

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

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

## Möglichkeiten der Anreicherung von Schwefelsäure in Baumkronen

VON E. TEUCHERT UND INGRID TEUCHERT

### Unzulänglichkeit statistisch gemittelter Immissionsraten

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

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

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

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

teiligt ist. Die Akkumulation anderer Schadstoffe wird hier nicht besprochen, denn sie erfordern wegen ihrer unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften eine separate Betrachtung.

### Erhöhte Eintragung von Schwefelsäure in Tautropfen

Das bei Verbrennungsvorgängen entstehende  $\text{SO}_2$  wird in der Atmosphäre in verschiedenen Prozeßpfaden langsam zu  $\text{SO}_3$  oxidiert<sup>1</sup>, welches bei Gegenwart von Wasser Schwefelsäure bildet. Alle drei Komponenten,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , sind in der Luft in unterschiedlichen Verhältnissen enthalten, welche von der Zeitspanne nach der  $\text{SO}_2$ -Erzeugung und vielerlei Reaktionsparametern abhängen. Da sie letztlich zur Bildung von Schwefelsäure führen, werden diese drei Schwefelverbindungen abkürzend als „SV“ bezeichnet. Diese drei Schwefelverbindungen SV sind stark hygroskopisch und werden daher in kondensierenden Wolkentröpfchen, in Regen- und Tautropfen aufgenommen.

Es wird beobachtet, daß in länger anhaltendem Regen der pH-Wert während der ersten Stunde langsam anwächst und sich anschließend stabilisiert. NÜRNBERG u. Mitarb. (3) berichten über eine Zunahme des pH-Wertes von anfangs unter 3 bis auf einen stationären Wert bei 3,8 bis 4,2. Diese Messung weist darauf hin, daß die Tropfen bei ihrer Entstehung in der Wolke einen anfänglichen pH-Wert im Bereich um 4 besitzen. Solange sie sich beim Absinken in der Wolke durch Aufnahme von Nebeltröpfchen vergrößern, ist eine Minderung des pH-Wertes nicht zu erwarten. Sobald sie jedoch unterhalb der Wolke die freie Luft durchfallen, nehmen sie aus dieser die hygroskopischen SV-Bestandteile auf, und ihr pH-Wert wird entsprechend abgesenkt. Es ist erklärlich, daß nach längerem Regen die Luft gereinigt und der pH-Wert der dann auf der Erde ankommenden Tropfen höher liegt.

Analog versteht sich die Eintragung von SV in Tautropfen. Der anfängliche pH-Wert entspricht dem SV-Gehalt der Luft, aus welcher die Tautropfen auskondensieren. Die nachträglich vorbeistreifende Luft überträgt ihre SV-Bestandteile. Dieses geschieht in zwei verschiedenen Weisen. Streicht Nebel vorbei, werden die SV-Bestandteile gemeinsam mit den Nebeltröpfchen übertragen, was ohne Änderung des pH-Wertes zu einer Vergrößerung des Tautropfens und zum gelegentlichen Herabfallen führt. Sofern jedoch aus der vorbeistreichenden Luft keine Feuchtigkeit übertragen wird sondern die SV-Bestandteile wegen ihrer hygroskopischen Eigenschaft allein übertragen werden, ist eine zusätzliche Säureübertragung auf den Tautropfen zu erwarten.

Die Menge der eingetragenen SV ist abhängig von der Menge der vorbeistreichenden Luft, von deren SV-Gehalt und von deren relativer Feuchtigkeit. Während bei Windstille eine SV-Übertragung nicht stattfindet, streicht bereits bei geringer Luftbewegung von beispielsweise 5 km/h während einer Stunde eine Luftmenge vorbei, die die von einem Regentropfen durchfallene Luftmenge um ein Vielfaches übertrifft. Die relative Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit bestimmen die Lebensdauer des Tautropfens.

Besonders günstige Voraussetzungen für eine hohe Eintragung von SV in Tautropfen liegen in den Kammlagen der Mittelgebirge vor. In Schönwetterperioden sind die klimatischen Voraussetzungen für eine starke Ausbildung von Morgentau gegeben. Die relative Luftfeuchtigkeit ist verhältnismäßig hoch, was sich in der adiabatischen Abkühlung der aus den Tälern kommenden Luft begründet. Ferner ist die Windgeschwindigkeit relativ groß. Daher haben die Tautropfen eine recht lange Lebensdauer, und es können SV in größeren Mengen übertragen werden.

