

II. RÜCKBLICK – AUSBLICK

Immissionsforschung am Institut für Pflanzenphysiologie der Karl-Franzens-Universität Graz

Von Otto HÄRTEL

Mit 9 Abbildungen im Text

Eingegangen am 1. April 1986

1. Einleitung

Ein neues Arbeits- und Forschungsprogramm eines Institutes kann als Ergebnis einer logischen Folgerung aus der Kenntnis offener Fragen zu einem Problemkreis erwachsen, es kann durch besondere Umstände des Umfeldes bestimmt werden, die zur Bearbeitung bestimmter Fragen herausfordern, oder es kann auch auf einen simplen Zufall zurückgehen. Wenn das Institut für Pflanzenphysiologie neben der ins vorige Jahrhundert zurückreichenden zellphysiologischen Tradition (vgl. THALER 1986) nach dem Zweiten Weltkrieg einen weiteren Schwerpunkt seiner Arbeit in der Beschäftigung mit Wirkungen anthropogener Umweltfaktoren auf die Pflanze gefunden hat und hierin, es darf in aller Bescheidenheit vermerkt werden, ein gewisses Mitspracherecht auch auf internationaler Ebene erworben hat, so haben dabei günstige Umweltbedingungen, aber auch der Zufall eine wesentliche Rolle gespielt. Gerne hat der Schreiber dieser Zeilen die Einladung der Schriftleitung der „Mitteilungen“ aufgegriffen, die in dieses Gebiet fallenden Aktivitäten zusammenfassend darzustellen, bot sie doch Gelegenheit, eine breitere interessierte Öffentlichkeit über die Arbeit eines Universitätsinstitutes zu einem dramatisch drängenden aktuellen Problem zu informieren. Auch für die daran Arbeitenden kann es nur von Nutzen sein, sich einmal über das bisher Getane Rechenschaft zu geben. Schließlich sollte, auch wenn der Zeitraum, über den zu berichten ist, nur knapp vierzig Jahre umfaßt, der wissenschaftshistorische Aspekt nicht ganz außer acht gelassen werden. In diesem Sinne mögen auch eingestreute persönliche Reminiszenzen verstanden werden.

Als der Autor 1946 seinen Dienst als Assistent am Pflanzenphysiologischen Institut der Universität Graz antrat, wurde er, ökologisch zwar „vorbelastet“, doch bald mit einem für ihn völlig neuen, heute würden wir sagen Umweltproblem konfrontiert. Im Gebiet des Mürz- und Murtales waren schwere Schäden in Wäldern aufgetreten, die den nach Wiederaufbau der im Kriege zerstörten und nun verstärkt

arbeitenden Industrierwerken angelastet werden mußten. Als Sachverständiger war der Forstmann Hofrat Dipl.-Ing. Josef DIMITZ beigezogen worden, er galt damals als der Fachmann in Rauchschadensangelegenheiten, sozusagen als der „Rauchschadenspapst“. Die schon in der Mitte des vorigen Jahrhunderts geprägte Bezeichnung „Rauchschäden“ für die Einwirkungen von Industrieexhalationen ist nach heutigen Begriffen freilich unpräzise, aber für eine exaktere Terminologie bestand damals zunächst weder Veranlassung noch Bedürfnis. Bewertet und beurteilt wurde nach einer von DIMITZ aufgestellten Tabelle, die zwar durch ihre Einfachheit bestach, jedoch ausschließlich auf praktischer Erfahrung beruhte und, wie auch ihr Schöpfer zugeben mußte, durch keinerlei wissenschaftlich begründete Daten oder ertragskundliche Messungen gestützt war; sie gründete sich ausschließlich auf subjektiv feststellbare Veränderungen, von denen auf einen Ertragsrückgang geschlossen wurde. Wenn auch die „DIMITZ-Skala“ in dieser Form heute keinerlei Aktualität mehr besitzt, sei sie, schon aus historischen Gründen, hier leicht gekürzt wiedergegeben (Tabelle 1).

Schadens- klasse	I	II	III	IV	V
Höhen- zuwachs	normal	gering ver- mindert	stark ver- mindert	sehr stark vermindert	fast stillstehend
Nadel- länge	normal	die jüng- sten kürzer	die Hälfte kürzer	fast alle kürzer	alle sehr kurz
Nadel- farbe	fahlgrün vz. gelb- spitzig	fahlgrün vz. rot- fleckig	fahlgrün rotfleckig vz. rotbraun	fahlgrün hfg. rot- braun	rotfleckig rotfleckig bis grau
Entnade- lung	nur Äste schwach	nur Äste stark	Äste sehr stark, Zwei- ge schwach	Äste und Zweige stark	Äste und Zweige sehr stark
Nadelmenge angenommener Zuwachsverlust bis 20%	90–80%	80–60%	60–40%	40–20%	< 20%
		21–40%	41–60%	61–80%	81–100%

Die Schwächen der Tabelle sind offenkundig. Sie setzt voraus, daß alle beobachteten Veränderungen auf Abgaswirkungen beruhen, auch die Linearität der Ertragsabnahme ist natürlich eine durch nichts begründbare Annahme. Im übrigen verließen sich damals die Schätzungen weitgehend auf den berühmten „Götterblick“. Es soll aber in diesem Zusammenhang nicht unerwähnt bleiben, daß neuerdings für großflächige Erhebungen zum sog. „Waldsterben“ Schätzskalen, die sich auf die gleichen Symptome stützen, vorgeschlagen wurden, freilich ohne daraus Schätzungen von Ertragseinbußen abzuleiten.

Offenbar im Bewußtsein der Schwächen seiner Tabelle hat DIMITZ gegen Ende der vierziger Jahre den Schreiber dieser Zeilen um Unterstützung von pflanzenphysiologischer Seite gebeten. Ich habe zugestimmt, da ich in der Beeinflussung der Bäume durch schädigende, in der Luft enthaltene Agentien nicht nur ein phytopathologisches Problem sah, sondern eines, das, faßt man insbesondere die Kausalanalyse ins Auge, auch den Pflanzenphysiologen interessieren muß.

2. Abgaswirkungen und Pflanzenphysiologie

Nach Studium der schon damals recht umfangreichen, bis in die Mitte des vorigen Jahrhunderts reichenden Literatur stellte sich dem Pflanzenphysiologen die Aufklärung der Wirkkette Abgasausstoß (= Emission) → Intensität der Einwirkung der Abgase auf die Pflanze (= Immission) → Reaktion der Pflanze auf diese und schließlich → der auftretende wirtschaftliche Schaden als eine Art Indizienprozeß dar. Wenn auch die Höhe der Schäden in den Waldbeständen im allgemeinen mit dem Abgasausstoß korreliert ist, so sagt dieser doch nichts über die am gegebenen Ort herrschenden Immissionen aus, und eine Ertragsminderung kann umso sicherer auf den Einfluß von Abgasen zurückgeführt werden, je besser die physiologische Reaktion des Baumes auf die Abgase bekannt ist. Aus der Literatur, den Erfahrungen der Forstleute und auch aus eigenen Beobachtungen war es unzweifelhaft, daß mit Beeinflussungen der Waldbäume zu rechnen ist, lange bevor äußerliche Schadensmerkmale erkennbar sind. Der in der Literatur wie im Gespräch immer wieder auftauchende Begriff „unsichtbare Schäden“ schien mir indes ein Widerspruch in sich zu sein, denn ein Schaden, den man nicht sieht oder nicht erkennt, kann eben noch kein Schaden sein! Nicht viel besser steht es um den ähnlichen, vielgebrauchten Ausdruck „latenter Schaden“. Diese Ausdrücke bedeuten doch nichts anderes als die Annahme von Einwirkungen, die zumindest vorderhand noch keine subjektiv erkennbaren Folgen zeitigt haben, mit geeigneten und entsprechend empfindlicheren Methoden aber wohl erkennbar sein müssen. Hier schien eine begriffliche Klärung notwendig, denn Forstmann wie Physiologe stimmen darin wohl überein, daß eine möglichst frühzeitige Erkennung eines Abgaseinflusses die Sicherheit der Diagnose nur erhöhen kann. Eine derartige Klärung, in der drei Stufen der Wirkungen äußerer Insulte auf Lebewesen unterschieden werden, wurde allerdings erst viel später publiziert (HÄRTEL 1976). Relativ schwache Einwirkungen (z. B. von SO₂) können wohl verschiedene Lebensvorgänge beeinflussen; solange aber ihre Stärke und/oder ihre Zeitdauer eine kritische Schwelle nicht überschreitet, ist diese Reaktion, ich habe sie „Auslenkung“ genannt, völlig reversibel, sie klingt ab, ohne irgendwelche Spuren in der weiteren Entwicklung zu hinterlassen. Überschreitet jedoch die Auslenkung ein bestimmtes Ausmaß oder eine bestimmte Einwirkungsdauer, kann sie nicht mehr voll rückgängig gemacht werden, die Stoffproduktion bleibt vermindert, das Wachstum kann reduziert sein usw.; dies bedeutet eine „Schädigung“ der Pflanze, sie ist noch zur Gänze mit pflanzenphysiologischer Terminologie zu beschreiben. Allerdings stellt z. B. eine dauernd verminderte Stoffproduktion, die sich u. a. in vermindertem Holzzuwachs äußert, auch einen wirtschaftlichen „Schaden“ dar. Ein solcher kommt natürlich auch zustande, wenn zu starke oder zu lange dauernde Einwirkungen vorangegangen sind, so daß sie letale Folgen haben. Jedenfalls sollte der Begriff „Schaden“ nur im ökonomischen Sinne, also zur Bezeichnung einer wirtschaftlich ins Gewicht fallenden Ertrags- oder Wertminderung gebraucht werden. In diesem Sinne kann „Rauchschadensforschung“ nur der Forstmann betreiben, und damit erscheinen die Arbeits- und Aufgabengebiete des Forstmannes und des Pflanzenphysiologen klar abgegrenzt.

Übrigens sollte auch der erste Wortteil in „Rauchschaden“ nicht mehr gebraucht werden. Rauch ist eine Suspension fester Teilchen kolloidaler Größenordnung, die physiologisch wenig wirksam sind. Auch der Terminus „Abgaswirkungen“ umschreibt die Thematik ungenügend, denn neben gasförmigen Immissionen ist auch mit

flüssiger Deposition (wie beim vielberufenen „sauren Regen“) zu rechnen, ferner mit Schwermetalleintrag usw. Alle diese Einwirkungen werden heute unter dem Begriff „Immissionen“ zusammengefaßt (dazu zählt u. a. auch Lärm), so daß man am besten allgemein von „Immissionswirkungen“ spricht.

Noch gab es keine verbindlichen Schemata zur Durchführung derartiger Erhebungen mit dem Ziele gutachtlicher Sicherung behaupteter Schäden in Waldbeständen. Jeder damit Befasste mußte sich unter Bedachtnahme auf die Fragestellung und die örtlichen Gegebenheiten sein Verfahren zurechtlegen und vertreten. An objektiven Kenngrößen standen im wesentlichen integrative Verfahren zur Erfassung des in der Luft vorhandenen bzw. verfrachteten SO_2 (LIESEGANG-Glocken oder die für Erhebungen im Wald besser geeigneten Barytlappen nach OST) zur Verfügung sowie die Bestimmung des Schwefelgehaltes der Vegetationsorgane. Fehlende Standardisierung der Probenwerbung und der Analytik erschwerten oft die Beweisführung und den Vergleich von Erhebungen aus verschiedenen Immissionsgebieten. Aber es kam ja damals in erster Linie darauf an, das von einer „Rauchquelle“ (heute sprechen wir von Emittenten) betroffene Gebiet möglichst genau zu umgrenzen und in diesem Zonen unterschiedlichen Belastung auszuscheiden. Es waren ja die „Rauchschadensgebiete“ (im heutigen Sprachgebrauch „Immissionsgebiete“), zumindest bei uns in den Alpenländern, noch relativ eng begrenzt. Nach strenger Vergleichbarkeit von Erhebungen aus verschiedenen Schadensgebieten bestand vorderhand kein vorrangiges Bedürfnis.

Zweifellos ist der Schaden in einem Bestand im allgemeinen mit dem Abgasausstoß korreliert, doch sagt dieser noch nichts über die an einem gegebenen Ort tatsächlich wirksame Belastung durch Abgase (also über die Immissionsstärke) aus. Die Bereitschaft, für die nicht unbeträchtlichen Kosten von Schwefelanalysen an den Nadeln aufzukommen, war nicht selten mit dem, namentlich von der Verursacherseite vorgebrachten Hinweis auf ältere Literatur, nach der auch an gesunden Bäumen exzessive Schwefelgehalte auftreten könnten, stark gemindert. Ein Test, der als fehlendes Glied in der oben angeführten Indizienkette die physiologische Reaktion des Baumes, insbesondere natürlich der Fichte, möglichst spezifisch erkennen läßt und der zudem auch billig sein sollte, schien dringend erwünscht. Hier kam nun der eingangs erwähnte Zufall zu Hilfe.

