

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 131 (1980)
Heft: 3

Artikel: Bestimmungsmethoden für die Einwirkung von Luftverunreinigungen
Autor: Keller, T.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-766535>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Bestimmungsmethoden für die Einwirkung von Luftverunreinigungen¹

Von Dr. Th. Keller

Oxf.: 425.1

Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf

Der Forstwirtschaft stehen verschiedene Methoden zur Verfügung um nachzuweisen, ob ein Wald unter einem Stress durch Luftverunreinigungen stehe oder nicht. Diese Methoden sind aber aufwendig und sind, allein angewendet, in der Regel relativ wenig aussagekräftig, so dass sich eine Kombination aufdrängt. Tabelle 1 gibt einen Überblick mit Vorzügen der Methoden.

Tabelle 1. Bestimmungsmethoden.

Methode	Überblick	Beziehung zum Leben	Spezifität	Weiter Bereich latent / akut
Luftbild	×	×		
Luftanalyse	×	(?)	×	(?)
Blattanalyse	×	×	(?)	×
Symptome	×	×		
Indikatorpflanzen	×	×	×	
Jahrringanalyse	×	×		
Ökologie	×	×		×
Physiologie		×		×
Biochemie		×		×

1. Luftbild

In der letzten Zeit wird die Luftfotografie mehr und mehr herangezogen, um Immissionsschäden zu erfassen. Sehr oft bedient man sich der Falsch-

¹Referat, gehalten anlässlich der Tagung der Arbeitsgemeinschaft für den Wald vom 26./27. Juni 1979 in Rheinfelden. Ich danke Herrn Dr. H. Flühler für aufbauende Kritik bei der Abfassung des Manuskriptes.

farbentechnik im Infrarotbereich. Dabei erscheinen die abgestorbenen Bäume beziehungsweise Kronenteile in Blautönen, die vitalen Bäume dagegen in Rotfärbungen. Diese Methode erlaubt, einen raschen Überblick über ein relativ grosses oder unwegsames Gebiet zu erhalten, und sie mag sich auch im Bereich einer Punktquelle eignen. Sie ist jedoch nicht spezifisch für Luftverunreinigungen. Sie stellt den gegenwärtigen Zustand fest, gibt aber keinerlei Ursache an für das eventuell festgestellte Absterben einzelner Bäume (Bestände). Ferner ist es noch nicht gelungen, diese Methode auch im Bereich einer latenten Schädigung (Keller, 1977 b, 1980) eines Waldes einzusetzen, da der Farbton nicht nur von biologischen Faktoren (zum Beispiel Baumart, Erbanlagen, Versorgung mit Wasser und Nährstoffen usw.), sondern auch von zahlreichen technischen Faktoren (zum Beispiel Sonnenstand, Belichtung, Schattenwurf beziehungsweise Lichtdurchlässigkeit der Krone usw.) abhängt.

2. Luftanalyse

Es liegt in der Natur der heutigen Zeit, dass sich Messwerte grosser Beliebtheit erfreuen. So bemüht sich die Messtechnik um die Erfassung biologisch unerwünschter oder gar giftiger Luftkomponenten. Angesichts der riesigen Zahl der oft nur in minimen Spuren vorhandenen Beimengungen unserer Atemluft wird der Aufwand aber sehr rasch untragbar. Daher wird manchmal versucht, dadurch einen Überblick zu gewinnen, dass man einige wenige oder die als am wichtigsten erachtete Komponente mit einer Summationsmethode (sofern entwickelt) erfasst. So werden zum Beispiel mit einer Absorptionslösung getränkte Filterpapiere tage- oder wochenlang, vor Regen geschützt, in einem Immissionsgebiet exponiert. Dieses Papier absorbiert das F^- oder SO_2 der vorbeistreichenden Luft. Die Schadstoffkomponente lässt sich analytisch genau bestimmen. Die Methode liefert indessen nur Relativwerte, da das erfasste Luftvolumen unbekannt bleibt.

Diesem Nachteil wird dadurch entgegengewirkt, dass die Konzentration gewisser Luftkomponenten kontinuierlich erfasst und registriert wird (Abbildung 1), sofern die Voraussetzungen erfüllt sind. Dazu gehört, dass die entsprechende Messmethodik entwickelt ist. Ferner ist der damit verbundene finanzielle Aufwand sehr gross, und in der Regel wird ein Anschluss ans elektrische Netz vorausgesetzt. Zu den so messbaren Abgasen von Hausbrand, Verkehr und Industrie gehören die nitrosen Gase (zum Beispiel NO , NO_2), welche bei jeder hochtemperaturigen Verbrennung (auch bei Erdgas) entstehen. Deren Erfassung wurde aber vor allem in Europa weitgehend vernachlässigt, obwohl sie in der Atmosphäre unter dem Einfluss von intensivem Sonnenlicht zur Bildung toxischer Konzentrationen von Oxidantien, zum Beispiel Ozon, führen können.

Die Luftanalyse ermöglicht den Überblick über die Situation in einem Gebiet in der Regel nur mit der Summationsmethode, da der Aufwand mit

