschrift **49**: 769-774.
- KREUTZER, K., A. GÖTTLEIN & P. PRÖBSTLE (1991): Dynamik und chemische Auswirkungen der Auflösung von Dolomitmalk unter Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.). – In: Ökosystemforschung Höglwald (her. K. KREUTZER & A. GÖTTLEIN). 186-204. Verlag P. Parey. Hamburg u. Berlin.
- KREUTZER, K. & K. HEIL (1989) Untersuchungen zum Stoffhaushalt in einem Fichtenbestand (*Picea abies* Karst.) der Hochlagen des Bayerischen Waldes. – Proc. 1. Statusseminar „Waldschäden“ München-Neuherberg, GSF-Bericht **6**: 51-60.
- KREUTZER, K., P. PRÖBSTLE, A. GÖTTLEIN & R. SCHIERL (1989): Höglwald-Project – Acid deposition and compensatory liming in a Norway spruce stand. – Excursion Guide.
- LANDMANN, G., M. BECKER, C. DELATOUR, E. DREYER & J.L. DUPOUEY (1993): Oak dieback in France: historical and recent records, possible causes, current investigations. – In: Rundgespräche der Kommission für Ökologie Nr. 5 (Her. Bayer. Akad. d. Wiss.): 97-114. Verlag Dr. F. Pfeil. München.
- LANGE, O.L., R.M. WEIKERT, M. WEDLER, J. GEBEL & U. HEBER (1989): Photosynthese und Nährstoff-