3. Der Trübungstest

Ich hoffte, in einem zusätzlich durch starke Staubimmissionen gekennzeichneten „Rauchschadensgebiet“ die Abgrenzung und Zonierung mittels umständlicher Schwefelanalysen umgehen zu können, indem ich versuchte, die Stärke der Staubauflagerung durch Abwaschen der Nadeln mit Wasser festzustellen. Versuche mit kaltem Wasser blieben erfolglos, desgleichen mit warmem; es löste sich nichts, das Waschwasser blieb klar. Vom Mißerfolg im vorhinein überzeugt, kochten wir Zweige ein paar Minuten – und es ergab sich ein milchig-trüber Extrakt! Er war jedoch nicht durch Staub verursacht, sondern organischer Natur. Erste Reihenversuche ergaben, daß weitab vom Emittenten die Nadelabkochenungen nur opaleszierend bis leicht trübe waren und mit Annäherung an die Abgasquelle immer trüber, in Extremfällen sogar milchig wurden. Von Herrn cand. EISENZOPF unterstützt, wurde das günstigste Verhältnis von Nadelmenge zu Wasser (2 g frische, möglichst im Herbst geerntete

Fichtennadeln der beiden letzten Triebe auf 12 ml Wasser) und die optimale Kochdauer (12 min im Kochsalm- oder Glycerinbad) ermittelt. Mit dem zur Verfügung stehenden Photometer (Helige BioPhotoCol) ergaben sich so Trübungswerte, die von 20 % Lichtabsorption bei Nadeln aus reiner Luft bis etwa 80 % an extrem durch SO_2 belasteten Fichten reichten. Bald konnte ein erster Großversuch gestartet werden. Aus einem sehr unterschiedlich belasteten Immissionsgebiet erhielt ich 100 nur mit Nummern bezeichnete Zweigproben zur Untersuchung nach dem neuen Verfahren. Der nachträgliche Vergleich an Ort und Stelle ergab, daß etwa 90 % der Proben ein Testergebnis brachten, das mit den Erwartungen bzw. mit den bereits vorliegenden Erhebungen übereinstimmte! Damit hatte das neue Verfahren auch schon seinen Namen: Trübungstest (HÄRTEL 1953). Er wurde der 1. Internationalen Arbeitstagung forstlicher Rauchschadenssachverständiger 1957 in München vorgelegt und nach eingehender Prüfung auf der 2. derartigen Tagung 1959 in Bochum als Test anerkannt. Aus langjährigen Meßreihen in verschiedenen Immissionsgebieten ergaben sich eindeutige Zusammenhänge der Testresultate mit der Entfernung vom Emittenten, mit den Luftanalysen sowie mit den Schwefelgehalten der Nadeln (HÄRTEL 1972 a, Abb. 1); zu den Jahresringbreiten ergeben sich die besten Korrelationen mit einer zeitlichen Verzögerung von 3 Jahren, was wohl mit der Regeneration geschädigter Nadeljahrgänge zusammenhängt (HÄRTEL 1972 a). PELZ 1958 und PELZ & DELLING 1963 konnten zeigen, daß der Test auch bei der Tanne anwendbar ist und außer SO_2 auch Fluor-Immissionen anzeigt. DÄSSLER 1963 bezeichnet den Trübungstest als den besten biologischen Test auf Abgaswirkungen, den wir besitzen.

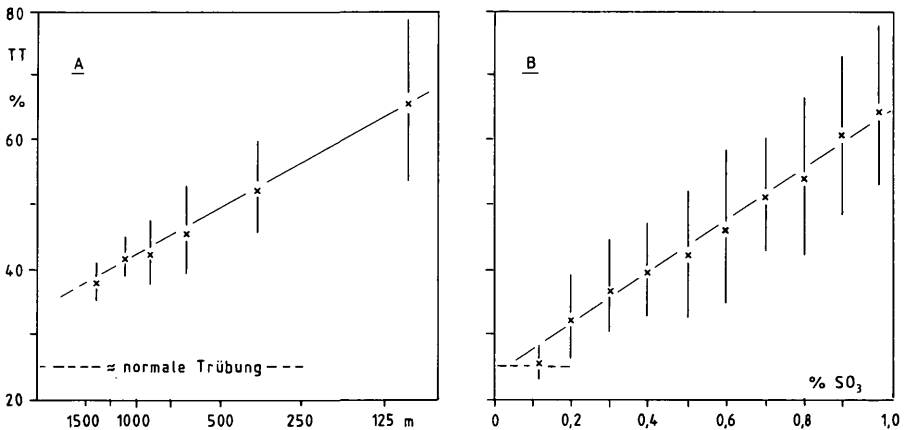


Abb. 1: Zusammenhang zwischen dem Ausfall des Trübungstests (in % Lichtabsorption der Nadeldekotte, Ordinate) und der Entfernung vom Emittenten (A, Entfernung in logarithmischem Maßstab aufgetragen) und mit dem Schwefelgehalt der Nadeln (B, die größeren Streuungen rühren davon her, daß mehrere Immissionsgebiete vereinigt wurden). Nach HÄRTEL 1982.

Überraschenderweise ergab der Trübungstest in Höhenlagen von 900 bis 1100 m vielfach exzessiv hohe Werte, die keinesfalls auf SO_2 -Einwirkungen zurückgeführt werden konnten. Die Schwefelwerte der Nadeln erwiesen sich als völlig normal, doch war diese Erhöhung der Trübungswerte in Industrieregionen wesentlich deutlicher als

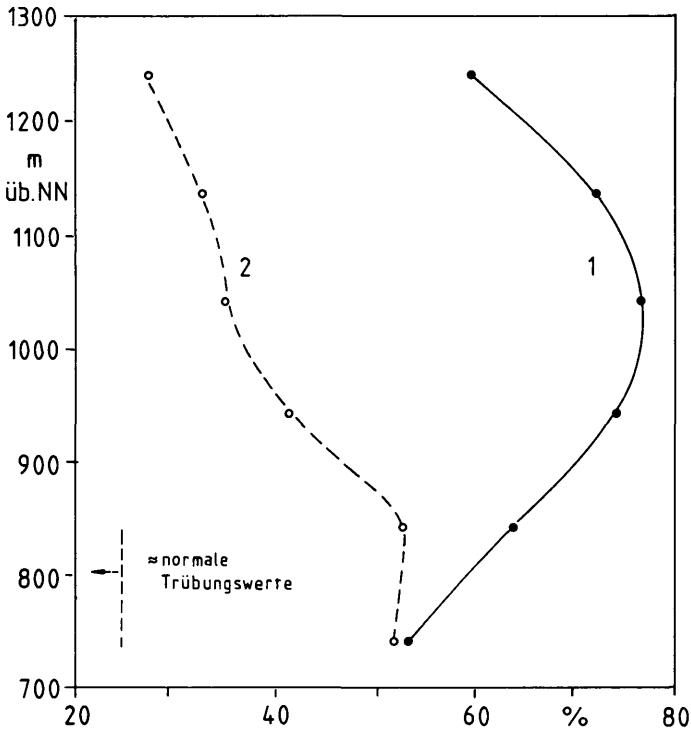


Abb. 2: Höhenprofil der Trübungswerte in der Nähe eines Industrierwerkes. Während auf Grund der Schwefelwerte mit der Höhe abnehmende Trübungswerte zu erwarten wären (Kurve 2, gestrichelt, vgl. hierzu auch Abb. 1), sind die tatsächlich beobachteten Trübungswerte in 900 – 1000 m über NN (Nebelzone, 1) maximal. Dies legt die zusätzliche Einwirkung von Ozon oder anderer Photooxidantien nahe.

in industriefernen Regionen. Da derartige exzessive Werte stets in der Höhe der Nebelzone, also der Obergrenze der Inversionszone gefunden wurden, lag die Annahme nahe, daß Photooxidantien die Ursache sein könnten (GRILL & HÄRTEL 1973, Abb. 2).

Es war auffallend, daß der Trübungstest vor allem in den östlichen Nachbarländern, Tschechoslowakei, Ungarn, Jugoslawien, Polen, Beachtung fand, offenbar, weil sich mit ihm eine einfache und billige Methode zur großflächigen Erhebung von Immissionsgebieten anbot. In Österreich, in der Bundesrepublik und in den übrigen westlichen Ländern wurden den zweifellos exakteren Bestimmungen der Schwefelgehalte und den mittlerweile automatisierten gasanalytischen Meßmethoden der Schadstoffgehalte der Luft der Vorzug gegeben, zumal inzwischen auch mit der „Technischen Anleitung Luft“ (TAL) 1963 in der Bundesrepublik beispielgebend verbindliche Richtlinien für Probennahme und Durchführung der Messungen gegeben wurden. Damit waren andere Methoden zwar nicht explizit verdrängt, aber auch nicht gerade in den Vordergrund des Interesses gerückt.

Für den Test war sicher die nicht unbeträchtliche Streuung der Werte von Nachteil, vor allem aber, daß noch immer unbekannt war, was der Test wirklich anzeigt (KELLER et al. 1976). Die ursprüngliche Vermutung, unterschiedlich starke

Wachsausscheidungen der Nadeln wären die Ursache der verschiedenen Trübungswerte, konnte nicht aufrechterhalten werden (HÄRTEL 1960 a). Bemühungen in Graz und an anderen Instituten der BRD und der ČSSR, den Test zu erklären, blieben vorerst erfolglos. Der Umstand, daß der Test auf Trockenheit, Parasitenbefall oder ähnliche Insulte offenbar nicht anspricht, jedoch SO_2 und Fluor, aber offenbar auch Ozon und andere Photooxidantien anzeigt, erleichtert eine Erklärung keineswegs. Im Gegensatz zu den bisherigen Erklärungsversuchen, die durchwegs den Chemismus der trübenden Substanz ins Auge gefaßt hatten, gingen wir nunmehr von der Überlegung aus, daß nicht die verschiedene Menge einer trübenden Substanz für den Ausfall des Tests bestimmend sein könnte (sie müßte um einen Faktor mehr als 10 variieren), sondern verschiedene Diffusionswiderstände, die dem Austritt eines die Trübung bestimmenden Stoffes aus der Nadel entgegenstehen. Tatsächlich konnte FUCHSHOFER 1985 zeigen, daß die Gegenwart von freiem Ca^{2+} -Ion für den Ausfall des Tests bestimmend ist. Freies Calcium-Ion dichtet die Epidermisaußenwände ab, sodaß die Extrakte fast klar bleiben, Entzug oder Festlegung des Ca^{2+} als Gips, wie dies bei höheren Sulfatgehalten der Fall ist, führt zu höherer Durchlässigkeit der Nadelaußenwände und damit zu höheren Trübungswerten; ähnliches ist bei der Festlegung des Calciums als unlösliche Fluorverbindungen der Fall. Photooxidantien führen, wie man neuerdings weiß, zur Auswaschung von Magnesium und vor allem von Calcium aus der Nadel, wodurch sie gleichfalls an Calcium verarmt und die Trübung steigt. So läßt sich durch die ganze Trübungsskala von gesunden bis zu stark abgasbelasteten Nadeln reproduzieren (FUCHSHOFER & HÄRTEL 1985).

Auf Grund dieser Ergebnisse und der bei deren Erarbeitung gewonnenen Erfahrungen methodischer Art konnte nun auch eine verbesserte Vorschrift zur Durchführung des Tests gegeben werden (HÄRTEL & FUCHSHOFER 1986, im Druck). Ob damit der Test wieder verstärkt angewendet werden wird, bleibt abzuwarten. Wiewohl nach diesen Ergebnissen der Chemismus der trübenden Substanz von eher zweitrangiger Bedeutung erscheint, wird am Institut daran im Rahmen eines Forschungsprogramms zum Waldsterben gearbeitet, auch der Frage der Ozonwirkung auf den Ausfall des Tests wird dabei erhöhtes Augenmerk geschenkt.

4. Zellphysiologie

Die Beschäftigung mit den Wirkungen von Abgasen auf die Fichtennadeln führte natürlich auch zur Frage, was denn in ihnen und überhaupt in den Geweben und Zellen der Pflanzen unter dem Einfluß von SO_2 geschieht. Dazu war es aber erforderlich, eine geeignete Begasungseinrichtung zu entwickeln. Natürlich existierten derartige Einrichtungen bereits; um aber, der Tradition des Institutes folgend, derartige Fragen mit zellphysiologischer Methodik zu bearbeiten, wären Vorrichtungen mit Dosierpumpen u. dgl. für Serienversuche doch zu umständlich und schwerfällig gewesen. HÄRTEL & MIKLAU 1971 entwickelten dazu eine einfache Methode zur Darstellung definierter SO_2 -Partialdrucke. Im abgeschlossenen Raum (zunächst wurden abgedichtete Glasglocken benutzt) stellen sich über verschiedenen konzentrierten NaHSO_3 -Lösungen entsprechende SO_2 -Partialdrucke ein; das SO_2 löst sich in Wasser zu H_2SO_3 bis zu einer vom jeweiligen SO_2 -Partialdruck abhängigen Konzentration. Durch Wahl der geeigneten Konzentration von Sulfitlösung können so Lösungen von schwefeliger Säure von der jeweils benötigten (meist sehr niedrigen)

Stärke hergestellt werden. SO_2 - und H_2SO_3 -Konzentrationen können einem in der genannten Arbeit wiedergegebenen Diagramm entnommen werden.