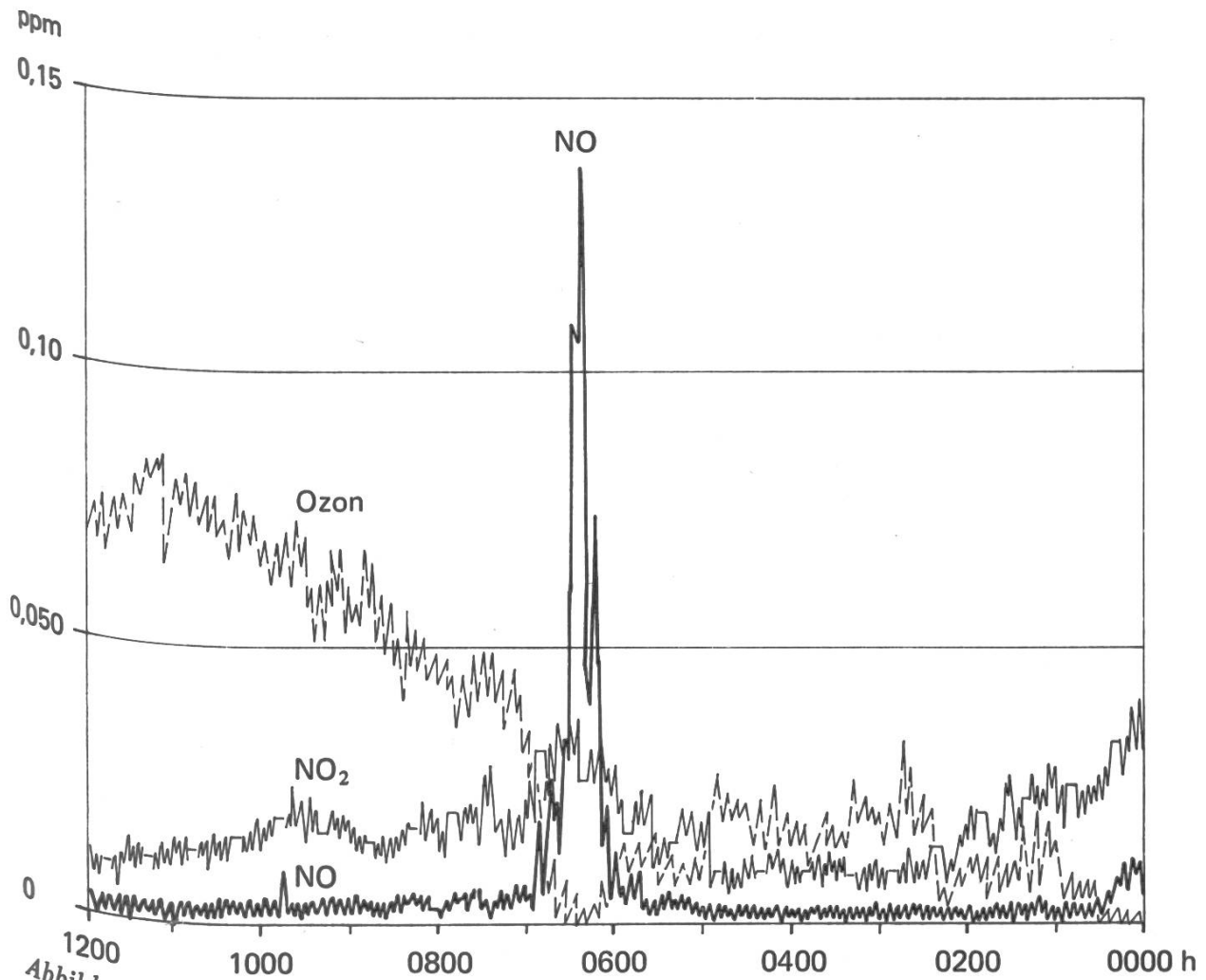


Abbildung 1. Kontinuierliche Messung und Registrierung von Ozon, NO und NO₂ der Aussenluft.

der kontinuierlichen Registrierung viel zu gross würde. Die Spezifität der Methode ist nur dort gewährleistet, wo die Erfassung aller einwirkenden und wichtigen Komponenten möglich ist. Wohl wird bei der laufenden Registrierung ein weiter Bereich erfasst, der von der latenten bis zu den akuten Schädigungen reichen kann. Die Beziehung dieser rein chemischen oder chemisch-physikalischen Methode zur Biologie wird aber erst durch Begasungsversuche mit entsprechender Konzentration und Dauer hergestellt, wo jedoch ebenfalls riesige Lücken klaffen.

3. Blattanalyse

Bei der Blatt- oder Nadelanalyse handelt es sich um eine chemische Summationsmethode, bei welcher die Vegetation selbst als Fänger der zu untersuchenden Luftverunreinigung dient. Mit der Blattanalyse können Immissionen, welche von den assimilierenden Pflanzenteilen aufgenommen und/oder gespeichert werden, nachgewiesen werden. Dies gilt zum Beispiel für S, Cl⁻, F⁻ oder Metallstäube (Pb usw.). Diese Methode versagt aber zum Beispiel bei O₃ oder den nitrosen Gasen (Pflanzen enthalten normalerweise

so viel Stickstoff, dass eine N-Aufnahme aus der Luft nicht bestimmt werden kann). Wo jedoch mehrere erfassbare Immissionen auftreten, kann mit der Blattanalyse eventuell der Schadstoff nachgewiesen werden (Abbildung 2). In diesem Fall, wie auch dort, wo ein Überblick über ein Gebiet erhalten werden soll, ist jedoch zu beachten, dass verschiedene Pflanzen ein unterschiedliches Aufnahme- und Speichervermögen besitzen und daher nicht miteinander vermischt werden dürfen. Ausserdem darf nicht vergessen werden, dass in der Regel relativ hohe Schadstoffkonzentrationen, welche aber nur kurzfristig einwirken, nicht erfasst werden, wenn die Pflanze zu wenig Zeit hatte, um den Schadstoff aufzunehmen und zu speichern.

Ferner ist zu beachten, dass die in der Literatur zu findenden «Normalwerte» biologisch meist kaum interpretierbar sind, da sie mit Boden, Klima, Pflanzenart, Entwicklungsstadium usw. variieren, abgesehen davon, dass die Resultate auch von der chemischen Analysenmethode abhängen. So besagt die Literatur, dass in der Natur «Normalwerte» von bis zu 20 ppm F⁻ (mg/kg) auftreten. In einem Versuch haben wir jedoch gefunden, dass die Nadeltriebe einer Fichte schon bei durchschnittlich 6 ppm Fluorid völlig «verbrannt» wurden (Nullprobe ~ 3 ppm F⁻). Es bleibt daher eine Methode zu entwickeln, mit welcher der phytotoxische Anteil bestimmt werden kann.

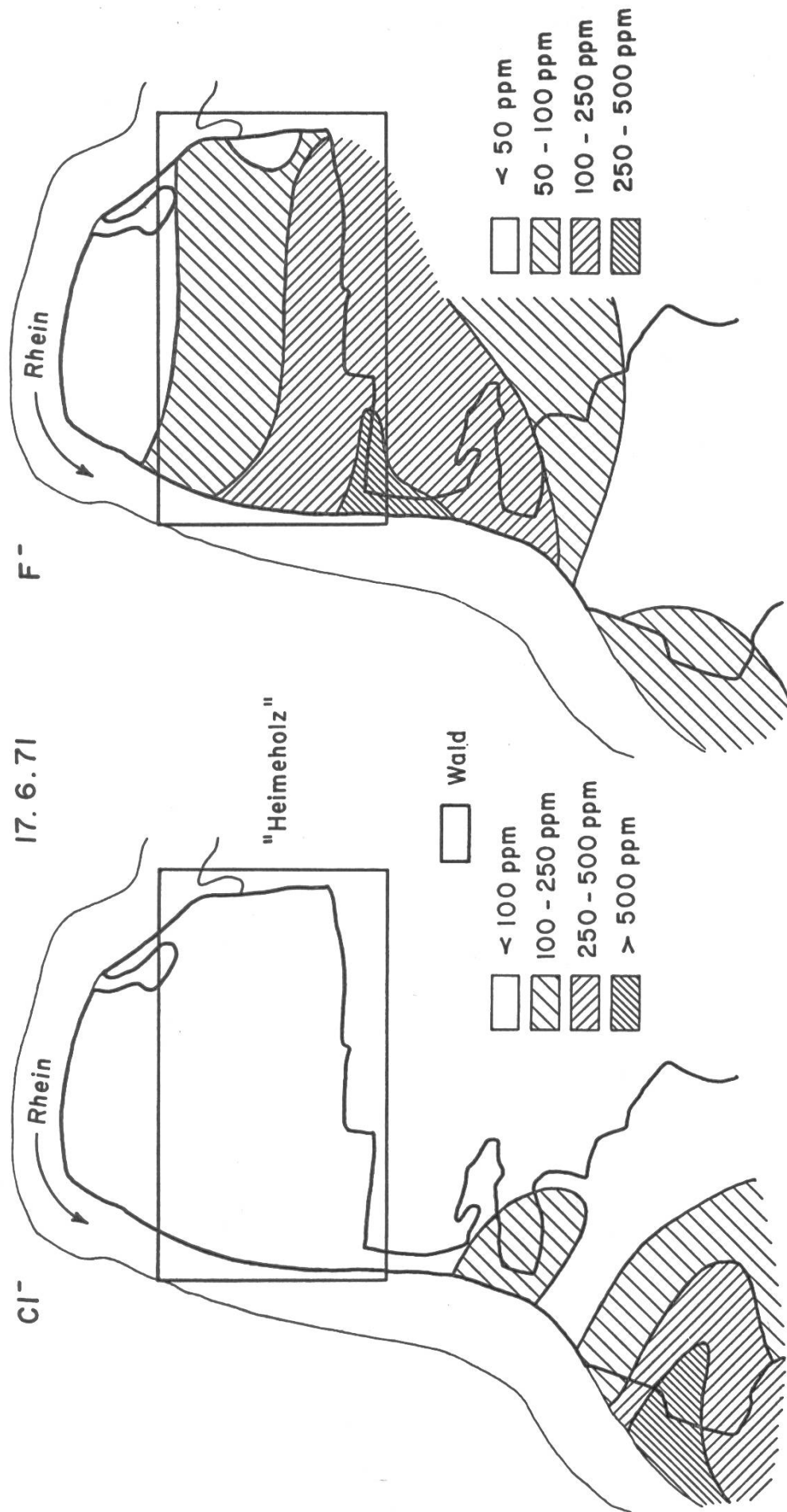
Die Spezifität der Methode hängt davon ab, ob ein bestimmter Stoff überhaupt damit erfasst werden kann, was nicht für alle Emissionen zutrifft. Wo dieser Nachweis aber erbracht werden kann, da wird ein weiterer Bereich erfasst. Immerhin wird nur im Bereich sichtbarer Symptome eine allfällige Schädlichkeit manifest. Diese Methode wird zur Überwachung weiter SO₂- beziehungsweise F⁻-Belastungsgebiete Bayerns mit Fichtennadeln angewendet (Rudolph, 1978).