Mit der Übertragung der SV an die benetzten Pflanzenteile ist naturgemäß eine Verminderung des Gehaltes in der Luft verbunden, welche darüberstreicht. Bei laminarer

<sup>1</sup> Möglicherweise wird dieser Vorgang durch die Gegenwart von  $\text{NO}_2$  gefördert. Die Reaktion  $\text{NO}_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{SO}_3$  wird im Bleikammerverfahren bei Temperaturen zwischen 50 und 80 Grad C zur Fabrikation von Schwefelsäure genutzt.

Luftbewegung, wie sie bei geringer und mittlerer Windstärke auf freien Flächen herrscht und wobei kein vertikaler Austausch der Luftvolumina stattfindet, ist in Bodennähe eine Begrenzung der SV-Eintragung auf die Gräser und niedrigen Pflanzen zu erwarten. Beim Durchströmen von Wäldern indessen findet eine Durchmischung des Luftvolumens zumindest in der Höhe der Bäume statt. Daher ist die Menge SV, die den Tautropfen in den Baumkronen angeboten wird, ungleich höher als bei Gräsern. Eine besonders hohe SV-Aufnahme ist zu erwarten, wenn einzelne Bäume auf freien Flächen stehen, da diese bei laminarer Luftbewegung den höheren Luftschichten voll ausgesetzt sind, welche keine anderweitige Möglichkeit zur Abgabe des SV-Gehalts besitzen.

Schließlich ist zu beachten, daß im Falle von Tautropfenbildung auf Bäumen nur ein kleiner Teil der gesamten Oberfläche der Vegetation befeuchtet ist. Die Eintragung der hygroskopischen SV-Bestandteile konzentriert sich auf diese Teile der Pflanzen. Bei einer Benetzung durch Regen oder Nebel verteilt sich die SV-Eintragung auf die gesamte Oberfläche aller Pflanzen, daher ist mit einer wesentlich geringeren Eintragung pro Quadratcentimeter Blattoberfläche zu rechnen.

### Anreicherung von Schwefelsäure im Verdunstungsvorgang

In einer wässrigen Lösung von  $\text{SO}_2$  und  $\text{H}_2\text{SO}_3$  oxidieren diese bekanntlich beim Stehen an der Luft langsam zu  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Die Schwefelsäure kann durch Verdampfen des Wassers bis auf eine Konzentration von 60 bis 80% angereichert werden. Dementsprechend ist in den Tautropfen zu erwarten, daß sich der Schwefelsäuregehalt durch Oxidation des eingetragenen  $\text{SO}_2$  zunächst erhöht. Beim Verdunsten des Tautropfens wird der nicht oxidierte Teil des  $\text{SO}_2$  gasförmig entweichen. Die vorhandene Schwefelsäure indessen bleibt auf dem Blatt bzw. der Nadel haften und erreicht eine hohe Konzentration.

Zur Veranschaulichung wird ein Tautropfen als Beispiel gewählt, der einen Durchmesser von 1 mm besitzt und  $\text{H}_2\text{SO}_4$  in einer Konzentration von 0,01% enthält, was einem pH-Wert 2,7 entspricht. Verdampfen des Tropfens auf 1/1000 seines Volumens vermindert den Durchmesser auf 1/10 mm, und es erhöht die Konzentration auf 10%. Bei Erwärmung, Sonneneinwirkung und Wind ist ein weitgehendes Verdunsten zu erwarten, so daß eine Konzentration erreicht werden kann, bei welcher eine direkte ätzende Wirkung der Säure stattfindet.

In analoger Weise findet eine Erhöhung der Säurekonzentration beim Verdunstungsvorgang statt, wenn die Benetzung durch Regen erfolgt. Bei Laubbäumen ist zu beobachten, daß sich das Wasser bevorzugt an den Blatträndern sammelt. Entsprechend sind diese Stellen bei der Verdunstung erhöht durch Säurerückstände belastet, und eine unmittelbare Schädigung erscheint auch hier möglich.