Mit dieser sog. „Glockenmethode“ wurde das Verhalten verschiedener zellphysiologischer Parameter gegenüber SO_2 untersucht. Dabei zeigte sich, daß osmotische Prozesse am empfindlichsten auf SO_2 reagieren; mit dem Gewebstreifenfest nach GÄUMANN konnte eine Beeinflussung der wasserhaltenden Kraft der Zelle bereits bei einer H_2SO_3 -Konzentration von $1,7 \cdot 10^{-6}\text{N}$ festgestellt werden, was einer im Verhältnis von 1 : 7.000.000 verdünnten Säure entspricht; dies stimmt mit einem mit anderer Methodik erhaltenen Befund ANDRÉS 1934 gut überein. Die weit größeren Moleküle des Betazyans beginnen aus Scheibchen der Roten Rübe erst in 10^{-4}N -Säure auszutreten (Randentest nach GÄUMANN). Geht man von der Annahme aus, daß ein Vorgang umso empfindlicher auf Insulte reagiert, je zentralere Bedeutung der Angriffspunkt im Zellgeschehen hat, dürfen wir schließen, daß offenbar osmotische Vorgänge bzw. Vorgänge an Plasmamembranen am Beginn der durch SO_2 -Einwirkungen ausgelösten Veränderungen in der Pflanze darstellen. Im Kurzzeitversuch mit relativ hohen Säurekonzentrationen zeigt sich, daß sich die Absterbegeschwindigkeit der Zellen in H_2SO_3 von der in anderen Säuren kaum unterscheidet; im Langzeitversuch mit niedrigen Konzentrationen hingegen wirkt schwefelige Säure um ein

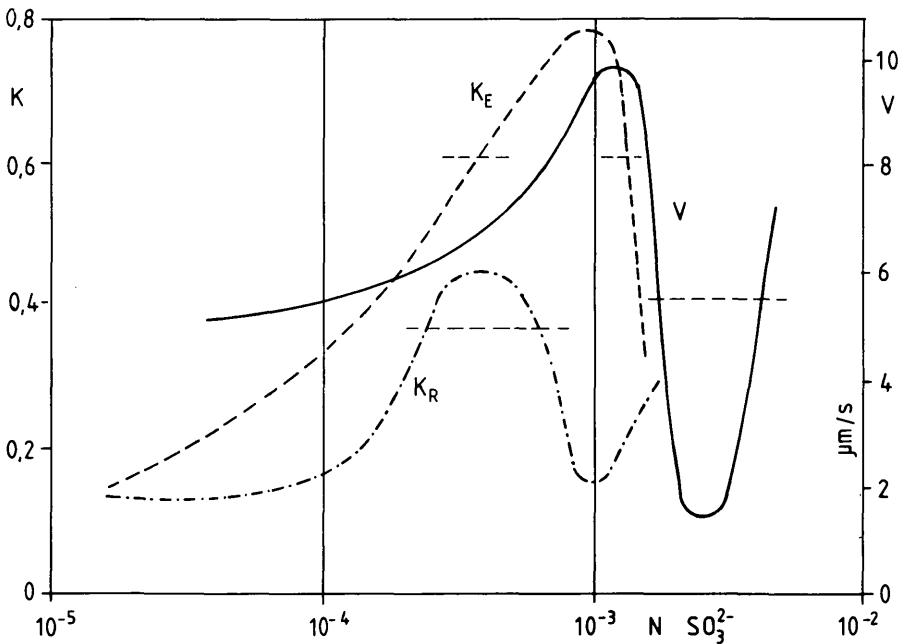


Abb. 3. Plasmolyseeintrits- (K_E) und -rückgangskonstanten (K_R , Skala links) sowie der Geschwindigkeit der Plasmaströmung (V , Skala rechts) in Abhängigkeit der Konzentration der schwefligen Säure. Die gestrichelten horizontalen Linien geben den jeweiligen Wasserwert an. Nach HÄRTEL & MIKLAU 1971.

Vielfaches toxischer als die hinsichtlich der Stärke durchaus vergleichbare Schwefelsäure. Offenbar spielt die stark reduzierende Wirkung der schwefeligen Säure eine zusätzliche Rolle.

Auch andere zellphysiologische Parameter wie Plasmaströmungsgeschwindigkeit oder die Permeabilitätskonstanten für Wasser werden schon bei Konzentrationen um $10^{-5}N$ H_2SO_3 deutlich beeinflusst. Dabei verändern sich aber die untersuchten Parameter innerhalb des untersuchten Konzentrationsbereiches (10^{-6} - $10^{-2}N$) nicht gleichförmig; es tritt vielmehr bei allen ein markantes Maximum um $10^{-3}N$ H_2SO_3 auf (Abb. 3). Eine ähnliche Unstetigkeit kehrt auch im Verhalten ganzer Zweige beim Aufsaugenlassen verschieden konzentrierter Lösungen wieder. Wenn sich auch dieses merkwürdige Verhalten einem vollen Verständnis entzieht, so liegt doch die Annahme nahe, daß hierfür Gleichgewichtszustände, ähnlich der Pufferung von Lösungen oder aber Änderungen von Redoxpotentialen, verantwortlich sein könnten.

In seiner Dissertation hat mein Schüler GRILL 1968 Fichtennadeln nach der Glockenmethode begast und anschließend an Querschnitten Zahl und Verteilung der abgestorbenen Zellen ermittelt. Die Nekrosen beginnen, wie schon lange bekannt war, an den Eintrittspforten der Blätter, in der Umgebung der Spaltöffnungen. Der weitere Verlauf hängt vom anatomischen Bau der Nadeln ab. In Schattennadeln verteilen sich die abgestorbenen Zellen gleichmäßiger über den Nadelquerschnitt, in Sonnennadeln können die zentralen Partien eher betroffen sein als die unter der Nadeloberfläche liegenden Zellen. Auffällig und überraschend ist jedoch, daß die Zahl der roten Zellen nach einem anfänglichen leichten Anstieg in den niedrigsten SO_2 -Spannungen über einen Konzentrationsbereich von etwa 1:10 unverändert bleibt und erst in hohen Konzentrationen rasch gegen 100 % ansteigt; dieses Plateau liegt wieder beiderseits $10^{-3}N$ H_2SO_3 , also im gleichen Bereich, in dem die oben beschriebenen Inhomogenitäten liegen. Dies läßt auf eine besondere Pufferwirkung in diesem Bereich schließen (Abb. 4, GRILL 1968, GRILL & HÄRTEL 1967, 1972). Durch potentiometrische Titration von Fichtennadelextrakten konnte eine deutlich erhöhte Pufferkapazität im Bereich zwischen pH 3 – 4 festgestellt werden, dies entspricht wieder ungefähr dem pH einer $10^{-3}N$ schwefeligen Säure. In Extrakten SO_2 -belasteter Fichtennadeln verschwindet dieses Maximum der Pufferkapazität weitgehend, es bleibt jedoch in resistenten Bäumen erhalten (GRILL & HÄRTEL 1972).

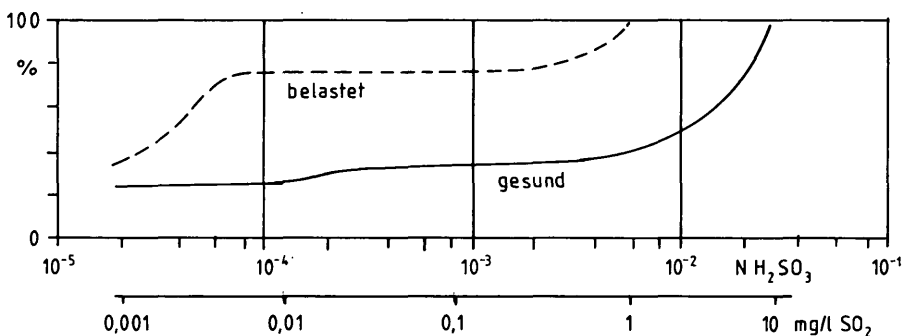


Abb. 4: Zahl der abgestorbenen Zellen an Querschnitten von Fichtennadeln (in %) nach Behandlung mit Sulfidlösungen steigender Konzentration. Die untere Skala gibt die jeweils im Gleichgewichtszustand in der Luft herrschende SO_2 -Konzentration an. Nach GRILL 1968.

5. Biochemische Untersuchungen

Da der obenerwähnte Bereich höherer Pufferung auf Carbonsäuren hinweist, war dies Anlaß, das Säuremuster der Fichtennadeln näher zu untersuchen. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Pharmazeutische Chemie der Universität Graz konnten etwa 26 Pflanzensäuren in den Fichtennadeln nachgewiesen werden, wobei Shikimi- und Chinasäure mit 80 % des Säuregehaltes dominierten; das Verhältnis der beiden Hauptkomponenten zueinander ist von der Jahreszeit und dem Entwicklungszustand der Nadel abhängig, das Säuremuster erwies sich jedoch bei allen untersuchten einheimischen Koniferen als ähnlich. Belastung durch SO_2 senkt den Säuregehalt, erwartungsgemäß nimmt dabei auch die Pufferkapazität ab. Quantitative Beziehungen zu SO_2 -Belastungen lassen sich jedoch nicht herstellen, es scheint, daß Erholungs- und Regulationsvorgänge möglich sind (LINDNER & GRILL 1978, WIND 1979).

Aufmerksamkeit wurde auch den phenolischen Komponenten in der Fichtennadel gewidmet. Der Gesamtgehalt an Phenolen nimmt unter SO_2 -Belastung um 15–20% zu (GRILL, ESTERBAUER & BECK 1975), es ist also unwahrscheinlich, daß Phenole an der Pufferung beteiligt sind; auch die Kurven der Pufferkapazität haben hierfür keinen Anhaltspunkt gegeben. Zwei Einzelkomponenten unter den Phenolen weckten besonderes Interesse, nämlich p-Hydroxyacetophenon und dessen Glucosid Picein. Ihr Verhalten ist invers zum Gesamtgehalt an Phenolen, Picein sowie das Aglucon nehmen unter SO_2 -Belastung um 25 bzw. 70 % ab; dabei ändert sich auch das optische Verhalten des Nadelextraktes, das UV-Absorptionsmaximum verlagert sich von 265 nm bei gesunden Nadeln je nach dem Grad der Schädigung bis 278 nm. Die sich damit anbietende Möglichkeit zur Diagnose der Schädigung durch SO_2 -Immissionen wurde bislang, wahrscheinlich aus apparativen Gründen, nicht aufgegriffen.

Zu tieferen Einblicken in die Resistenzphysiologie der Fichtennadeln führte hingegen die Beschäftigung mit dem Verhalten der Aminosäuren, den Bausteinen der Eiweiße. Über diesbezügliche Untersuchungen an krautigen Pflanzen liegen Literaturangaben vor, Koniferen wurden jetzt erstmalig untersucht. In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Pflanzenökologie der Universität Gießen zeigte sich, daß unter SO_2 -Einfluß vermehrt Glutaminsäure gebildet wird. Diese wird nicht nur zu vermehrter Glutaminbildung herangezogen, sondern dient auch als Ausgangspunkt für die Synthese anderer Aminosäuren. Unter Einwirkung von Fluorwasserstoff steigt die Menge freier Aminosäuren noch stärker an als durch SO_2 (JÄGER & GRILL 1975).

Von besonderem Interesse erwiesen sich hierbei die schwefelhaltigen Aminosäuren Cystein und Cystin sowie das Tripeptid Glutathion. Es sind dies Verbindungen mit Sulfhydrylgruppen (-SH) oder mit Disulfidbrücken (-S-S-), sie finden sich in der Zelle sowohl frei, also als wasserlösliche Verbindungen, oder unlöslich in Proteine eingebaut. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Biochemie der Universität Graz wurden die Veränderungen des Gehaltes an SH-Gruppen während des Jahres und unter Einfluß von SO_2 eingehend untersucht. Der Gesamtgehalt an SH-Gruppen belasteter Nadeln ist im Winter etwa doppelt, im Sommer bis viermal so hoch als in unbelasteten Nadeln, die Unterschiede bleiben auch angesichts des ausgesprochenen Jahrganges (Minimum an SH-Gruppen im Sommer, ein breites Maximum während der kühleren Jahreszeit) erhalten (Abb. 5, GRILL & ESTERBAUER 1973 a). Besonders in chronisch durch SO_2 belasteten Nadeln ist der Gehalt an proteingebundenen SH-Gruppen stark erhöht.

Für die quantitative Bestimmung der SH-Gruppen in pflanzlichem Material, insbesondere in Fichtennadeln, mußten erst geeignete Methoden ausgearbeitet bzw. vorhandene adaptiert werden (GRILL & ESTERBAUER 1973a, GRILL, ESTERBAUER & SCHARNER 1979).

Zum weitaus überwiegenden Teil, etwa zu 95%, sind die SH-Gruppen an Glutathion gebunden (GRILL, ESTERBAUER & KLÖSCH 1979). Erhöhte Glutathiongehalte sind eine unmittelbare Folge des vermehrten Sulfatangebotes; bereits 24 Stunden nach „Fütterung“ der Nadeln mit Sulfat steigt die Menge an SH-Gruppen auf das Doppelte an (unter Freilandbedingungen ist die Zunahme wesentlich langsamer). Die auch nach drastischer Zunahme der SH-Gruppen immer noch relativ geringen Absolutmengen an Glutathion sprechen gegen dessen Speicher- oder Entgiftungsfunktion; denn im Glutathion ist nur etwa 1 % des Gesamtschwefels der Zelle enthalten (GRILL, ESTERBAUER & HELBIG 1982). SH-Gruppen beschleunigen den Stoffwechsel der Pflanzen, erhöhte Glutathiongehalte haben gewissermaßen einen euphorischen Effekt. Jungfichten können unter mäßiger SO_2 -Einwirkung verstärktes Wachstum zeigen, im zweiten Jahr hingegen kommt es zu einem drastischen Rückschlag; GRILL, PFEIFHOFER, ESTERBAUER & HALBWACHS 1986 stellen gleichfalls größere Triebängen bei erhöhtem SH-Gehalt fest. Erhöhte Glutathiongehalte führen offenbar zu dauerndem Streß, der schließlich zu vorzeitigem Altern der Nadeln mit den entsprechenden Symptomen, wie Vergilbung, Nadelfall usw., führten (GRILL, ESTERBAUER & HELBIG 1982). In diesem Zusammenhang ist es bemerkenswert, daß SO_2 -resistente Fichten, wie man sie in Immissionsgebieten immer wieder finden kann, keine oder nur sehr geringe Erhöhung ihres Glutathionsgehaltes aufweisen.