4. Symptome

In sehr vielen Fällen wird einfach unterschieden, ob die Vegetation äusserlich *sichtbare Symptome* aufweise oder nicht. Die Beurteilung dieser sichtbaren Schädigungssymptome dient somit oft als eine Methode des Einwirkungsnachweises. Diese vom Laien oft überschätzte Methode kann sehr wertvolle Erkenntnisse liefern, vor allem in der Umgebung von Punktquellen von Luftverunreinigungen. Den Symptomen haftet jedoch der Nachteil an, dass sie nicht schadstoffspezifisch sind und manchmal nicht einmal von Luftverunreinigungen verursacht werden. Eindrucksvolle Farbbildungen finden sich bei Jacobson und Hill (1970), van Haut und Stratmann (1970) oder Keller (1975).

Dabei ist zu beachten, dass nicht nur die ins Auge springenden Chlorosen (Ausbleichungen) oder Nekrosen (abgestorbene Gewebeteile, eventuell sogar Äste oder Bäume) als Symptome taxiert werden dürfen. Auch verminderte Blatt- (Nadel-) oder Triebblängen gehören zu diesen Symptomen. Ihre Sicht-

Abbildung 2. Mit diesen Blattanalysen wurde die lokale Verbreitung von Cl^- - und F^- -Immissionen erfasst und gezeigt, dass das eingerahmte «Heimeholz» F^- -Immissionen ausgesetzt ist, welche den Wald stark belasten (aus Keller, 1975).



barkeit erlaubt es, einen raschen Überblick über ein Immissionsgebiet zu erhalten, auch wenn damit der forstlich wichtige Bereich der latenten Schädigung nicht erfasst wird.

5. Indikatorpflanzen

Dem Einwand der mangelnden Spezifität für bestimmte Luftverunreinigungen, welcher bei der Verwendung von Symptomen oft gehört werden kann, wird versucht, dadurch zu begegnen, dass Indikatorpflanzen verwendet werden. Diese Indikatorpflanzen sind für bestimmte Luftverunreinigungen besonders empfindlich (*Posthumus*, 1976). Bei ihrer Verwendung (vergleiche

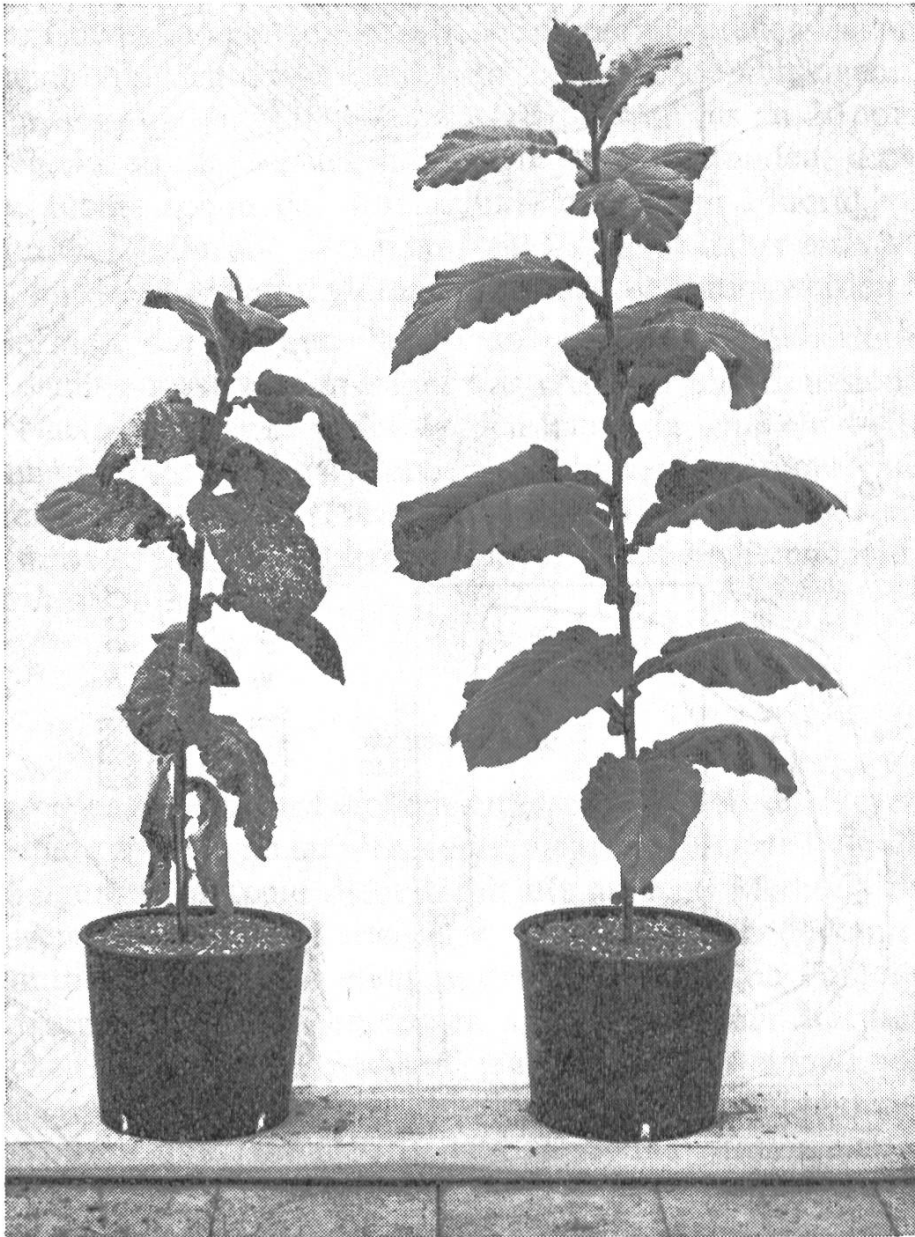


Abbildung 3. Vertopfte Tabakpflanzen werden international als Indikatorpflanzen für den «smog»-Nachweis (Ozon + oxidierende photochemische Produkte) verwendet. Rechts: relativ widerstandsfähige Sorte Bel B als Nullprobe. Links: stark smoganfällige Sorte Bel W 3.