### Maximalbelastungen

Es gibt bisweilen Wetterlagen, in denen sich Morgentau und Abtrocknen über Wochen wiederholen, ohne daß ein einziges Mal ein Regen fällt. Naturgemäß addieren sich bei diesem Wechsel die täglich eingetragenen Schwefelsäuremengen. Die Akkumulierung kann sich darüber hinaus erheblich verstärken, wenn der  $\text{SO}_2$ -Gehalt der Luft bei der gegebenen Wetterlage anwächst, indem die kontinuierliche Emission nicht durch hinreichenden Wind und Niederschläge ausgeglichen wird. Auf diese Weise ist die Eintragung größerer Säuremengen möglich, und in den Stunden des Abtrocknens ist eine direkte Ätzwirkung zu erwarten. Häufig wiederholtes Besprühen von Kiefernzweigen mit verdünnter Schwefelsäure kann diesen Effekt im Experiment unmittelbar nachweisen.

Der beschriebene Akkumulationsvorgang wird durch einen einzigen Regen beendet, indem dieser die eingetragene Säuremenge verdünnt und zum Boden spült. Dies zeigt die Abhängigkeit dieses Effektes von klimatischen Einzelereignissen.

In Landschaften, in denen häufig Regen fällt, ist ein anderer Akkumulationseffekt möglich. Sehr oft werden Wetterlagen beobachtet, in denen nicht, wie eingangs beschrieben, ein ausgiebiger Regen die Schwefelverbindungen der Luft aufnimmt und zu Boden spült, sondern es finden wiederholte leichtere Sprühregenfälle statt, welche die Bäume nur mäßig benetzen. Die hierbei eingetragene Schwefelsäure bleibt bei den zwischenzeitlichen Abtrockenvorgängen im Kronenbereich der Bäume haften. Bei wiederholten Regenfällen dieser Art können die Schwefelsäuremengen der oberen Zweige durch Abtropfen in die tieferen Bereiche der Krone getragen werden, und es ist zu erwarten, daß gerade dort bei derartigen Wetterlagen eine erhebliche Akkumulation stattfindet.

Eine Verstärkung dieses Effektes ist zu erwarten, wenn während des Abtrocknens der äußeren feuchten Äste das enthaltene  $\text{SO}_2$  wieder in die Luft übertritt und in den tieferen Kronenbereichen absorbiert wird, welche die Feuchtigkeit am längsten halten. Falls diese, wie es bei einschlägigen Wetterlagen häufig der Fall ist, nur sehr langsam abtrocknen, kann das hier eingetragene  $\text{SO}_2$  in hohem Maße zu  $\text{SO}_3$  oxidieren und zusätzlich Schwefelsäure bilden.

Auch bei dieser Art der Akkumulation von Schwefelsäure wird die Krone durch einen einzigen starken Regen wieder gereinigt. Im Fichtentraufwasser, das bei einem solchen Regen zu Boden gelangt, wird ein erhebliches Absenken des pH-Wertes beobachtet. Das wirkt sich bei schwach gepuffertem Untergrund bis in die Bäche aus, die dieses Wasser abführen. TEICHMANN und MEJERING (4) beobachteten Anfang Oktober 1976 nach stärkeren Regenfällen, die nach langer Trockenheit niedergingen, in einem derartigen Bach das Absinken des pH-Wertes von 6,9 auf 4,5, wodurch die gesamte Population der Gammariden (Flohkrebse) abstarb. Sie baute sich danach langsam durch Neubesiedlung wieder auf. Diese Beobachtung belegt einerseits den Effekt der Akkumulation von Säuren in den Baumkronen bei längerem Ausbleiben von Regen, andererseits gibt sie ein Beispiel für die besondere Wirksamkeit von episodischen Maximalbelastungen, in diesem Falle auf Lebewesen, die bei normaler mittlerer Belastung durch Säuren durchaus lebensfähig sind.

Die beiden geschilderten Weisen, in denen sich Schwefelsäure akkumulieren kann, beruhen auf klimatischen Situationen, die zwar nicht in der Regel, aber doch gelegentlich beobachtet werden. Zum Beispiel waren sie im Jahr 1982 deutlich anzutreffen. Die erste Situation ist typisch für die östlichen und südlichen Mittelgebirge, die letztere für das Rheinland und Westfalen. Das koinzidiert mit den typischen Schadbildern an den Bäumen in diesen Gebieten.