Auf die im SH/S-S-System beteiligten und gleichfalls eingehend untersuchten Enzyme sei hier nicht näher eingegangen. Dieses System ist für die Aufrechterhaltung der für die Lebensvorgänge wichtigen Redoxpotentiale maßgebend. So vermag Glutathion unter geeigneten Bedingungen S-S-Brücken der Proteine zu reduzieren, d. h. zu sprengen, wobei sich die Form des Eiweißmoleküls ändern kann; vielleicht liegt hierin eine der Ursachen für die bei den zellphysiologischen Versuchen beschriebenen Unstetigkeiten des Verhaltens der Zelle im Bereich um 10^{-3}N schwefeliger Säure.

Die Beschäftigung mit den schwefelhaltigen Aminosäuren zeitigte ein bemerkenswertes Nebenergebnis in methodischer Hinsicht. Es konnte beobachtet werden, daß Sulfhydrylgruppen in Gegenwart von Ascorbinsäure wesentlich stabiler sind. Damit ist ein erheblicher Fortschritt in der Analytik der SH-Gruppen erzielt worden (GRILL, ESTERBAUER & WELT 1978).

Auch Ascorbinsäure ist gleich dem Glutathion eine wichtige Komponente im Redoxsystem der Zelle. Beide entgiften H_2O_2 und entfernen Radikale. Ihre Funktionen sind aber zweifellos verschieden und nicht unbedingt miteinander gekoppelt, wie die deutlich verschiedenen Jahresgänge der die Ascorbinsäure und das Glutathion reduzierenden Enzyme erkennen lassen (ESTERBAUER, GRILL & WELT 1980).

Ein weiterer für die innere Entgiftung wichtiger Enzymkomplex ist die Peroxidase. Es ist bekannt (KELLER et al. 1976), daß ihre Aktivität unter dem Einfluß von Luftverunreinigungen, besonders durch Fluor, deutlich erhöht ist. Der Effekt eignet sich zur Diagnose von Einwirkungen solcher Immissionen. Peroxidase ist kein einheitliches Enzym, sondern in zahlreiche Isoenzyme aufgespalten, die alle die gleiche Funktion haben, sich aber durch ihre Laufgeschwindigkeit im elektrischen Feld unterscheiden. An Fichten konnten rund 50 derartiger Isoenzyme festgestellt werden, von denen immer nur eine geringe Zahl, bei der Fichte etwa 11, gleichzeitig in einem

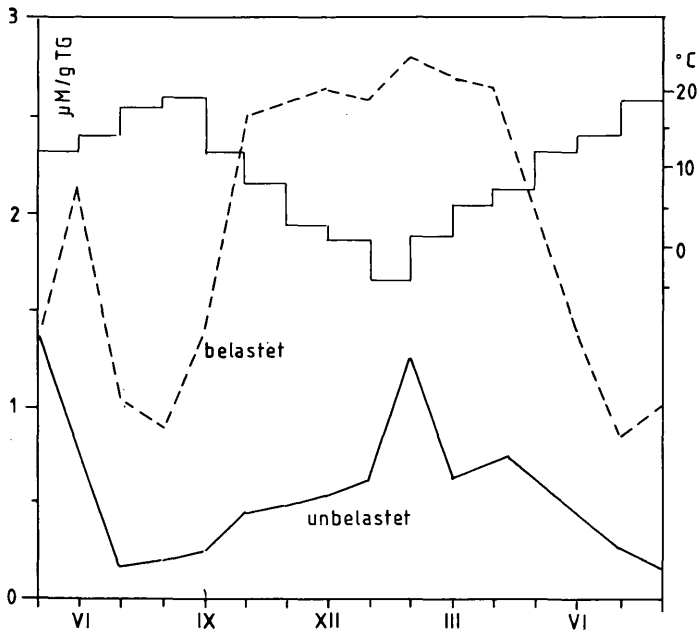


Abb. 5: Jahresgang des Gesamtgehaltes freier SH-Gruppen in unbelasteten (ausgezogen) und durch SO₂ belasteten (gestrichelt) Fichtennadeln. Treppenkurve = Monatsmittel der Temperatur. Nach GRILL & ESTERBAUER 1973 a.

Individuum auftreten; bei anderen einheimischen Koniferen ist das Isoenzymmuster auf etwa 4–5 Banden beschränkt. Die unter Abgaseinwirkung erhöhte Peroxidaseaktivität spiegelt sich lediglich im stärkeren Hervortreten einzelner Isoenzyme, nicht aber in deren Vermehrung wider (ESTERBAUER, GRILL & ZOTTER 1978, GRILL, ESTERBAUER, BIRKNER & KLANSEK 1982, GRILL, ESTERBAUER, DOBERNIG & KLANSEK 1982). Die Hoffnung, daß die große Zahl von Isoenzymbanden namentlich bei der Fichte Anhaltspunkte für die Identifizierung von Provenienzen oder Rassen liefern könnte, hat sich leider nicht erfüllt. Die wohl auf starke genetische Vermischung beruhenden individuellen Unterschiede sind weit größer als die Unterschiede der Isoenzymmuster z. B. von Fichten aus der BRD und Bulgarien. Peroxidase-Isoenzymmuster sind höchstens zur Identifizierung vegetativ vermehrter Fichten geeignet (GRILL, HOLZER & ESTERBAUER 1985).

So deutlich sich Abgaseinwirkungen in Verfärbungen der Nadeln zu erkennen geben, so wenig sind Pigmentanalysen in dieser Hinsicht aufschlußreich, sofern die herkömmlichen chromatographischen Methoden verwendet werden, eine Erfahrung, die auch an anderen Instituten schon vielfach gemacht wurde. Verfärbungen treten erst in recht fortgeschrittenen Stadien der Abgaseinwirkung auf, Bildung von Phäophytin, einem Abbauprodukt des Chlorophylls, das zur Verfärbung der Nadeln nach rotbraun führt, setzt überhaupt erst nekrotische Zellen voraus. Anders wird das Bild, wenn man leistungsfähigere Trennverfahren, insbesondere Hochdruckflüssigkeitschromatographie (HPLC) einsetzt. Dann zeigen sich, vor allem in den Caroti-

noiden, deutliche Veränderungen, die derzeit im Rahmen eines Projekts zur „Forschungsinitiative Waldsterben“ von der Arbeitsgruppe GRILL bearbeitet werden. Bei diesen Untersuchungen konnte wohl erstmals die komplette Carotinoid-Ausrüstung der Fichtenplastiden erfaßt werden und, gleichfalls erstmals in Koniferen, das Vorhandensein eines Xanthophyll-Zyklus, Bildung von Antheraxanthin und Zeaxanthin aus Violaxanthin, nachgewiesen werden. Die Untersuchungen zur Pigmentausrüstung der Koniferen sind derzeit in vollem Gange.

6. Wachsauflagerungen

Es ist schon lange bekannt, daß die Vorhöfe der Spaltöffnungen der Koniferennadeln durch mehr oder weniger locker strukturierte Wachspfröpfe verschlossen sind. Das Auflicht-Elektronenmikroskop (REM) ließ darüber hinaus Wachsauflagerungen auf der ganzen Nadeloberfläche erkennen. Im typischen Fall sind es Röhrrchen, die der Cuticula der Nadel aufsitzen, besonders gehäuft treten sie in der Umgebung der Spaltöffnungen auf. In Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Elektronenmikroskopie Graz konnten tiefgreifende Änderungen der Struktur dieser Wachsauflagen unter SO_2 -Einwirkung beobachtet werden. Die Auflagerungen werden spärlicher und gröber, die Oberfläche verkahlt (Abb. 6). Die Ursache ist wohl in Stoffwechselstörungen durch das SO_2 zu suchen, die sich in einem geänderten Chemismus der Wachse und damit zu geänderter Morphologie führen. Die Folge sind geänderte Benetzbarkeit der Nadeloberfläche, Störungen im Wasserhaushalt und größere Anfälligkeit gegenüber Infektionen. Derartige Veränderungen der Wachstruktur treten bereits an

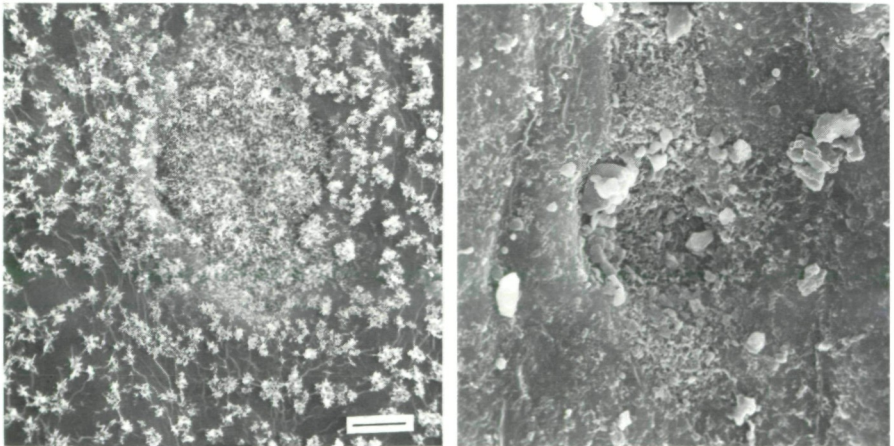


Abb. 6: Struktur des Oberflächenwachses in der Umgebung einer Spaltöffnung einer Fichtennadel. Links: unbelastete Nadel, Wachs feinstrukturiert; rechts: immissionsbelastete Nadel, Wachs verklumpt, Oberfläche verkahlt, Indexstrich = $10\mu\text{m}$. Diese im Zentrum für Elektronenmikroskopie Graz hergestellte REM-Aufnahme wurde von Prof. GRILL freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Nadeln auf, deren Schwefelgehalt nur geringfügig über der Norm (0,11 % bei einjährigen Nadeln) liegt (GRILL 1973). Besonders eindrucksvoll sind die durch alkalische Stäube bewirkten Veränderungen der Wachsstruktur, insbesondere durch Magnesitstäube. Die Wachsröhrchen verlieren ihre Individualität und verfließen zu scholligen Auflagerungen, die Wachspfröpfe über den Spaltöffnungen verändern sich zu einer teigigen Masse, wodurch der Wasserdampf- und CO_2 -Austausch schwer behindert wird; Absterben der Nadeln ist die schließliche Folge. Mittels der Mikrosonde konnte in den der Blattoberfläche anhaftenden Staubteilchen, also sozusagen an Ort und Stelle, Magnesium nachgewiesen werden, womit Magnesiumstaub als Ursache für die beobachteten Veränderungen sichergestellt ist (GRILL & GOLOB 1983, BERMDINGER, GRILL & GOLOB im Druck).

7. Methodisches zur Erfassung von Immissionen

Der Autor hat 1986 gelegentlich seiner Mitwirkung an einem Beweissicherungsverfahren für eine südlich von Graz geplante Erdölraffinerie die in den USA entwickelte sog. „Bleikerzenmethode“ zur integralen Erfassung von SO_2 -Immissionen erstmals in Österreich angewendet. Die Methode wurde inzwischen Standardmethode und ersetzt damit endgültig die alte Barytlappenmethode. An der Gestaltung hierfür geeigneter Schutzdächer (später „MÖSE-Glocken“ genannt) hat der Autor gleichfalls mitgewirkt.

Zur vereinfachten Auswertung der Bleikerzen haben RABER, KOSMUS & GRILL 1983 ein Schnellverfahren zur Sulfatbestimmung, basierend auf der Sedimentationshöhe des Bariumsulfatniederschlages, angegeben. In weiterer Zusammenarbeit mit dem Institut für Analytische Chemie der Universität Graz wurde eine Kerze zur integralen Erfassung von Stickoxidimmissionen ausgearbeitet (KOSMUS 1986), eine ähnliche Kerze zur Erfassung von Ozon und Photooxidantien befindet sich in Erprobung (KOSMUS).

Auch bei den Analysenverfahren selbst konnten in Zusammenarbeit mit dem genannten Institut Fortschritte erzielt werden. Nach Einführung der Verbrennung von Pflanzenmaterial im geschlossenen Raum in Sauerstoffatmosphäre nach SCHÖNIGER wurde es möglich, Schwefel, Fluor und Chlorid an der gleichen Probe photometrisch zu bestimmen (Schwefel mit verbesserter Bariumchloranilat-Methode, Chlorid mit Mercurichloranilat und Fluor über einen Alizarin-Lanthan-Komplex). Damit konnte u. a. die ungleiche Verteilung dieser Elemente in *Tilia*-Blättern nachgewiesen werden; die Elemente finden sich vor allem in den Rand- und Spitzenpartien des Blattes angereichert, in jenen Zonen also, in denen zuerst Nekrosen auftreten. Ob die Anreicherung unmittelbar zu den Nekrosen führt oder erst mittelbar über Störung des Stoffwechsels, lassen die Analysen natürlich nicht erkennen (GRILL, LIKUSSAR & HUBER 1977).