Abbildung 3) ist strikte darauf zu achten, dass genetisch einheitliches Pflanzenmaterial verwendet wird und dass auch alle äusseren Faktoren — ausser der Luftverunreinigung — möglichst gleich sind (Boden, Klima, Wasser, Besonnung usw.).

Es liegt in der Natur der Dinge, dass als Indikatorpflanzen in der Regel kurzlebige Kräuter verwendet werden, obwohl diesen der Nachteil anhaftet, dass sie nur während der Sommermonate eingesetzt werden können. So ist die Verwendung einer bestimmten Tabaksorte, Bel W 3 (Abbildung 4), in Nordamerika und Europa weitverbreitet, um Ozon beziehungsweise stark oxidierende Substanzen nachzuweisen. Diese Sorte ist so empfindlich, dass sie als Zigarrendeckblatt — ihr Züchtungszweck — gar nicht mehr geeignet ist, weil die herrschenden Ozon-(Oxidantien-)Konzentrationen (und vielleicht öfters auch Virus-Infektionen) zu völlig entwertenden nekrotischen Blattflecken (abgestorbene Gewebeteile, siehe Abbildung 4) führen.

Da fast für jede Schadstoffkomponente andere Pflanzenarten verwendet werden, sind meist kleine Indikatorgärtchen anzulegen. Die hohe Empfind-

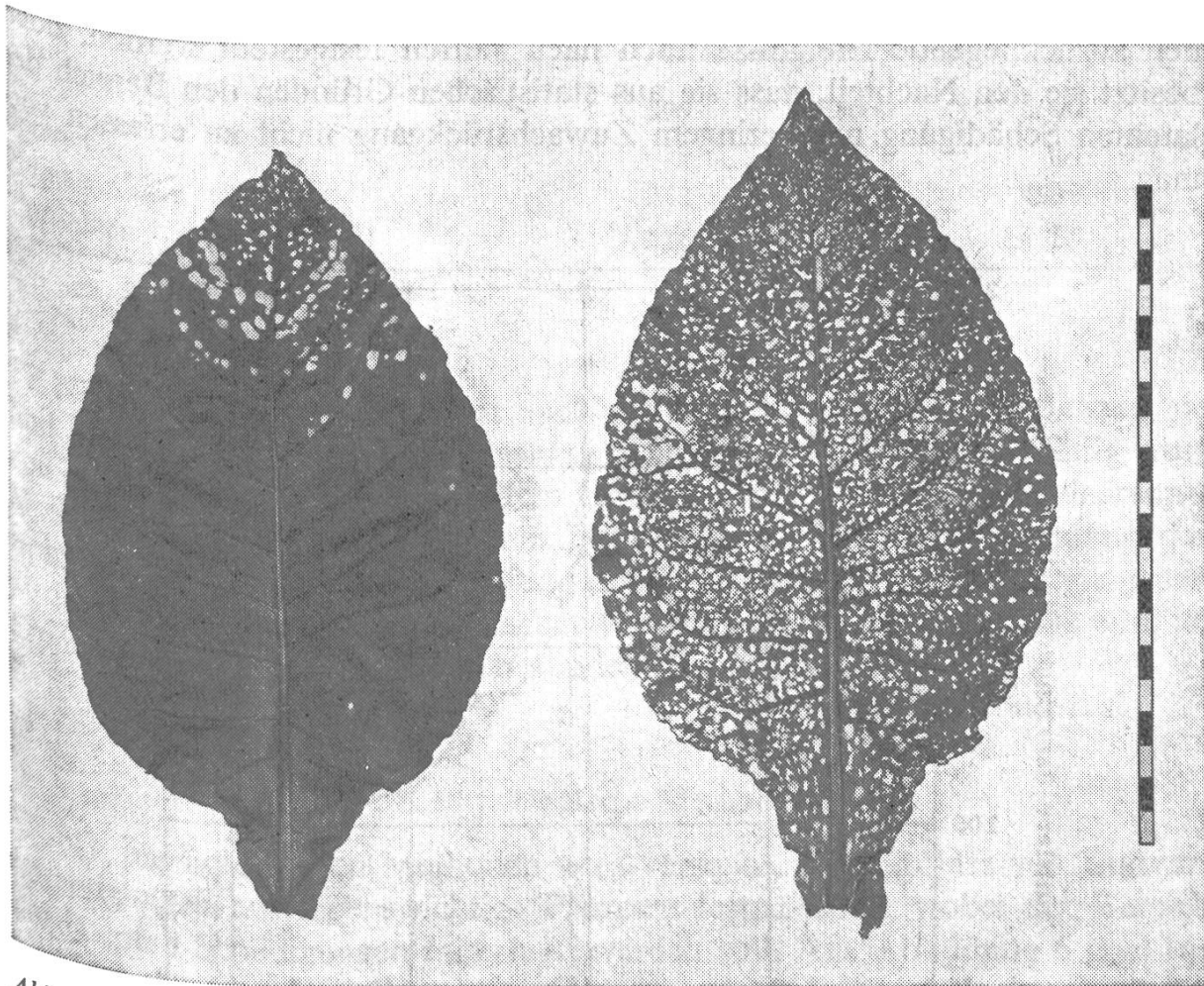


Abbildung 4. Blätter des Bel W 3-Tabakes. Links: die «Smogsymptome» beginnen sich gewöhnlich zuerst an der Blattspitze als elfenbeinfarbene Nekrosen der Blattoberfläche einzustellen. Rechts: ein sehr stark von Smogflecken (durch Ozon und Oxidantien abgetötetes Gewebe) überzogenes und völlig entwertetes Tabakblatt (Birmensdorf 1976).

lichkeit der Arten, welche relativ rasch zu sichtbaren Symptomen führt, hat den Vorteil der raschen Übersicht, ohne dass zeitraubende Laboranalysen vorzunehmen sind. Dafür werden latente Schädigungen nicht erfasst.

6. Jahrringanalyse

Es ist schon lange bekannt, dass Bäume auf Luftverunreinigungen mit schmälere Jahrringen reagieren können, ohne sichtbare Symptome an den Assimilationsorganen auszubilden. Bereits im letzten Jahrhundert wurden Zuwachsverluste des Waldes in Immissionsgebieten durch verminderte Jahrringbreite festgestellt (Abbildung 5). In der Zwischenzeit wurde die Methode verfeinert und namentlich durch die Röntgendensitometrie erweitert, welche neben der Jahrringbreite vor allem auch die Holzdicke zu bestimmen erlaubt. Diese Methode vermag zwar unter Umständen einen Überblick über den Umfang eines Schadgebietes zu geben, besagt aber nichts über die Ursache des Rückganges der Holzproduktion. Immissionen müssen also mit anderen Methoden nachgewiesen werden. Mit Hilfe der Jahrringanalyse können zurückliegende Ereignisse noch nach Jahren festgestellt werden, doch besitzt sie den Nachteil, dass sie aus statistischen Gründen den Bereich der latenten Schädigung mit geringem Zuwachsrückgang nicht zu erfassen vermag.