Es ist ersichtlich, daß die Eintragung der Schwefelverbindungen nicht regelmäßig und gleichmäßig vonstatten geht, sondern daß starke Schwankungen mit gelegentlichen hohen Maximalbelastungen der Bäume zu erwarten sind. Daraus ergibt sich ein Hinweis für die Verfahren zur Berechnung der Ausbreitung von Abgasen im Hinblick auf potentielle Baumschäden: Üblicherweise wird der Immissionsbeitrag eines einzelnen Emittenten durch Mittelwertbildung über die Vielfalt der beobachteten klimatischen Situationen berechnet. Insbesondere werden für Windrichtung und Windgeschwindigkeit lediglich Häufigkeitsverteilungen der Ausbreitungssituation aus 10jährigen Meßreihen verwendet (5), nicht aber die Einzelsituationen selbst. Es ergibt sich auf diese Weise rechnerisch eine Zusatzbelastung, die der gemessenen mittleren Vorbelastung überlagert wird. Bei diesem Verfahren bleibt das Auftreten individueller Maximalbelastungen außer Betracht. Demgegenüber erfordern die gelegentlich auftretenden Maximalbelastungen besondere Aufmerksamkeit, da Schädigungen der Bäume jeweils erst oberhalb gewisser Schwellbelastungen zu erwarten sind. Die Maximalbelastungen ergeben sich beim Zusammentreffen von Baumbenetzung, Windrichtung direkt vom Emittenten her, momentaner anderweitiger Vorbelastung und individuellen klimatischen Bedingungen. Einer Verfolgung der speziel-

len Situationen kommt eine wesentliche Bedeutung zu, wenn der Immissionsbeitrag eines einzelnen Emittenten im Hinblick auf mögliche Schädigungen von Bäumen zur Beurteilung ansteht.

### Folgerung

Die vorliegende Ausführung macht es verständlich, daß sich bei gegebenen Situationen in den Baumkronen Schwefelsäure in einer hohen Konzentration ansammeln kann. Insbesondere ist dies in speziellen Bereichen der Kronen möglich, und gerade in diesen werden Schäden auch vorwiegend beobachtet.

Die Ausführung stützt sich allerdings hauptsächlich auf bekannte naturgesetzliche Tatsachen und nicht auf direkte experimentelle Nachweise. Teilerperimente in Einzelschritten, welche die Oxidation von  $\text{SO}_2$ , das Kondensieren der Schwefelsäure und eine schädigende Wirkung in direkter Weise belegen können, sind relativ einfach durchführbar. Jedoch erfordert die definitive Klärung der Baumschädigung eine unmittelbare Beobachtung der Situation in der Natur. Hierfür ist ein größerer Aufwand an Meßeinrichtungen und an Zeit erforderlich, da das Zusammentreffen von mehreren Einzelereignissen in Ort und Zeit nicht vorhersehbar ist.

Schließlich ist auf die Wirkung der vielen anderen immittierten Schadstoffe und auf deren Wechselbeziehungen hinzuweisen. Beispielsweise ist anzunehmen, daß die Zunahme der  $\text{NO}_2$ -Exmission und der Ozonbildung den Oxidationsprozeß des  $\text{SO}_2$  beschleunigt und damit indirekt zu einer erhöhten Schwefelsäurebildung führt. Hierbei ist auf die erhöhten Baumschäden in der Nähe der Autobahn hinzuweisen. Da nahezu alle Schädigungen Schwellwertreaktionen sind, müssen die Auswirkungen der verschiedenen Schadstoffe vorwiegend den Maximalwerten ihrer Immission und weniger den Mittelwerten zugeschrieben werden.

### Zusammenfassung

Den mengenmäßig größten Anteil an den Schadstoffen in der Luft bilden die oxidischen Schwefelverbindungen, welche zur Bildung von Schwefelsäure führen. Diese sammeln sich einmal in benetzten Teilen der Baumkronen an, zum anderen können sie in erhöhtem Maße in Tautropfen aus der vorbeistreichenden Luft absorbiert werden.