Der Einsatz von Bleikerzen und die Bemühungen, diese Verfahren für andere Schadstoffe in der Luft auszubauen, lassen erkennen, daß diese Methoden neben den gasanalytischen noch immer ihre Berechtigung haben. Sicher arbeiten diese analytisch „genauer“, aber sie können doch nur punktuelle Aussagen machen, und ein größeres Immissionsgebiet zu erfassen erfordert eine große Zahl von relativ kurzzeitigen

Messungen (in der Regel Halbstundenwerte), die nach einem bestimmten Schema (vgl. Technische Anleitung Luft [TAL] in der BRD) im Gelände verteilt sind. In Gebirgslagen kommen noch besondere Gelände-probleme hinzu. Diese Methodik erfordert einen hohen apparativen, materiellen und auch zeitlichen Aufwand, erlaubt es allerdings, wenigstens innerhalb der Meßperiode auftretende, pflanzenphysiologisch wichtige Spitzenwerte zu erfassen. Integrierende Methoden liefern nur Durchschnittswerte über einen längeren Zeitraum, meist einen Monat; „Kerzen“ lassen sich ohne großen Aufwand ohne Gelände-probleme in einem beliebig großen Immissions-gebiet installieren. Der Vorwurf einer geringeren „Genauigkeit“ trifft in dieser Form nicht zu. Bei Freilandmessungen spielt die Genauigkeit des Einzelwertes nicht die Rolle wie etwa im Labor; wichtiger ist eine möglichst große Zahl von Messungen, deren Genauigkeit (Fehlermöglichkeit) natürlich bekannt sein muß. Beide Methoden geben Antwort auf die gleiche Frage, die eine arbeitet sukzedan, die andere simultan, die eine macht sozusagen Moment-, die andere Zeitaufnahmen, und es kommt auf die Fragestellung an, welcher man den Vorzug gibt. Noch ein anderer, weniger wissenschaftlicher Grund könnte dafür sprechen, eine Langzeitmethode zu bevorzugen. Es soll schon vorgekommen sein, daß ein Emittent besonders „brav“ arbeitet, sobald sich ein Meßwagen in der Gegend aufhält. Eine derartige Möglichkeit einer Verfälschung fällt natürlich bei monatlichen Ableseperioden weg und die Immissions-verhältnisse könnten so ungestörter erfaßt werden.

8. Borkenuntersuchungen

Derartige Überlegungen legen die Frage nahe, ob nicht auch natürliche Integratoren für Luftverunreinigungen herangezogen werden können. Insbesondere bietet sich dabei die Borke der Bäume an. Sie ist ständig den Immissionen ausgesetzt, es ist anzunehmen, daß diese durch die Borke gespeichert werden. Durch analytische Erfassung müßte es möglich sein, Rückschlüsse auf die Intensität der vorangegangenen Abgasbelastung zu ziehen. Der Vorteil eines derartigen Vorgehens läge auf der Hand: Es wäre möglich, beim Verdacht auf Abgaseinwirkungen sofort Rückschlüsse auf die vorangegangene Belastung zu ziehen und damit Anhaltspunkte für weitere gezielte Erhebungen zu gewinnen, ohne daß erst umständliche Vorbereitungen getroffen werden müßten.

Natürlich sind auch diese Gedanken nicht neu. Schon vor längerem wurde in Schweden (STAXÄNG 1969), Polen (GRODZIŃSKA 1971) und anderswo beobachtet, daß Borke in Immissionsgebieten Säure akkumuliert und damit saurer reagiert. LÖTSCHERT & KÖHM (1977) haben die Möglichkeiten der Indikation durch Kationenanalyse ausgebaut. Es galt aber als allgemein, daß für derartige Untersuchungen nur Laubholzborke geeignet sei. An Koniferen ergaben sich kaum auswertbare pH-Änderungen.

HÄRTEL & GRILL 1972a konnten aber zeigen, daß auch Fichtenborke zur Indikation von Immissionen geeignet ist und gegenüber Laubholzborke sogar erhebliche Vorteile bietet, wenn man anstatt der pH-Werte die elektrische Leitfähigkeit der Borkenextrakte heranzieht. An der Borke absorbiertes SO_2 wird rasch zu Sulfat oxidiert, wahrscheinlich trägt dazu auch die große innere Oberfläche des toten

Borkengewebes dazu bei. Das Sulfat liegt dann z. T. an Calcium zu Gips gebunden, z. T. als freie Schwefelsäure vor; da auch Gips zu 0,2 g/l in Wasser löslich ist, wird dadurch die Leitfähigkeit der (natürlich standardisiert hergestellten) Borkenextrakte nach Maßgabe der Stärke der vorangegangenen Immission erhöht, sie wird in Mikrosiemens oder auch Millisiemens (μS oder mS , d. i. der reziproke Wert des Widerstandes in $\text{Ohm} \times 10^{-6}$ bzw. 10^{-3}) ausgedrückt. Hiefür wurde 1982 das im Deutschen wie im Englischen gleich sinnvolle Symbol C_b (= conductivity, bark) eingeführt, vorher wurde hiefür die etwas verwirrende Buchstabenfolge ELB (= elektrolytische Leitfähigkeit, Borke) benützt. Mit einem Verhältnis 4 g Borke auf 60 ml aqua dest. kann die weitaus größte Zahl von Proben erfaßt werden, Normale Fichtenborke liefert Extrakte mit C_b -Werten bis 200 μS , bei C_b -Werten um 1200 μS sind wegen der beschränkten Löslichkeit von CaSO_4 neue Extrakte mit der doppelten oder vierfachen Menge Wassers anzusetzen. Durch Rückrechnung auf das Standardverhältnis können sich so (natürlich nur rechnerisch!) C_b -Werte bis 5000 μS ergeben. Genaueres zur Methode vgl. HÄRTEL & GRILL 1972a, HÄRTEL 1982 und KREINER & HÄRTEL 1986.

Ein Vergleich der pH- und Leitfähigkeitsänderungen lehrt sofort, warum Koniferenborke saure Immissionen durch ihre pH-Werte weniger gut wiedergibt. Ihre Extrakte sind um mehr als eine pH-Einheit saurer als die der Laubholzborke. Um die gleiche pH-Veränderung herbeizuführen, ist bei Koniferenborke mehr als die zehnfache Säuremenge erforderlich als bei Laubbäumen! Andererseits weisen bei diesen die pH-Werte auch in extremen Fällen keine größere Amplitude als rd. 1,5 pH-Einheiten auf, bei Koniferenborken werden wie gesagt Werte zwischen 100 und, sehen wir von Extremen ab, 1000–2000 μS gefunden. Mit Leitfähigkeitswerten ist somit eine wesentlich bessere Differenzierung bzw. Klassifizierung von Immissionszonen möglich als durch pH-Werte, ein unbestreitbarer Vorteil der Indikation über Leitfähigkeitsmessungen.

Ein gewichtiger Einwand liegt auf der Hand: Gerade die raue Koniferenborke absorbiert außer SO_2 auch andere, insbesondere auch nicht gasförmige Luftverunreinigungen, Staub, versprühtes Streusalz u. a. m., was sich gleichfalls in den Leitfähigkeitswerten niederschlägt. Derartige nichtsulfatische Immissionen können aber leicht vom SO_2 -Eintrag unterschieden und abgetrennt werden, wenn man an die Leitfähigkeitsbestimmung eine Sulfatbestimmung im Borkenextrakt anschließt. Hierzu genügt eine einfache turbidimetrische Analyse (Fällung des Sulfats mit Bariumchlorid und Messung der entstandenen Trübung, vgl. HÄRTEL 1982, KREINER 1983, 1986). Damit ist noch ein weiterer Vorteil verbunden. Ermittelt man den dem jeweiligen Sulfatgehalt des Extraktes zukommenden Anteil der Leitfähigkeit C_s (= conductivity, sulphuric, ein auf Basis von Calciumsulfat = Gips hiefür erstelltes Diagramm findet sich bei HÄRTEL 1982), so läßt sich durch Bildung der Differenz zur Gesamtleitfähigkeit ($C_b - C_s$) der Anteil der nichtsulfatischen Immissionen (Symbol C_n) abschätzen. (C_s wurde vor 1982 mit ELS bezeichnet und C_n mit ELN, diese Symbole sollten aber gleichfalls nicht mehr benützt werden).

Mit dieser Methode wurden zahlreiche Vergleiche mit anderen konventionellen Methoden sowohl im Stadtgebiet von Graz wie auch in Industriegebieten durchgeführt. Einige Ergebnisse für Graz sind in Abb. 7 dargestellt. Abb. 7 A vergleicht die C_s -Werte mit den bereits vorliegenden, gasanalytisch bestimmten SO_2 -Gehalten der Luft. Die Sulfatgehalte (wiedergegeben durch die entsprechenden Leitfähigkeitswerte)

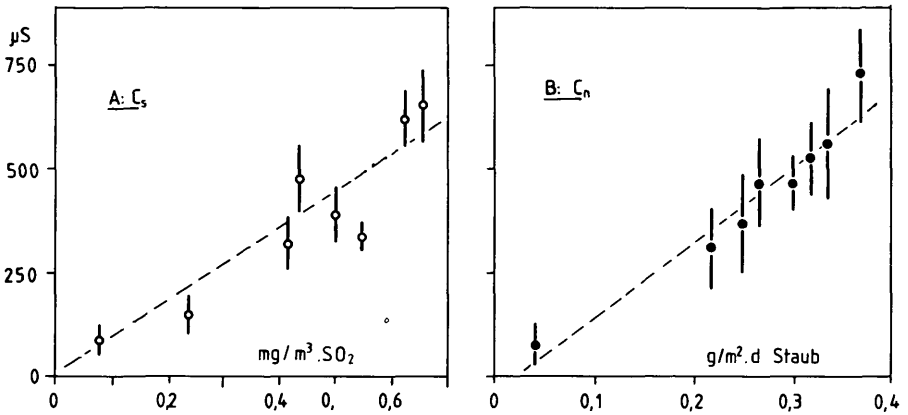


Abb. 7: Immissionen im Stadtgebiet von Graz, erhoben mit der Borkenmethode. A: Sulfatische Immissionen (C_s -Werte), über den jeweiligen, gasanalytisch bestimmten SO_2 -Immissionen aufgetragen. B: Nichtsulfatische Immissionen (C_n -Werte = $C_b - C_s$) über den jeweiligen, mit BERGERHOFF-Geräten erfaßten Staubbiederschlägen aufgetragen. Nach Daten des Statistischen Jahrbuches Graz, 20. Jg. und KIENZL 1979, nach HÄRTEL 1982.

steigen nahezu linear mit der Stärke der gasanalytisch gemessenen SO_2 -Belastung an, die die Regressionsgerade tendiert genau zum Koordinatenanfangspunkt. Trägt man die Differenzen von den C_s -Werten zu den (hier nicht neuerlich wiedergegebenen, vgl. dazu HÄRTEL 1982) C_b -Werten, also die zugehörigen C_n -Werte über den mit BERGERHOFF-Geräten gemessenen Staubbiederschlägen auf (Abb. 7 B), so ergeben die Mittelwerte gleichfalls eine annähernd gegen den Koordinatenanfangspunkt tendierende Regressionslinie, was nichts anderes bedeutet, als daß bei fehlenden „Staub“-Immissionen keine nennenswerten Elektrolytmengen in der Borke zu erwarten sind; dies verleiht dem beobachteten Zusammenhang wohl zusätzliche Sicherheit. Nur der höchste Wert in Abb. 7 B fällt wieder etwas aus der Reihe. Er stammt von einer überaus verkehrsreichen Straße (Graz, Glacis); hier ist mit zusätzlicher Salzstreuung zu rechnen, die sich im C_n -Wert ausdrückt, von den BERGERHOFF-Geräten aber nicht erfaßt werden kann. Deutlich prägt sich die Obergrenze der Inversionen über der Landeshauptstadt in höheren Borkenwerten aus (KIENZL & HÄRTEL 1979); über dem Aichfeld konnten sogar zwei Inversionsschichten nachgewiesen werden, eine dritte ist angedeutet, was mit den kleinklimatischen Verhältnissen in diesem Gebiet durchaus in Einklang steht (HÄRTEL 1980, LAZAR, mündliche Mitteilung). Ähnliche Erhebungen mit der Borkenmethode zur Kennzeichnung der Luftverunreinigungen wurden auch in Innsbruck (HUTTER 1973) und in Salzburg (STÜBER 1975) durchgeführt. Ein großflächiger Vergleich der Erhebungen nach der Borkenmethode mit den vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung durchgeführten Luftaufnahmen mit Falschfarbfilm im weststeirischen Industriegebiet ergab gleichfalls ausgezeichnete Übereinstimmung (HÄRTEL, GRILL & KRZYSCIN 1980a, b). Weitere Vergleiche der Borkenmethode mit konventionellen Erhebungen, insbesondere mit Schwefelgehalten der Nadeln, vgl. HÄRTEL 1982.

Für die Auswertung von Borkenproben ist die Kenntnis ihrer Ansprechzeit auf Änderungen der Immissionsstärke wichtig. An zehn ausgewählten Plätzen im Stadtgebiet von Graz wurden durch ein Jahr hindurch monatlich Borkenproben gezogen und mit den an vergleichbaren Plätzen ermittelten Bleikerzenwerten verglichen. Das Ergebnis ist in Abb. 8 für drei ausgewählte Plätze deutlich unterschiedlicher SO_2 -Belastung dargestellt, darüber sind die Mittelwerte aller Bleikerzenwerte und der Borkenproben (C_s -Werte) einander gegenübergestellt.