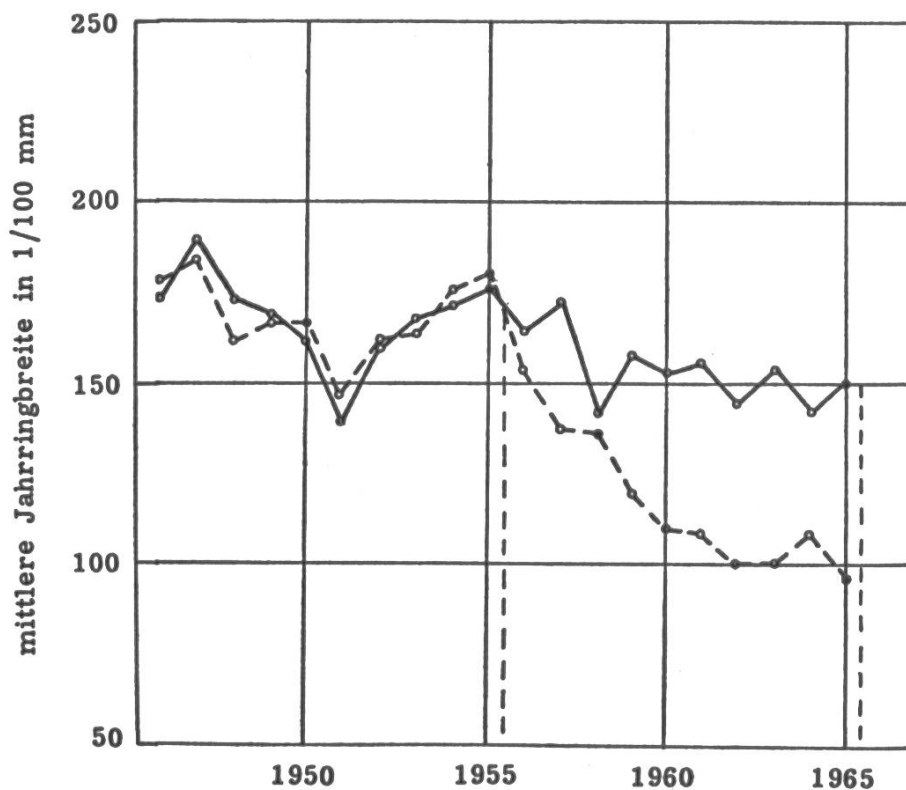


Abbildung 5. Normale, beziehungsweise abnehmende Jahrringbreite von Fichten vor und nach dem Bau einer Immissionsquelle (aus Pollanschütz, 1971).

7. Ökologische Methoden

Im Gegensatz zu den chemischen Analysemethoden versuchen die ökologischen Methoden die Beziehung zum Leben dadurch herzustellen, dass verschiedene Gruppen von Organismen aus einem Ökosystem herausgegriffen werden. Als Beispiel diene Tabelle 2, in welcher sich die vom Blut der Beutetiere lebenden Spinnen als wesentlich weniger fluoridempfindlich erwiesen als die Humusmilben und die Urinsekten, welche an der Humifizierung der Laubstreue, also am Nährstoffkreislauf im Waldboden, beteiligt sind. Die humifizierenden Arten zersetzen das durch die Filterwirkung mit Fluorid angereicherte Laub und werden in Werksnähe durch dessen Giftwirkung drastisch dezimiert. Es ist interessant, dass selbst in 3000 m Entfernung vom Werk, wo der Wald durchaus normal erscheint, noch wichtige Segmente des Ökosystems beeinträchtigt sein können.

Tabelle 2. Der Einfluss der Distanz von einem F-emittierenden Werk auf die Individuenzahl (Stück/m² Buchenstreue) von 3 Gruppen von Gliedertieren (nach Bader, 1974).

	Distanz vom Werk (m)		
	300	3000	6000
Spinnen	9	8	14
Humusmilben	243	507	4928
Urinsekten	516	993	1735

Neben den Tieren wird aber auch die Garnitur an höheren Pflanzen hier und da verwendet, um eine Belastung nachzuweisen. Besonders häufig wurden die sehr empfindlichen Flechten kartiert, deren Erkennung Spezialkenntnisse erfordert. So gelang es zum Beispiel in Zürich, die Verarmung der Epiphytenflora und die Ausdehnung der Flechtenwüste in den vergangenen 40 Jahren mit dieser Methode nachzuweisen (Züst, 1977), wobei die erhöhte Empfindlichkeit gewisser Arten besonders deutlich wird.

8. Physiologische Methoden

Mit physiologischen Methoden wird versucht, den Einfluss von Luftverunreinigungen auf lebenswichtige Prozesse festzustellen, wobei der Bereich der latenten Schädigungen miterfasst werden soll. Aus Abbildung 6 geht für fünf verschiedene Nadelbaumarten hervor, wie die CO₂-Aufnahme mit zunehmendem Fluorgehalt der Nadeln abnimmt, und zwar auch dort, wo die Pflanze äusserlich keine Schädigungssymptome zeigt. Weil die CO₂-Aufnahme die Grundlage jeglicher Trockensubstanzproduktion ist, nimmt mit der