- versorgung von Fichten aus einem Waldschadensgebiet auf basenarmem Untergrund. – AFZ **44**: 55-64.
- LEIBUNDGUT, H. & L. FRICK (1943): Eine Buchenkrankheit im Schweizerischen Mittelland. – Schweiz. Zeitschr. Forstw. **94** (10): 295-306.
- LIU, J.C., T. KELLER, H.H. RUNKEL & H.D. PAYER (1994): Bodenkundliche Untersuchungen zu Ursachen des Nadelverlusts der Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) auf Kalkstandorten der Alpen. – Forstwiss. Centralbl. **113**: 86-100.
- LIU, J.C. & P. TRÜBY (1989): Bodenanalytische Diagnose von K- und Mg-Mangel in Fichtenbeständen (*Picea abies* Karst.). – Z. Pflanzenernähr. Bodenk. **152**: 307-311.
- LÖCHELT, S., MOOSMAYER, H.U. & K.E. REHFUESS (1994): Bestimmung der genetischen Konstitution von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) mit unterschiedlich ausgeprägten Vergilbungsgraden auf mehreren Waldgebieten. – Forstwiss. Centralbl. **113**: 236-244.
- MAKOWKA, I., M. WORBES, W. STICKAN & M. RUNGE (1989): Trendanalyse der Jahrringbreiten von Buchen (*Fagus sylvatica* L.). Untersuchungen in einem *Luzulo-Fagetum* des Sollings. – Posterbeitrag Intern. Kongreß Waldschadensforschung Friedrichshafen.
- MATZNER, E., K.J. MEIWES & B. ULRICH (1989): Auswirkung von Oberflächenkalkung auf Buchen- und Fichtenökosysteme im Solling. – Posterbeitrag Intern. Kongreß Waldschadensforschung Friedrichshafen.
- NEBE, W., H.J. FIEDLER, G. ILGEN & W. HOFMANN (1987): Immissionsbedingte Ernährungsstörungen der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) in Mittelgebirgslagen. – Flora **179**: 453-462.
- RASPE, S. (1992): Biomasse und Mineralstoffgehalte der Wurzeln von Fichtenbeständen (*Picea abies* Karst.) des Schwarzwalds und Veränderungen nach Düngung. – Freiburger Bodenkundl. Abh. Heft **29**.
- REHFUESS, K.E. (1983 a): Walderkrankungen und Immissionen – eine Zwischenbilanz. – Allgem. Forstzeitschrift **38**: 601-610.
- REHFUESS, K.E. (1983 b): Ernährungsstörungen als Ursache der Walderkrankungen. – Kali-Briefe (Büntehof) **16** (9): 549-563.
- REHFUESS, K.E. (1988): Über die bodenkundliche Forschung in Zusammenhang mit den neuartigen Waldschäden. – KfK-PEF-Bericht **35**: 1-26.
- REHFUESS, K.E. (1989): Bodenkundliche Forschung im Zusammenhang mit den neuartigen Waldschäden – Entgegnung auf eine Stellungnahme von B. Ulrich in AFZ 43. – AFZ **44**: 390-396.
- REHFUESS, K.E. & CHR. BOSCH (1986): Experimentelle Untersuchungen zur Erkrankung der Fichte (*Picea abies* L. Karst.) auf sauren Böden der Hochlagen: Arbeitshypothese und Versuchsplan. – Forstwiss. Centralbl. **105**: 201-206.
- REHFUESS, K.E. & H. RODENKIRCHEN (1984): Über die Nadelröteerkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst.) in Süddeutschland. – Forstwiss. Cbl. **103**: 245-262.
- REHFUESS, K.E. & H. RODENKIRCHEN (1985): Über die Nadelröteerkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst.) in Süddeutschland – Entgegnung auf kritische Stellungnahmen von P. Schütt sowie H. Butin u. Chr. Wagner. – Forstwiss. Centralbl. **104**: 318-329.
- REINDL, J. (199): Eichenschäden in Bayern – Situation und Fragen nach den Ursachen. – In: Rundgespräche der Kommission für Ökologie Nr. 5 (Her. Bayer. Akad. d. Wiss.): 59 – 68. Verlag Dr. F. Pfeil. München.
- ROBERTS, T.M. R.A. SKEFFINGTON & L.W. BLANK (1989): Causes of type 1 spruce decline in Europe. – Forestry **62**: 179-222.
- ROST-SIEBERT, K. & G. JAHN (1988): Veränderungen der Waldbodenvegetation während der letzten Jahrzehnte – Eignung zur Bioindikation von Immissionswirkungen. – Forst- u. Holzwirt **43**: 75-81.
- SAUTER, U. (1989): Düngung zur Vitalisierung neuartig geschädigter Waldbestände in Bayern. – Kali-Briefe **19** (6): 443-459.
- SAUTER, U. (1991): Versuche zur Wirkung von sulfatisch, carbonatisch und silikatisch gebundenem Magnesium auf Ernährungszustand und Wachstum junger Fichten, chemischen Bodenzustand und Sickerwasserbefruchtung. – Forstl. Forschungsber. München Nr. **114**.
- SKELLY, J.M. & J.L. INNES (1994): Waldsterben in the forests of Central Europe and Eastern North Ame-