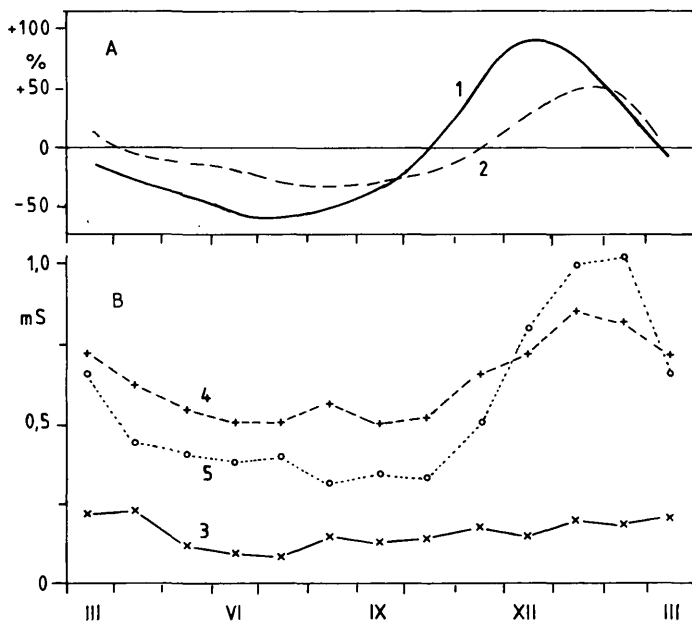


Abb. 8: Jahresgänge von Borkenwerten. 1: Prozentuale Schwankung der SO_2 -Immissionen in Graz (Mittelwerte aus Bleikerzenmessungen, GRADISCHNIK 1974), 2. Mittel aus Borkenwerten von 10 Probestellen in Graz; 3: Jahresgang der C_s -Werte im Grüngürtel von Graz, 4: desgl. im verbauten Stadtgebiet, 5: desgl. auf dem Schloßbergplateau. Nach Daten von KIENZL 1979, HÄRTEL 1982.

Durchwegs fällt eine deutliche Jahresperiode, freilich mit sehr verschiedener Amplitude, auf, ferner erscheint der Jahresgang der Borkenwerte gegenüber den Bleikerzenwerten um etwa 1 Monat verzögert. Somit kann als Ansprechzeit ein Zeitraum von etwa 1 Monat angesetzt werden, was auch Versuche mit Borke, die mit der bereits erwähnten „Glockenmethode“ begast wurden, bestätigt haben. Feldbeobachtungen wie Begasungsversuche haben zudem überraschend ergeben, daß der Feuchtigkeitsgehalt der Borke die Absorption von SO_2 nicht wesentlich beeinflusst (Abb. 9); sofern Borkenproben erst 4–5 Tage nach stärkeren Regenfällen gesammelt werden, vermag wechselnde Witterung die Borkenwerte nicht nachhaltig zu beeinflussen.

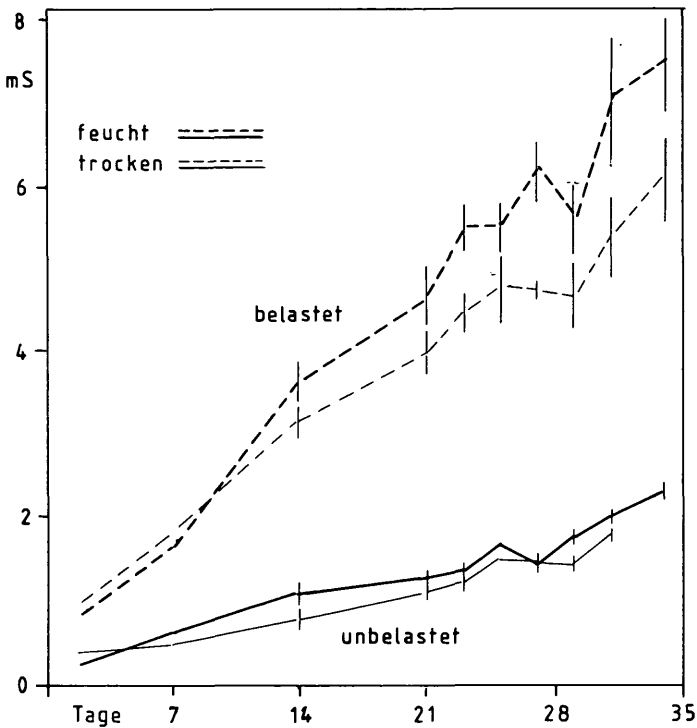


Abb. 9: Zunahme der Leitfähigkeit von Borkenextrakten (C_b -Werte) während künstlicher Begasung mit SO_2 . Dick ausgezogen = Borke aus \pm abgasfreiem Gebiet, feucht begast, dünn ausgezogen = desgl., aber trocken begast; dick strichliert = Borke aus Industrieregion, feucht begast, dünn strichliert = desgl., aber trocken begast. Nach KREINER & HÄRTEL 1986.

GRILL & HOFER (1979) konnten zeigen, daß der Borkentest auch bei Fehlen von geeigneten Fichten verwendbar ist. Wenn man elektrolytfrei gewaschene Borke auf Holzbrettchen aufgenagelt exponiert, so akkumulieren sie ebenfalls SO_2 , man muß dabei allerdings etwas Geduld haben, es dauert nämlich etwa ein halbes Jahr, bis derartige „Borkenexplantate“ Extrakte ähnlicher Leitfähigkeit geben wie Bäume, die auf dem gleichen Platz stehen. Der Grund ist nicht allein, daß elektrolytfrei gewaschene Borke so lange Zeit benötigt, um unter dem Einfluß der Immissionen die entsprechenden Leitfähigkeitswerte zu liefern. KREINER 1983 konnte zeigen, daß elektrolytfrei gewaschene Borke aus einem stark durch SO_2 belasteten Gebiet bei künstlicher Begasung etwa dreimal soviel Schwefel zu akkumulieren vermag als gleich behandelte Borke aus einem Reinluftgebiet unter identen Begasungsbedingungen (Abb. 9). Weiters ergaben die Begasungsversuche, daß die Schwefelgehalte der Borkenproben, unabhängig von Begasungsstärke oder Feuchtigkeit und entgegen des theoretisch zu Erwartenden, in den ersten drei Wochen praktisch linear mit der Zeit zunimmt und hernach unter stärkeren Schwankungen sogar noch steiler werden kann (Abb. 9). Es gehen also unter der Einwirkung des SO_2 in der Borke Veränderungen vor

sich (sie betreffen u. a. Änderungen der Pufferkapazität und des Ionenaustauschvermögens, Änderungen des Verhältnisses freier Schwefelsäure zu Calciumsulfat, geringfügiges In-Lösung-Gehen von Calciumoxalat), wodurch die Borke erst in die Lage versetzt wird, immer größere SO_2 -Mengen zu akkumulieren. Damit erweist sich die Borke, wiewohl sie ein totes Gewebe ist, keineswegs als unveränderlich. Da bekannt ist, daß Schadstoffe (z. B. Fluor) durch die Borke hindurch in das Stamminnere gelangen können, ist nicht von der Hand zu weisen, daß Immissionen auch auf diesem Wege in die Lebensfunktionen des Baumes eingreifen könnten (KREINER & HÄRTEL 1986).

Anhangsweise sei noch erwähnt, daß natürlich auch Schwermetalle in der Borke akkumuliert werden können. So ließ sich noch in 6,5 km Entfernung von einer Erzrösterei ein erhöhter Gehalt an Schwermetallen in der Borke mit Dithizon nachweisen (HÄRTEL, unveröff.) oder an einer stark befahrenen Straße die am stärksten belasteten Flanken der Alleebäume ermitteln, wobei sich übrigens Blei und Cadmium verschieden verhielten (LAUNDL, unveröff.). Jüngste Untersuchungen haben auch eine Verfrachtung von Blei, Cadmium, Kupfer und Zink durch die Borke hindurch in den Holzkörper von *Picea abies*, *Aesculus hippocastanum* und *Sophora japonica* erwiesen, wobei nach Jahresringen getrennte voltametrische Messungen in Verbindung mit licht- und elektronenmikroskopischen Beobachtungen lehrten, daß die Verfrachtung durch Pilzhyphen bewerkstelligt wird (KOSMUS & GRILL 1985).

9. Rückblick

Diese Zusammenstellung der Ergebnisse ist keineswegs vollständig. Unerwähnt blieben Untersuchungen zur Holzanatomie abgasbelasteter Bäume (GRILL, LIEGL & WINDISCH 1979), zur Bodenkunde und Enzymologie von Fichtenwaldböden, die 30 Jahre massiven SO_2 -Immissionen ausgesetzt waren (HÄRTEL & CERNY 1981) oder über die Vegetation nach Stilllegung des Hauptemittenten und über das Wiedereinwandern epiphytischer Flechten (HAFELLNER & GRILL 1980, 1981). Nicht eingegangen wurde darauf, daß in *Agropyron repens* unter dem Einfluß magnesithaltiger Immissionen stark erhöhte Chlorophyllgehalte gefunden wurden (HÄRTEL 1954). Erwähnenswert wäre vielleicht noch gewesen, daß die Korrelation zwischen der Verfrachtung der Schadstoffe und der Veränderung physiologischer Parameter wesentlich verbessert werden kann, wenn nur die während der „Öffnungszeiten“ der Spaltöffnungen (d. i. bei schönem Wetter nur vormittags, bei trübem jedoch von morgens bis abends) herrschenden Windrichtungen berücksichtigt werden (HÄRTEL 1960 b) oder wie die Immissionen mehrerer gleichzeitig einwirkender Abgasquellen geschieden werden können (HÄRTEL 1958, 1965). Von Interesse dürften schließlich auch Beobachtungen von GUTTENBERGER, HÄRTEL & THALER 1979 sein, die nahelegen, daß chronisch SO_2 -geschädigte Fichten Äthylen ausscheiden, wie dies von anderen unter Streß stehenden oder auch virusinfizierten Pflanzen bekannt ist.

Die im vorstehenden kurz skizzierten Aktivitäten führten natürlich zu zahlreichen Kontakten und zu engerer Zusammenarbeit mit in- und ausländischen Institutionen. Neben den bereits genannten sei hier die fruchtbare Zusammenarbeit mit der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, mit der Landesforstdirektion für Steiermark

und mit dem Landeshygieniker für Steiermark, Univ.-Prof. MÖSE, hervorgehoben. Die Beteiligung der Abteilung für Chemische Physiologie am Institut (Leiter ao. Prof. GRILL) an der Forschungsinitiative gegen das Waldsterben vertieft auch die enge Kooperation mit der Universität für Bodenkultur in Wien nur noch weiter und ermöglicht die Finanzierung von Forschungsvorhaben durch die Bundesministerien für Wissenschaft und Forschung sowie für Land- und Forstwirtschaft. Schließlich, aber nicht als letztes, muß auch die verständnisvolle und nicht selten über das rein Materielle hinausgehende Förderung durch Industrierwerke und Waldeigentümer dankend erwähnt werden. Von nach außen hin sichtbaren Anerkennungen der Aktivitäten des Institutes sei hier nur darauf verwiesen, daß es 1980 mit der Durchführung der 11. Internationalen Arbeitstagung forstlicher Rauchsachverständiger (IUFRO-Sektion 2.09) in Graz, 1. – 6. 9. 1980, betraut worden ist (vgl. NEUMANN & GRILL 1981).

Rückblickend sei aber doch noch auf einen mir wesentlich erscheinenden Punkt nachdrücklich hingewiesen. Immer wieder haben Fragestellungen, die sich zunächst nur auf Abgas- bzw. Immissionswirkungen bezogen, zu Überlegungen und Ergebnissen von allgemeinbiologischer Bedeutung geführt. Zellphysiologische Untersuchungen haben zu Überlegungen über den ersten Angriffspunkt nicht nur von SO₂, sondern auch anderer Insulte geführt, Beschäftigung mit den SH-Gruppen zu Einblicken in die Biochemie und chemische Physiologie; auch die zuletzt besprochene Indikation von Luftverunreinigungen mittels Borke (die, da es sich dabei um totes Gewebe handelt, nur bedingt der „Bioindikation“ zugerechnet werden kann) läßt weitere Einblicke in ihre – sit venia verbo! – „Physiologie“ erwarten. Nicht zuletzt hat der Umgang mit Praktikern zu Vorschlägen zur Klärung der Terminologie von Wirkungen äußerer Insulte auf die Pflanze geführt. In diesem Zusammenhang darf vielleicht noch kurz auf die Untersuchungen über den auch Fichten parasitierenden Rostpilz *Chrysomyxa abietis* hingewiesen werden. Als Forstschädling spielt der Pilz keine besondere Rolle, aber ähnliche Schadenssymptome, wie die durch Abgase hervorgerufenen, gaben zu näheren Vergleichen Anlaß. Dabei ergab sich, daß sich die Pigmentgarnitur, der Säuregehalt und die Pufferkapazität, der Ascorbinsäurespiegel, die Peroxidaseaktivität und, wenigstens zeitweise, auch der SH-Gehalt nach dem Befall durch *Chrysomyxa* in ähnlicher Weise ändern, wie dies nach SO₂-Einwirkung der Fall ist (GRILL, LACKNER & SCHARNER 1978, GRILL & POLZ 1983, GRILL, LINDNER & JÄGER 1980, GRILL, WELT & ESTERBAUER 1978, GRILL, ESTERBAUER & BIRKNER 1980). Die auffällige Parallelität der Reaktionen auf einen biotischen und einen abiotischen Streßfaktor läßt auf einen gemeinsamen Angriffspunkt schließen sowie auf einen ähnlichen Endeffekt, nämlich das Einmünden in Symptome, die ein vorzeitiges Altern der gestreßten Nadeln anzeigen. Hinzugefügt sei noch, daß gelegentlich der Beschäftigung mit *Chrysomyxa* das Rasterelektronenmikroskop Neues zur Biologie dieses Pilzes liefern konnte (GRILL, HAFELLNER & WALTINGER 1980) sowie der Rostpilz *Darluca filum* als Überparasit von *Chrysomyxa* gefunden wurde (GRILL, HAFELLNER & INGOLIC 1981).