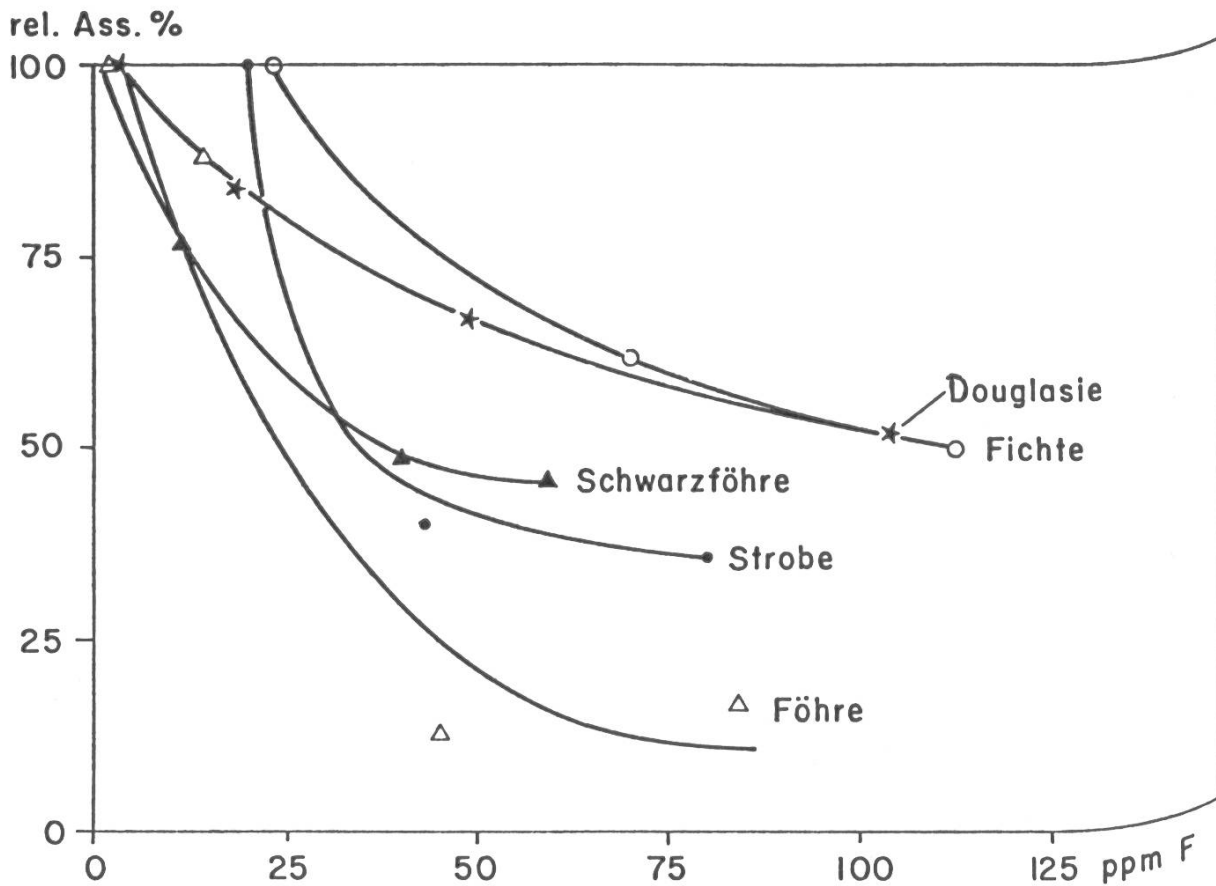


Abbildung 6. Relative Assimilation (CO₂-Aufnahme) von fünf Nadelbaumarten in Abhängigkeit des Fluorgehaltes der diesjährigen Nadeln im Herbst (aus Keller, 1977 a).

Nettoassimilation auch die Holzproduktion ab (selbst im latenten Bereich, wie Abbildung 7 aus einem Begasungsexperiment von zwei Fichtenklonen mit SO₂ zeigt).

9. Biochemische Methoden

Die biochemischen Methoden stehen den physiologischen nahe. Mit ihnen wird ebenfalls die Beziehung zum lebenden Organismus gesucht und der Bereich der latenten Schädigung miterfasst. In Abbildung 8 wird der Zusammenhang gezeigt zwischen einer mehrmonatigen Winterbegasung mit niedrigen SO₂-Konzentrationen und der relativen Peroxidase-Aktivität der Fichte (Nadeln). Die Peroxidase ist als ein Entgiftungsenzym bekannt, das durch die verschiedensten Einflüsse (nicht nur durch Luftverunreinigungen) aktiviert werden kann. Wie Abbildung 8 zeigt, wird diese Aktivität aber selbst durch eine winterliche Belastung mit Luftverunreinigungen gesteigert, das heisst zu einem Zeitpunkt ausserhalb der Vegetationsperiode. Die Kurven I/12 und I/4 wurden an denselben Bäumen bestimmt, I/12 Ende Dezember, I/4 anfangs April. Der Unterschied bei 0,225 ppm SO₂ ist darauf zurückzu-

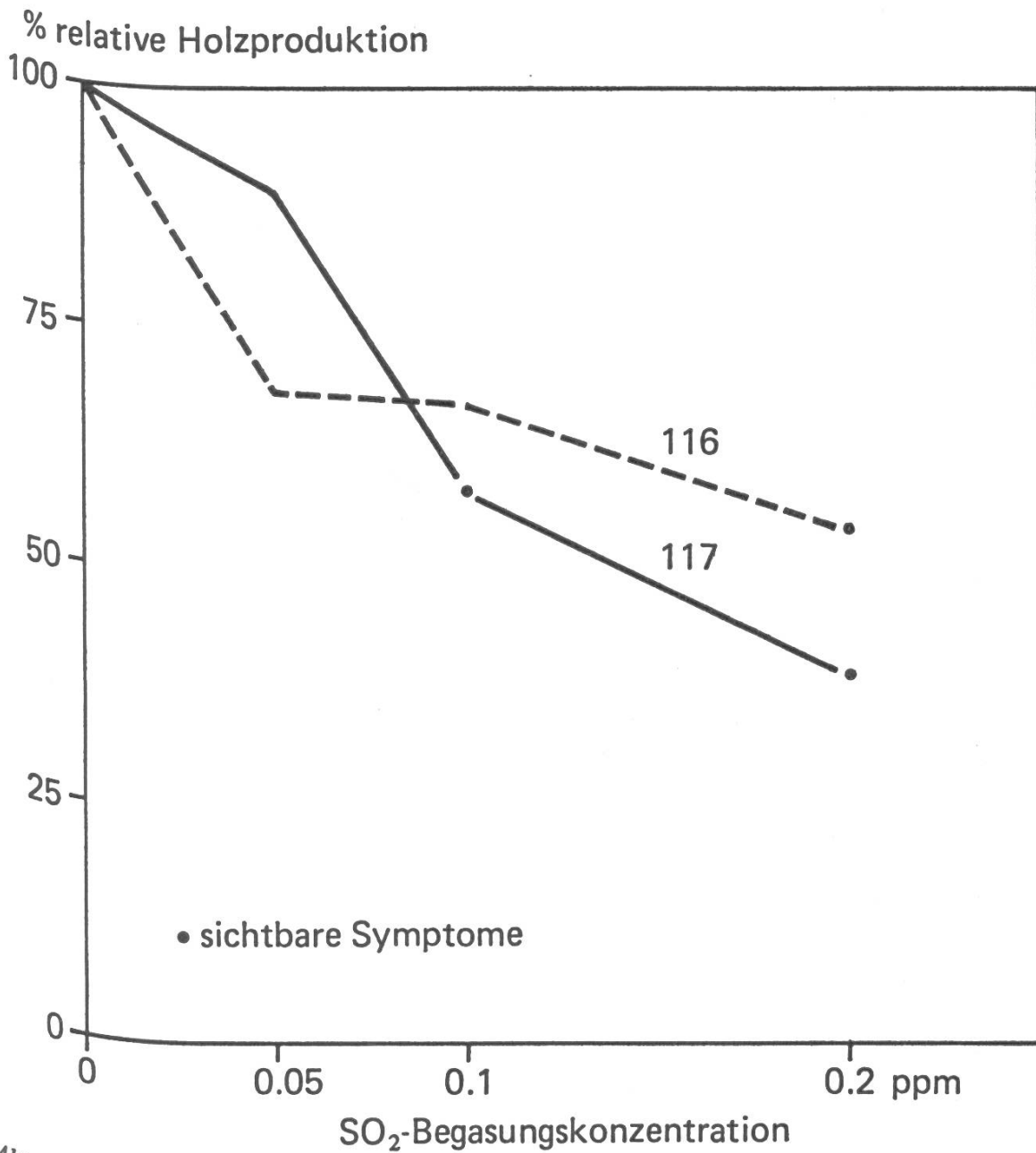


Abbildung 7. Einfluss einer mehrwöchigen SO₂-Begasung im Frühjahr auf die relative Holzproduktion zweier Fichtenklone. Eine Produktionseinbusse zeigt sich schon im Bereich ohne äusserlich sichtbare Symptome.

führen, dass Ende Dezember äusserlich keine Schädigung der Bäume wahrzunehmen war. Viele Nadeln, welche in den folgenden Wochen noch grün abfielen, waren jedoch bereits tot und ohne Enzymaktivität. Ihre Mischung mit noch lebenden, aktiven Nadeln führte dann zu einem relativ geringen Wert.