- rica: Fantasy or reality? – Plant Disease **78**: 1021-1032.
- SCHENK, J., W. STICKAN, & M. RUNGE (1989): Phänologie und Blattmorphologie von Buchen (*Fagus sylvatica* L.) unter dem Einfluß von Kalkung oder N-Düngung. Untersuchungen in einem *Luzulo-Fagetum* des Solling. – Posterbeitrag Intern. Kongreß Waldschadensforschung Friedrichshafen.
- SCHLÄPFER, R. (ed.) (1993): Long-term implications of climate change and air pollution on forest ecosystems. – Progress Report of a IUFRO Task Force, IUFRO World Series Vol. 4. Vienna.
- STICKAN, W. (1989): Der Gaswechsel von *Fagus sylvatica* L. unter dem Einfluß von Kalkung und N-Düngung. Untersuchungen in einem *Luzulo-Fagetum* des Sollings. – Posterbeitrag Intern. Kongreß Waldschadensforschung Friedrichshafen.
- STICKAN, W., M. SCHULTE & M. RUNGE (1993): Bodenversauerung und Photosynthese von Buchen. Ergebnisse von Zeitvergleichen und einem Düngungsversuch. – Rundgespräche der Kommission für Ökologie Nr. 5 (Her. Bayer. Akad. d. Wiss.): 115-127. Verlag Dr. F. Pfeil. München.
- STURM, H., A. BUCHNER & K. ISERMANN (1987): Prüfung geeigneter Düngungsmaßnahmen, insbesondere mit Magnesium, Kalk und Kalium zur Behebung der im Zusammenhang mit immissionsbedingten Waldschäden auftretenden Nährstoffmangelerscheinungen. – Tag.Ber. Statusseminar Jülich v. 30.3.-3.4.1987: 259-262.
- TÜRK, T. (1992): Die Wasser- und Stoffdynamik in zwei unterschiedlich geschädigten Fichtenstandorten im Fichtelgebirge. – Bayreuther Bodenkundl. Ber. **22**.
- VARGA, F. (1993): Epidemiologie und Ursachen der Eichenerkrankungen in Ungarn. – In: Rundgespräche der Kommission für Ökologie Nr. 5 (Her. Bayer. Akad. d. Wiss.): 85-88. Verlag Dr. F. Pfeil. München.
- WENZEL, B. & B. ULRICH (1989): Auswirkungen einer Optimierung des Bodenzustands durch Meliorationskalkung. Verbindung mit Bodenbearbeitung. – Posterbeitrag Intern. Kongreß Waldschadensforschung Friedrichshafen.
- WIEDEY, K. & B. ULRICH (1989): Effect of liming and fertilization on a 70-year-old-spruce stand. – Posterbeitrag Intern. Kongreß Waldschadensforschung Friedrichshafen.
- ZECH, W., M. KAUPENJOHANN, B.U. SCHNEIDER & W. SCHAAF (1989): Forest decline in the Fichtelgebirge. – Field Excursion Guide 14.7.1989.
- ZECH, W. & E. POPP (1983): Magnesiummangel, einer der Gründe für das Fichten- und Tannensterben in NO-Bayern. – Forstwiss. Centralbl. **102**: 50-55.
- ZEZSCHWITZ v., E. (1985): Immissionsbedingte Änderungen analytischer Kennwerte nordwestdeutscher Mittelgebirgsböden. – Geol. Jahrbuch **F 20**: 3-41.
- ZÖTTL, H.W. (1985): Waldschäden und Nährelementversorgung. – Düsseldorfer Geobot. Kolloq. **2**: 31-41.
- ZÖTTL, H.W. & H.-P. ENDE (1989): Wirkung einer Düngung mit MgSO₄ auf den Ernährungs- und Gesundheitszustand einer Buchen-Naturverjüngung. – Posterbeitrag Intern. Kongreß Waldschadensforschung Friedrichshafen.
- ZÖTTL, H.W. & R. HÜTTL (1985): Schadsymptome und Ernährungszustand von Fichtenbeständen im südwestdeutschen Alpenvorland. – Allgem. Forstzeitschrift **40**: 197-199.
- ZÖTTL, H.W., R.F. HÜTTL, J. LIU & H.P. ENDE (1987): Diagnostische Düngungsversuche in immissionsgeschädigten Waldgebieten. – Statusseminar KfA Jülich, 30.3.-3.4.1987: 263-266.
- ZÖTTL, H.W. & E. MIES (1983): Die Fichtenerkrankung in den Hochlagen des Südschwarzwaldes. – Allgem. Forst- und Jagdztg. **154**: 110-114.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Karl-Eugen Rehfuess, Univ. München, Lehrstuhl für Bodenkunde und Standortlehre, Hohenbachernstr. 22, D-85354 Freising

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft](#)

Jahr/Year: 1995

Band/Volume: [7](#)

Autor(en)/Author(s): Rehfuess Karl E.

Artikel/Article: [Gefährdung der Wälder in Mitteleuropa durch Luftschadstoffe und Möglichkeiten der Revitalisierung durch Düngung 141-156](#)