So gewinnen auch Beobachtungen, die zunächst von einer sehr spezialisierten Fragestellung ausgehen, allgemeineres Interesse und weitergehende Bedeutung. Es verwischen sich auch die Grenzen zwischen „reiner“ und „angewandter“ Forschung, einer Scheidung, die eigentlich eher emotional, nicht rational begründbar ist. Das im vorstehenden Skizzierte läßt klar erkennen, daß ein Universitätsinstitut längst kein

„elfenbeinerner Turm“ ist, daß es sich ohne Gefahr für seine Wissenschaftlichkeit „praktischen“ Fragen zuwenden kann. Der Schreiber dieser Zeilen hat sich mit Fragen der Wirkungen von Industrieabgasen auf Pflanzen zu beschäftigen begonnen, als diese noch durchwegs lokal begrenzt waren; Fernvertragung galt damals fast als Kuriosität, und ein Umweltbewußtsein hat es gleich nach dem Zweiten Weltkrieg noch nicht gegeben. Er muß allerdings einräumen, daß ihm als Sohn eines Forstingenieurs forstliche Probleme nicht unbekannt waren und er sich dadurch zur Problematik der Immissionschäden hingezogen fühlen mußte. Er hat im Laufe der Jahrzehnte erlebt, wie sich die Immissionsgebiete immer weiter ausgebreitet und überlappt haben und das Abgasproblem regionale und sehr bald überregionale Bedeutung erhalten hat, daß Fernvertragung nicht mehr Ausnahme, sondern, wie es heute scheint, die Regel wurde und im Verein mit dem Auftreten sekundärer Schadstoffe (Ozon, Photooxidantien) eine besondere Brisanz erhält. Immissionen sind ein globales Problem geworden und drohen, sehen wir nur auf die weltweite Verbreitung des „Waldsterbens“, nicht nur die wirtschaftlichen Grundlagen der menschlichen Existenz zu erschüttern. In jedem Stadium stellten sich auch dem Pflanzenphysiologen immer neue Probleme. Das großflächige Auftreten der Immissionen, der bekannten und wahrscheinlich auch weiterer, bislang noch unbekannter, wird die Kausalanalyse „vor Ort“ in Zukunft immer mehr erschweren. An der Aufklärung kausaler Zusammenhänge mitzuarbeiten ist angesichts eines Prozesses, von dem letzten Ende jeder einzelne betroffen sein kann, Aufgabe und Verpflichtung auch aller einschlägigen, von der Öffentlichkeit erhaltenen wissenschaftlichen Institutionen, zwingt zur vollen Ausschöpfung aller vorhandenen wissenschaftlichen Kapazitäten. Hier wird die Scheidung in „reine“ und „angewandte“ Forschung sinnlos. Für den Stellenwert der Forschung ist nicht relevant, von welcher Seite die Aufgaben gestellt werden, entscheidend allein sind die Wissenschaftlichkeit der Methode und der Wahrheitsgehalt und Tragfähigkeit des Ergebnisses.

Literatur

In die nachfolgende Aufstellung wurden sämtliche aus dem Institut für Pflanzenphysiologie der Karl-Franzens-Universität hervorgegangenen Arbeiten einschlägiger Thematik aufgenommen, nur einige Tagungsberichte und Kurzfassungen wurden nicht berücksichtigt, wenn ihr Inhalt in einer späteren Arbeit ausführlich publiziert wurde. Ferner werden in Auswahl auch einige wichtiger erscheinende Veröffentlichungen angeführt, die mit dem Thema in unmittelbarem Zusammenhang stehen bzw. durch die Befassung mit Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Pflanzen initiiert worden sind.

Zitierte Arbeiten, die keinen Mitarbeiter des Institutes für Pflanzenphysiologie Graz als Autor oder Mitautor haben, sind durch ein nachgesetztes (*) gekennzeichnet.

- ANDRÉ, A. 1934. Untersuchungen über die Einwirkung von schwefliger Säure auf Blattzellen. – Diss. Univ. Bonn (*).
- BAUER, I. & GRILL, D. 1977. Zur Problematik der Pigmentanalysen als Rauchschadensdiagnose. – *Angew. Botanik* 51: 242–250.
- BERMADINGER, E., GRILL, D. & GOLOB, E. 1986: Einfluß von Magnesitstäuben auf Fichtennadelwachse. – *Phyton (Austria)* 26 (im Druck).
- DÄSSLER, H. G. 1963: Probleme der forstlichen Rauchschadensforschung. – *Biol. Zbl.* 82: 217–288. (*)
- ESTERBAUER, H. & GRILL, D. 1978: The seasonal variation of glutathione and glutathione reductase in needles of *Picea abies*. – *Plant Physiol.* 61: 119–121.
- ESTERBAUER, H., GRILL, D. & BECK, G. 1974: Spectrophotometric determination of picein and p-hydroxyacetophenone in needles of *Picea abies* with 2,4-dinitrophenylhydrazine. – *Anal. Chem.* 46: 789–791.
- ESTERBAUER, H., GRILL, D. & BECK, G. 1975: Untersuchungen von Phenolen in Nadeln von *Picea abies*. – *Phyton (Austria)* 17: 87–99.
- ESTERBAUER, H., GRILL, D. & WELT, R. 1980: Der jahreszeitliche Rhythmus des Ascorbinsäuresystems in Nadeln von *Picea abies*. – *Z. Pflanzenphysiol.* 98: 393–402.
- ESTERBAUER, H., GRILL, D. & ZOTTER, M. 1978: Peroxidase in Nadeln von *Picea abies* (L.) KARST. – *Biochem. Physiol. Pflanzen* 172: 155–159.
- FUCHSHOFER, H. G. 1985: Untersuchungen zum Trübungsstest nach HÄRTEL. – Diss. Univ. Graz.
- FUCHSHOFER, H. & HÄRTEL, O. 1985: Zur Physiologie des Trübungsstests, einer Methode zur Bioindikation von Abgaswirkungen auf Koniferen. – *Phyton (Austria)* 25: 277–291.
- GRADISCHNIK, H. 1974: Luftgütebild des Landes Steiermark. – Graz. (*)
- GRILL, D. 1968: Zellphysiologische Studien an SO₂-begasteten Nadeln von *Picea abies* (L.) KARST. – Diss. Univ. Graz.
- GRILL, D. 1971: Pufferkapazität gesunder und rauchgasgeschädigter Fichtennadeln. – *Z. Pflanzenkrankh.* 78: 612–622.
- GRILL, D. 1972: Optische Veränderungen in Homogenisaten SO₂-geschädigter Fichtennadeln. – *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 1: 293–300.
- GRILL, D. 1973: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an SO₂-belasteten Fichtennadeln. – *Phytopathol. Z.* 78: 75–80.

- GRILL, D. & ESTERBAUER, H. 1973 a: Quantitative Bestimmung wasserlöslicher Sulfhydrylgruppen in gesunden und SO₂-geschädigten Nadeln von *Picea abies*. – Phytol. (Austria) 15: 87–101.
- GRILL, D. & ESTERBAUER, H. 1973 b: Cystein und Glutathion in gesunden und SO₂-geschädigten Fichtennadeln. – Eur. J. For. Path. 3: 65–71.
- GRILL, D. & ESTERBAUER, H. 1981: Einfluß schwefelhaltiger Abgase auf das SH-System von Pflanzen. – Mitt. Forstl. Bundesversuchsanst. Wien 137: 121–125.
- GRILL, D., ESTERBAUER, H. & BECK, G. 1975: Untersuchungen an phenolischen Substanzen und Glucose in SO₂-geschädigten Pflanzen. – Phytopathol. Z. 82: 182–184.
- GRILL, D., ESTERBAUER, H. & BIRKNER, H. 1980: Einfluß von *Chrysomyxa abietis* und Abgasen auf die Peroxidase in Fichtennadeln. – Z. Pflanzenkrankh. 87: 236–243.
- GRILL, D., ESTERBAUER, H., BIRKNER, H. & KLANSEK, E. 1982: Das Peroxidaseisozymmuster von *Picea abies* (L.) KARST., *Abies alba* MILL. und *Larix decidua* MILL.–Phyton (Austria) 22: 201–211.
- GRILL, D., ESTERBAUER, H., DOBERNIG, I. & KLANSEK, E. 1982: Das Peroxidaseisozymmuster vier verschiedener *Picea*-Species. – Phytol. (Austria) 22: 233–241.
- GRILL, D., ESTERBAUER, H. & HELLIG, K. 1982: Further studies on the effect of SO₂-pollution on the sulfhydryl-system of plants. – Phytopathol. Z. 104: 264–271.
- GRILL, D., ESTERBAUER, H. & KLÖSCH, U. 1979: Effect of sulphur dioxide on glutathione in leaves of plants. – Environ. Pollut. 19: 187–194.
- GRILL, D., ESTERBAUER, H. & SCHARNER, M. 1979: Methoden zum histochemischen Nachweis von Protein-SH-Gruppen in Schnitten von Fichtennadeln. – Mikroskopie (Wien) 35: 308–313.
- GRILL, D., ESTERBAUER, H., SCHARNER, M. & FELTGISCH, Ch. 1980: Effect of sulphur dioxide on protein-SH-in needles of *Picea abies*. – Eur. J. For. Path. 10: 263–267.
- GRILL, D., ESTERBAUER, H. & WELT, R. 1978: Stabilisierung von Sulfhydrylverbindungen in Pflanzenextrakten durch Ascorbinsäure. – Phytol. (Austria) 18: 127–135.
- GRILL, D., ESTERBAUER, H. & WELT, R. 1979: Einfluß von SO₂ auf das Ascorbinsäuresystem der Fichtennadeln. – Phytopathol. Z. 96: 361–368.
- GRILL, D., ESTERBAUER, H. & WELT, R. 1980: Über das Ascorbinsäuresystem in *Larix* und *Aesculus*. – Phytol. (Austria) 20: 251–259.
- GRILL, D. & GOLOB, P. 1983: SEM-investigations of different dust depositions on the surface of coniferous seedlings and the effect on the needle-wax. – Aquilo, Ser. Bot. 19: 255–261.
- GRILL, D., HAFELLNER, J. & INGOLIC, E. 1981: REM-Beitrag zum Befall von *Chrysomyxa abietis* mit *Darluca filum*. – Zbl. Bakt. Parasit. Infekt. Hyg. 2. Abt. 136: 656–660.
- GRILL, D., HAFELLNER, J. & WALTINGER, H. 1980: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an *Chrysomyxa abietis*-befallenen Fichtennadeln. – Phytol. (Austria) 20: 279–284.
- GRILL, D. & HÄRTEL, O. 1967: Mikroskopische Untersuchungen an Fichtennadeln nach Begasung mit SO₂. – Mikroskopie (Wien) 25: 115–122.
- GRILL, D. & HÄRTEL, O. 1972: Zellphysiologische und biochemische Untersuchungen an SO₂-begasteten Fichtennadeln. – Mitt. Forstl. Bundesversuchsanst. Wien 97: 367–386.

- GRILL, D. & HÄRTEL, O. 1973: Abgassymptome in 1000 m Höhe? – Wetter u. Leben 25: 91–95.
- GRILL, D., HÄRTEL, O. & KRZYSCIN, F. 1981: Confining and mapping of air-polluted areas with coniferous barks. – Arch. Ochr. Środow (Polen) 2–4: 63–70.
- GRILL, D. & HOFER, H. 1979: Der Borkentest als Hilfsmittel zur Rauchschaadenskartierung. – 10. Fachtagung. IUFRO S 2.09 1979 Ljubljana. Zbornik (Mitteilungen) Institut f. Forst- u. Holzwirtschaft Ljubljana.
- GRILL, D., HOLZER, K. & ESTERBAUER, H. 1985: Untersuchungen zur Variabilität des Peroxidase-Isoenzymmusters der Fichte und deren Brauchbarkeit für genetische Studien. – Angew. Botanik 59: 233–237.
- GRILL, D., LACKNER, E. & SCHARNER, M. 1978: Untersuchungen an mit *Chrysomyxa abietis* befallenen Fichtennadeln. – Phytion (Austria) 19: 71–82.
- GRILL, D., LIEGL, E. & WINDISCH, E. 1979: Holzanatomische Untersuchungen an abgasbelasteten Bäumen. – Phytopathol. Z. 94: 335–342.
- GRILL, D., LIKUSSAR, W. & HUBER, H. 1977: Luftverunreinigung und der Gehalt an S, F, Cl in verschiedenen Blattbezirken. – Phytopathol. Z. 89: 177–180.
- GRILL, D., LINDNER, W. & JÄGER, H.-J. 1980: Säuren in SO₂-belasteten und von *Chrysomyxa abietis* befallenen Fichtennadeln. – Phytion (Austria) 20: 65–72.
- GRILL, D. & PFEIFHOFER, H. 1985 a: Schädigung kutikularer Wachse an Fichtennadeln. Forschungsinitiative gegen das Waldsterben, Bericht 1985 (Hg. FÜHRER E.). – Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung, Wien, pp 91 – 100.
- GRILL, D. & PFEIFHOFER, W. 1985 b: Carotinoide in Fichtennadeln II. Quantitative Untersuchungen. – Phytion (Austria) 25: 1–15.
- GRILL, D., PFEIFHOFER, W., ESTERBAUER, H. & HALBWACHS, G. 1986: Wasserlösliche SH-Verbindungen und ihre Rolle beim SO₂-bedingten Waldsterben. – Presse- u. Informationsdienst Forschungsinitiative gegen das Waldsterben 1/86: 10–17.
- GRILL, D. & POLZ, I. 1983: Der Einfluß von *Chrysomyxa abietis* auf Chlorophyll und Chlorophyllabbau in Fichtennadeln. – Phytion (Austria) 23: 253–261.
- GRILL, D., POLZ, I. & ESTERBAUER, H. 1981: Notes on the chlorophyllcontent in fumigated spruce needles. – Arch. Ochr. Środow. (Polen) 2-4: 59–62.
- GRILL, D., POLZ, I. & PFEIFHOFER, H. 1983: Chlorophyll und Chlorophyllabbau in Fichtennadeln. – Phytion (Austria) 23: 79–90.
- GRILL, D., WELT, R. & ESTERBAUER, H. 1978: Untersuchungen über das Ascorbinsäuresystem in mit *Chrysomyxa abietis* befallenen Fichtennadeln. – Z. Pflanzenkrankh. 85: 502–508.
- GRODZIŃSKA, K. 1971: Acidification of tree bark as a measure of air pollution in southern Poland. – Bull. Acad. Pol. Sci. Ser. Sci. biol., Cl. II, 19: 189 – 196. (*)
- GUTTENBERGER, H., HÄRTEL, O. & THALER, 1979: Scheiden chronisch SO₂-geschädigte Fichtennadeln Äthylen aus? – Phytion (Austria) 19: 269–279.
- HAFELLNER, J. & GRILL, D. 1980: Die Wiedereinwanderung epiphytischer Flechten in den Raum Leoben-Hinterberg nach Stilllegung des Hauptemittenten. – Mitt. Forstl. Bundesversuchsanst. Wien 131: 82–87.
- HAFELLNER, J. & GRILL, D. 1981: Der Einfluß der Stilllegung einer Zellstoffabrik auf die Vegetation der Umgebung. – Phytion (Austria) 21: 25–38.
- HÄRTEL, O. 1953: Eine neue Methode zur Erkennung von Raucheinwirkungen an Fichten. – Zbl. ges. Forst- u. Holzw. 72: 12–21.
- HÄRTEL, O. 1954: Über einige Wirkungen gas- und staubhaltiger Fabriksexhalationen auf Pflanzen. – Angew. Pflanzensoziologie (Festschrift AICHINGER) 2: 1030–1034.