In Abbildung 9 ist eine andere biochemische Methode, die Erfassung des Gehalts an Ascorbinsäure (Vitamin C) in Fichtennadeln, mit einem ökologischen Parameter, der durch Spätfröste im Frühjahr 1979 verursachten Knospenmortalität, gekoppelt. Schon früher wurde gefunden, dass der

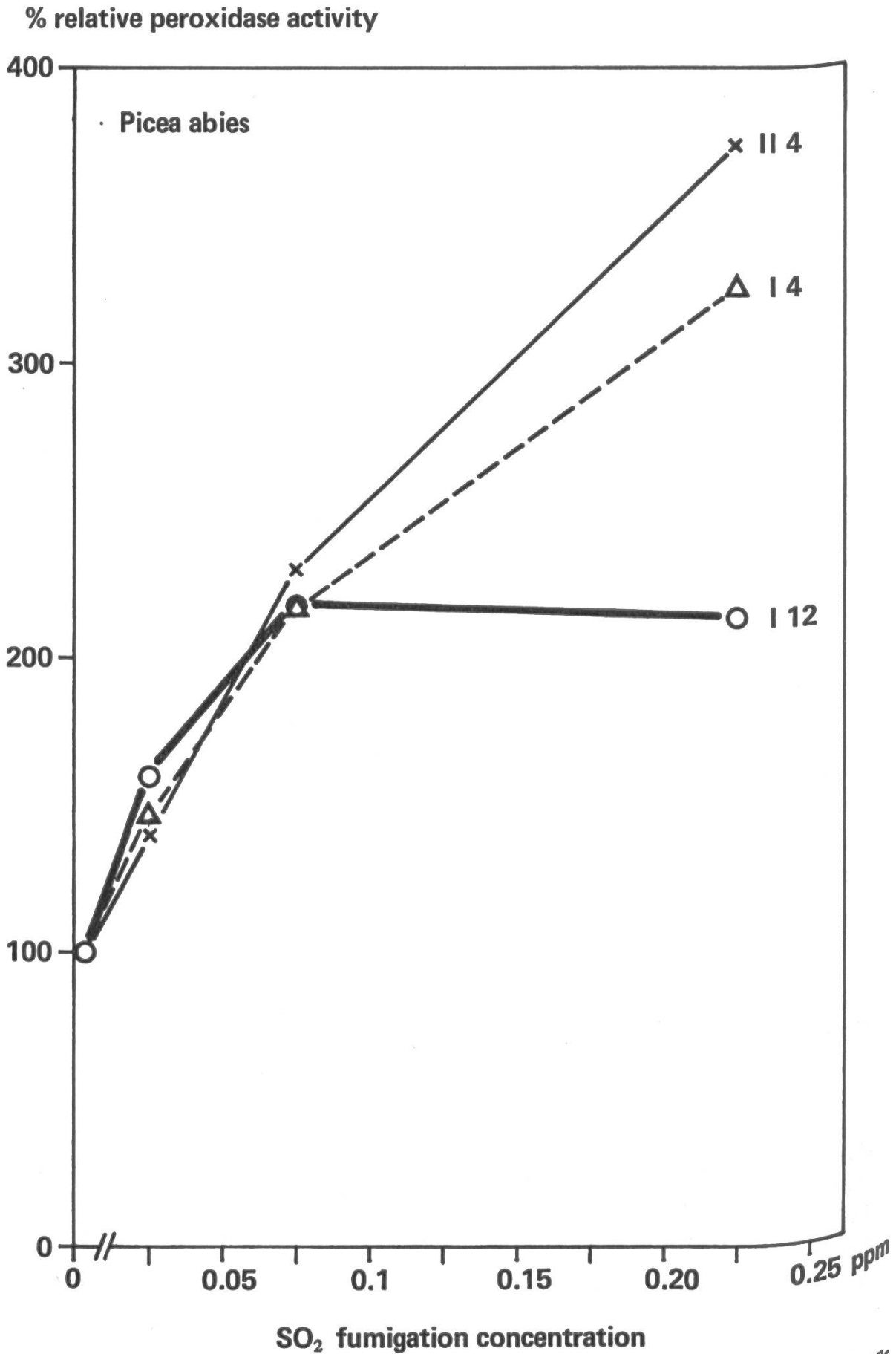


Abbildung 8. Steigerung der Aktivität des Entgiftungsenzyms Peroxidase in Fichten-
 nadeln durch eine dreimonatige SO₂-Begasung im Winter («Vegetationsruhe»):
 I: Begasung 2. 10. 1978 bis 3. 1. 1979
 II: Begasung 3. 1. 1979 bis 2. 4. 1979