Soweit die eingetragenen Schwefelverbindungen zu Schwefelsäure oxidiert sind, bleiben sie beim Verdunstungsvorgang haften und die Konzentration der Säure erhöht sich erheblich. Bei mehrfacher Wiederholung von Benetzung und Verdunstung addiert sich die eingetragene Menge. Hierbei sind Maximalbelastungen der Blätter und Nadeln zu erwarten, die neben physiologischen Schädwirkungen auch direkte Ätزشäden hervorrufen können. Eine maximale Immission von Schwefelverbindungen ist ferner auch zu erwarten, wenn bei laminarer Windströmung eine unmittelbare Übertragung von Emittenten auf in Windrichtung befindliche benetzte Bäume stattfindet.

### Summary

#### *Possibilities of accumulation of sulfuric acid in tree crowns*

The highest proportion of air pollutants by volume consists of sulfur oxides which turn into sulfuric acid. They accumulate in the moistened part of the tree crowns and can increasingly also be absorbed by the way of dew drops from the air passing by.

Sulfur compounds which have been oxidized to sulfuric acid are being retained in the evaporation process, and the acid concentration increases considerably. There will be a linear accumulation of the amounts if repeated moistening and evaporation takes place. Maximum stress for leaves and needles is to be expected which, besides harmful physio-

logical effects, may also bring about direct scorching damage. Furthermore, maximum pollution of sulfur compounds may also be expected if laminar air currents carry pollutants directly to moistened trees standing down-wind from the points of discharge.

### Literatur

- Symposium „Saurer Regen - Waldschäden“, Jülich, 27.-28. 1. 1983. Wissenschaftliche Leitung: F. FÖHR, Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Postfach 19 13, 5170 Jülich.
- WENTZEL, K. F.: 1982: Die Luftverschmutzung - Seit über 100 Jahren eine Gefahr für Bäume. Bild der Wissenschaft 12, S. 103.
- NÜRNBERG, H. W.; VALENTA, P.; V. D. NGUYEN, v. D.: „Ein neuer Weg zur Messung toxischer Metalle im Regen.“ Jahresbericht 1978/79, S. 47, der Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Postfach 19 13, 5170 Jülich.
- TEICHMANN, W.; MEIJERING, M. P. D., 1981: Zur Situation der Gattung Gammarus im Kaufunger Wald. Beitr. Naturkde. Osthessen, H. 18, S. 71.
- TA Luft - Ausbreitungsrechnungen (Immissionsprognose). Umwelt, Informationen des Bundesministers des Inneren zur Umweltplanung und zum Umweltschutz 92, 9. XI. 1982, S. 23.

*Anschriften der Verfasser:* Dr. EBERHARD TEUCHERT, Institut für Reaktorentwicklung, Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Postfach 19 13, D-5170 Jülich; Dr. INGRID TEUCHERT, Franziskusstraße 2, D-5170 Jülich

## Auswirkungen der Walderkrankungen auf Struktur und Wuchsleistung von Fichtenbeständen<sup>1</sup>

Von F. FRANZ

### 1 Einleitende Anmerkungen

Wissenschaftler verschiedenster Fachrichtungen haben sich in den vergangenen Monaten auf mehreren Konferenzen mit den wahrscheinlichen oder mutmaßlichen Ursachen der Walderkrankungen befaßt, die sich in unserem Lande seit einigen Jahren großflächig ausbreiten. Darüber hinaus standen die unterschiedlichen Erscheinungsformen der Walderkrankungen, verschiedene Annahmen über den zu erwartenden Krankheitsverlauf wie auch Wege zur Verhinderung weiterer Schadensausbreitung im Mittelpunkt der Erörterungen. Die Serie dieser wissenschaftlichen Konferenzen wurde mit einem größeren Symposium am 27. und 28. Januar 1983 in Jülich fortgesetzt, auf dem eine der Vortragsreihen Fragen der Auswirkungen der Walderkrankungen auf den praktischen Forstbetrieb gewidmet war.

### 2 Gliederung des Themas

In einem Beitrag zu dieser Vortragsreihe hat der Verfasser zu folgenden Fragen Stellung genommen:

1. Welche Auswirkungen haben die Walderkrankungen, die uns hier beschäftigen, auf das Wuchsverhalten der Waldbäume und ihrer Gemeinschaften, der Waldbestände?

<sup>1</sup> Vortrag auf dem Symposium „Saurer Regen - Waldschäden“ in Jülich am 27. Januar 1983.