- HÄRTEL, O. 1958: Zur Trennung der Schadanteile gleichzeitig auf die Vegetation einwirkender Abgasquellen. – *Allg. Forstzeitschr.* 42 (ohne Paginierung).
- HÄRTEL, O. 1960 a: Über neuere Erfahrungen mit dem Trübungstest, insbesondere seine Eignung zur fortlaufenden Kontrolle von Abgasschäden. – *Forst- u. Holzwirt* 15: (13).
- HÄRTEL, O. 1960 b: Zur Auswertung von Windregistrierungen bei Rauchschadensuntersuchungen. – *Wetter u. Leben* 12: 1–5.
- HÄRTEL, O. 1965: Über die Möglichkeiten der Trennung mehrerer gleichzeitig einwirkender Abgasquellen. – *Mitt. Forstl. Bundesversuchsanst. Wien, Sonderheft Rauchschäden in Österreich*, 57–68.
- HÄRTEL, O. 1971: Ökophysiologie und anthropogene Umweltveränderungen. – *Ber. Deutsch. Bot. Ges.* 84: 497–506.
- HÄRTEL, O. 1972 a: Langjährige Meßreihen mit dem Trübungstest an abgaseschädigten Fichten – Ergebnisse und Folgerungen. – *Oecologia* 9: 105–111.
- HÄRTEL, O. 1972 b: Koniferenborken als Indikatoren für Luftverunreinigungen. – *Verh. Ges. f. Ökologie* 1: 153–154.
- HÄRTEL, O. 1976: Streßwirkungen – Versuch einer terminologischen Klärung aus pflanzenphysiologischer Sicht. – *Phyton (Austria)* 17: 285–293.
- HÄRTEL, O. 1980: Das Vertikalprofil der Luftverunreinigungen im Aichfeld. – *Mitt. Forstl. Bundesversuchsanst. Wien* 131: 189–194.
- HÄRTEL, O. 1982: Pollutants accumulation by bark. – In: STEUBING, L. & JÄGER, H.-J. (Hg.), *Monitoring of air pollutants by plants*. Serie LIETH H. (Hg.) *Tasks for Vegetation Science* 7: 138–147. Junk, Den Hague.
- HÄRTEL, O. 1986: Die Absorption von SO₂ durch Borke – Neues zur Bioindikation von Luftverunreinigungen. – *Verh. Ges. f. Ökologie* 15 (im Druck).
- HÄRTEL, O. & CERNY, M. 1981: Veränderungen in Fichtenwaldböden durch Langzeiteinwirkungen von SO₂. – *Mitt. Forstl. Bundesversuchsanstalt Wien* 137: 233–240.
- HÄRTEL, O. & FUCHSHOFER, H. 1986: Methodische Ergänzungen zum Trübungstest zur Bioindikation von Abgaswirkungen auf Koniferen. – *Phyton* 26 (im Druck).
- HÄRTEL, O. & GRILL, D. 1972a: Die Leitfähigkeit von Fichtenborken-Extrakten als empfindlicher Indikator für Luftverunreinigungen. – *Eur. J. For. Path.* 2: 205–215.
- HÄRTEL, O. & GRILL, D. 1972b: Zellphysiologische und biochemische Untersuchungen an SO₂-geschädigten Fichtennadeln – Restistenz und Pufferkapazität. – *Mitt. Forstl. Bundesversuchsanst. Wien* 97: 367–384.
- HÄRTEL, O., GRILL, D. & KRZYSCIN, F. 1980 a: Die Abgasbelastung im Raume Voitsberg – Köflach. Die Verwendung der Borke zur Indikation. – *Mitt. Forstl. Bundesversuchsanst. Wien* 131: 241–247.
- HÄRTEL, O., GRILL, D. & KRZYSCIN, F. 1980 b: Darstellung der Umweltbelastung im weststeirischen Industriegebiet anhand von Fichtenborken. – *Mitt. Naturwiss. Verein Steiermark* 110: 105–116.
- HÄRTEL, O. & MIKLAU, S. 1971: Eine Methode zur Herstellung definierter niedriger SO₂-Spannungen. – *Z. Pflanzenkrankh.* 78: 538–543.
- HÄRTEL, O. & MIKLAU-GRASSL, S. 1974: Über den Einfluß von SO₂ auf Pflanzenzellen. – *Phyton (Austria)* 16: 81–89.
- HUBER, E., ESTERBAUER, H. & GRILL, D. 1986: Qualitative und quantitative Untersuchungen über Fettsäuren in Lipiden der Fichtennadeln. – *Beitr. Biol. Pfl.* (im Druck)

- HUTTER, M. 1973: Die Pflanze als Indikator für Luftverunreinigungen. – Diss. Univ. Innsbruck.(*)
- JÄGER, H.-G. & GRILL, D. 1975: Einfluß von SO₂ und HF auf freie Aminosäuren der Fichte (*Picea abies* [L.] KARSTEN). – Eur. J. For. Path. 5: 279–286.
- KELLER, Th., SCHWAGER, H. & YEE-MEILER, D. 1976: Der Nachweis winterlicher SO₂-Immissionen an jungen Fichten. Ein Vergleich dreier Methoden. – Eur. J. For. Path. 6: 244–249.(*)
- KIENZL, I. 1978: Baumborke als Indikator für SO₂-Immissionen. – Diss. Univ. Graz.
- KIENZL, I. & HÄRTEL, O. 1979: Die Luftverunreinigungen im Stadtgebiet von Graz, dargestellt anhand von Borkenuntersuchungen. – Mitt. Naturwiss. Verein Steiermark 109: 113–135.
- KOLB, H. & GRILL, D. 1986: Waldschäden, Einflußfaktoren und ihre Bewertung. Verursacheranalyse in einem klassischen Rauchschadensgebiet. – VDI-Bericht 560.
- KOSMUS, W. 1986: Integrale Langzeitmethode zur Bestimmung von Stickoxidemissionen. – Fresenius Z. Anal. Chem. 320: 507–511.(*)
- KOSMUS, W. & GRILL, D. 1985: Heavy metals in tree rings and forest diseases. – Proc. Heavy metals in the environment, Int. Conf. Athen, pp. 607–609.
- KOSMUS, W. & GRILL, D. 1986: Die Bewertung verschiedener Parameter bei der Beurteilung von Immissionen anhand von Borkenanalysen am Beispiel des Stadtgebietes von Graz. – Mitt. Naturwiss. Ver. Steiermark, 116.
- KREINER, W. 1983: Das Verhalten der Borke unter SO₂-Immissionen. – Diss. Univ. Graz.
- KREINER, W. & HÄRTEL, O. 1986: Spruce bark influenced by SO₂. – Eur. J. For. Path. (im Druck).
- LIKUSSAR, W. HUBER, H., RABER, J. & GRILL, D. 1976: Eine spektralanalytische Schnellmethode zur Bestimmung von Chlorid in Pflanzenmaterial. – Microchim. Acta 87: 467–471.
- LIKUSSAR, W., RABER, J., HUBER, H. & GRILL, D. 1976b: The spectrographic determination of sulfate, chloride and fluoride in plant material. – Anal. Chim. Acta 87: 247–250.
- LINDNER, W. & GRILL, D. 1978: Säuren in Koniferennadeln. – Phyton (Austria) 18: 137–144.
- LÖTSCHERT, W. & KÖHM, J. 1973: pH-Wert und S-Gehalt der Baumborke in Immissionsgebieten. – Oecol. Plant. 8: 199–209.(*)
- MÖSE, J., RABER, J., GRILL, D. & KÖCK, M. 1981: Zur gesundheitlichen Beurteilung von Hochhäusern. 1. Mitt. Verhalten einiger umweltbezogener Faktoren. – Zbl. Bakt. Hyg. I. Abt. Orig. B. 172: 312–322.
- NEUMANN, M. & GRILL, D. 1981: Bericht über XI. Internationale Arbeitstagung forstlicher Rauchschadensachverständiger (IUFRO S 2.09) in Graz 1. – 6. 9. 1980. – Allg. Forstztg. 92: 43–46.
- PELZ, E. 1958: Erfahrungen mit dem Trübungstest nach HÄRTEL bei der Rauchschadensdiagnose an Fichte. – Arch. Forstwesen 7: 105–112.(*)
- PELZ, E. & DELLING, W. 1963: Untersuchungen über die Anwendbarkeit des Trübungstests nach HÄRTEL bei der Diagnose von Rauchschäden an Tanne. – Wiss. Z. Techn. Univ. Dresden 12: 533–541.(*)
- PFEIFHOFER, W. & GRILL, D. 1984: Carotinoide in Fichtennadeln. I. Qualitative Untersuchungen. – Phyton (Austria) 24: 283–293.

- PFEIFHOFER, W., TSCHULIK, M. & GRILL, D. 1986: Zum physiologischen Verhalten von Fichten in Inversionszonen. – Verh. Ges. f. Ökologie 15 (im Druck).
- RABER, J., HUBER, W., LIKUSSAR, W. & GRILL, D. 1976: Eine spektralphotometrische Schnellmethode zur Bestimmung von Fluorid in Pflanzenmaterial als Nachweis von Fluor-Immissionen. – Angew. Botanik 50: 135–140.
- RABER, J., KOSMUS, W. & GRILL, D. 1983: Ein Schnellverfahren zur Auswertung von „Bleikerzen“. – Staub 43: 23–24.
- RABER, J., LIKUSSAR, W. & GRILL, D. 1974: Erfahrungen mit einer photometrischen Schnellmethode zur Bestimmung von Schwefel in Pflanzenmaterial. – Tagungsber. „Umweltverunreinigung und Forstwirtschaft“ Mariánské Lázně 141–144.
- RABER, J., LIKUSSAR, W. & GRILL, D. 1976: Eine spektralphotometrische Schnellmethode zur Bestimmung von Schwefel in Pflanzenmaterial. – Int. J. Environ. Anal. Chem. 4: 251–255.
- RABER, J., LIKUSSAR, W., HUBER, H. & GRILL, D. 1981: Photometrische Bestimmung von S, F, Cl in Fichtennadeln – Verfahren zur Diagnose von Abgasbelastungen. – Mitt. Forstl. Bundesversuchsanstalt Wien 137: 73–75.
- STAXÄNG, B. 1969: Acidification of bark of some deciduous trees. – Oikos 20: 224–230.(*).
- STÜBER, E. 1975: Studie über die umwelthygienisch-ökologische Situation der Stadt Salzburg. – Hg. Bundesministerium für Gesundheit und Umweltschutz. Salzburg.(*).
- THALER, I. 1986: 100 Jahre Zellforschung in Graz – Zum 100. Geburtstag Friedl WEBERS. – Phytion (Austria) 26 (im Druck).
- WIND, E. 1979: Pufferkapazität in Koniferennadeln. – Phytion (Austria) 19: 197–215.

Anschrift des Verfassers: em. Univ.-Prof. Dr. Otto HÄRTEL
Institut für Pflanzenphysiologie Karl-Franzens-Universität
Graz, Schubertstraße 51, A-8010 Graz.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereins für Steiermark](#)

Jahr/Year: 1986

Band/Volume: [116](#)

Autor(en)/Author(s): Härtel Otto

Artikel/Article: [Immissionsforschung am Institut für Pflanzenphysiologie der Karl-Franzens-Universität Graz. 13-41](#)