% bud mortality

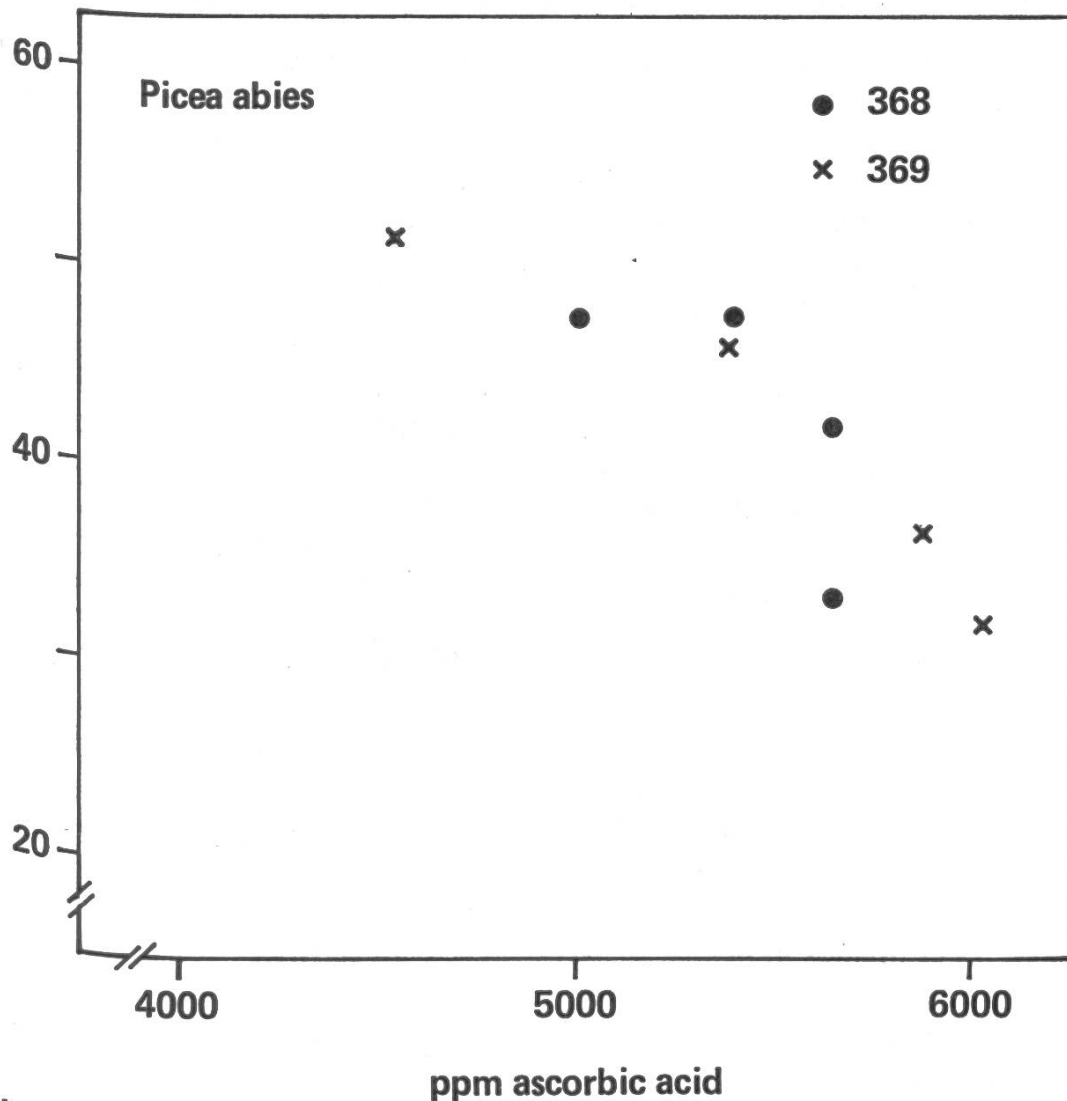


Abbildung 9. Beziehung zwischen dem Gehalt von Fichtennadeln an Ascorbinsäure und an der durch Spätfröste induzierten Triebmortalität nach dreimonatiger SO₂-Begasung (3. 1. bis 2. 4. 1979). Zwei Klone mit je 10 Wiederholungen pro Wert.

Ascorbinsäuregehalt unter dem Einfluss von Luftverunreinigungen absinkt (Keller und Schwager, 1977). Diese Abbildung bringt die experimentelle Bestätigung, dass die in ausländischen Rauchschadensgebieten oft beobachteten «Frostschäden» weitgehend auf Luftverunreinigungen zurückzuführen sind.

Damit gilt es, aus der Palette der Möglichkeiten die geeignetsten auszuwählen, beziehungsweise jene Kombinationen zu treffen, die am ehesten erlauben, den Nachweis zu führen, dass eine Belastung durch Luftverunreinigungen vorliegt.

Résumé

Méthodes de détermination de l'action des polluants atmosphériques

On dispose en sylviculture de différentes méthodes pour constater, si une forêt est soumise à un stress occasionné par des polluants atmosphériques. Ces méthodes sont toutefois coûteuses. En outre, elles fournissent relativement peu d'information lorsqu'elles sont utilisées pour elles-mêmes. Les méthodes ainsi que certains de leurs avantages sont présentés dans le tableau 1.

La photographie aérienne, notamment la technique de l'infrarouge couleur, donne une bonne vue d'ensemble de la vitalité des arbres d'une région, sans toutefois rendre compte de ses variations. Des méthodes d'analyse chimique ont été développées dans le but de saisir maintes composantes de l'air. Elles sont conçues tantôt comme de simples méthodes additives, tantôt comme des méthodes faisant appel à des appareils à enregistrement continu coûteux et le plus souvent dépendant du réseau électrique. Par contre, l'analyse foliaire offre la possibilité de détecter les éléments chimiques contenus dans l'air, que la feuille filtre, absorbe et met en réserve (par exemple S, F, Cl, poussières métalliques). Normalement, ces substances ne doivent être présentes qu'en petites quantités. L'analyse foliaire et l'analyse de l'air renseignent le plus souvent de façon insuffisante sur la toxicité biologique des substances analysées.

Dans de nombreux cas, on ne fait simplement que détecter la présence ou constater l'absence de symptômes visibles de dégâts. Si aucun symptôme n'est apparent, on admet que tout est en ordre. De plus, le fait que les symptômes ne sont le plus souvent pas typiques ou pas spécifiques de polluants atmosphériques déterminés, reste inaperçu. Pour remédier à ce manque de spécificité, on recourt fréquemment à des plantes indicatrices particulièrement sensibles aux polluants atmosphériques.

A l'aide de l'analyse des cernes du bois, on peut dans de nombreux cas détecter une influence néfaste sur la croissance des arbres, mais on ne peut, en revanche, rien dire sur la cause de la réduction de croissance. Dans les méthodes écologiques, on se sert de certains segments du spectre des espèces d'un écosystème pour démontrer comment la pollution atmosphérique agit sur lui. Par les méthodes physiologiques et biochimiques, on étudie l'influence des polluants atmosphériques sur des processus vitaux, selon une échelle comprise entre les dégâts latents et les dégâts aigus.

Traduction: R. Amiet

Literatur

- Bader, C. (1974): Die Bedrohung der humusbildenden Bodenfauna durch Fabrikimmisionen. Schweiz. Z. Forstwes., 125: 388—393.
- Haut, H. van; Stratmann, H. (1970): Farbtafelatlas über Schwefeldioxidwirkungen an Pflanzen. Girardet, Essen.
- Jacobson, J. S.; Hill, A. C. (1970): Recognition of Air Pollution Injury to Vegetation: A Pictorial Atlas. Air Pol. Control Assoc. Pittsburgh.

- Keller, Th. (1975): Zur Phytotoxizität von Fluorimmissionen für Holzarten. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt. 51: 303—331.
- Keller, Th. (1977 a): Der Einfluss von Fluorimmissionen auf die Nettoassimilation von Waldbaumarten. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt. 53: 161—198.
- Keller, Th. (1977 b): Begriff und Bedeutung der «latenten Immissionsschädigung». Allg. Forst- und Jagdztg. 148: 115—120.
- Keller, Th. (1980): Der Wald als Bioindikator für Luftverunreinigungen. Schweiz. Z. Forstwes., 131: 235—238.
- Keller, Th.; Schwager, H. (1977): Air pollution and absorbic acid. Eur. J. For. Path 7: 338—350.
- Pollanschütz, J. (1971): Die ertragskundlichen Messmethoden zur Erkennung und Beurteilung von forstlichen Rauchsäden. Mitt. Forstl. Bundes-Vers. Anst. Wien, 92: 153—206.
- Posthumus, A. C. (1976): The use of higher plants as indicators for air pollution in the Netherlands. In: Proceedings of the Kuopio meeting on plant damages caused by air pollution (ed. L. Kärenlampi), p. 115—120.
- Rudolph, E. (1978): Wirkungen von Luftverunreinigungen auf pflanzliche Indikatoren in Bayern. Schriftenreihe Naturschutz und Landschaftspflege, Heft 9: 7—44.
- Züst, S. (1977): Die Epiphytenvegetation im Raume Zürich als Indikator der Umweltbelastung. Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftg. Rübel, Zürich, 62, 113 pp.