

## Schwermetall-Frachten der Assimilationsorgane von Waldbäumen

Winfried SCHRÖDER und Otto FRÄNZLE

### Gliederung:

Danksagung

Zusammenfassung

Abstract

- 1 Schädigung von Waldbäumen durch Schwermetalle
- 2 Probennahme und -aufbereitung: Methodenkritische Anmerkungen
- 3 Ergebnisse und Diskussion
- 4 Zitierte Literatur
- 5 Tabellen

### Danksagung:

Die Messungen wurden durchgeführt von Carl-Dieter Garbe-Schönberg, Magdalena Höck, Susanne Haluszczak, Jutta Krinitz, Hannelore Trautz und Eva Wildförster im Rahmen des vom BMU/UBA geförderten F+E-Vorhabens 108 03 046/13.

### Zusammenfassung

Die Schwermetallfrachten von Buchenblättern sowie Fichten- und Kiefernadeln in acht nach Repräsentanzkriterien ausgewählten Forsten Nordrhein-Westfalens wird untersucht. Der Kennzeichnung des phytotoxischen Potentials von Schwermetallen schließt sich eine Darstellung der daraus zu schlußfolgernden Probennahme- und Probenaufbereitungstechnik an. Die Untersuchungsergebnisse rangieren weitgehend in den in der Literatur dokumentierten Bereichen. Sie lassen phytotoxische Schwermetall-Konzentrationen in den Haftwasserfilmen auf den Assimilationsorganen erwarten.

## Abstract

The heavy metal loads of Cd, Cu, Fe, Mn, and Zn of beech leaves and spruce and pine needles in eight representative forest ecosystems of Northrhine-Westfalia are investigated. Their phytotoxic potential is described with regard to sampling and preparing leaves and needles for chemical analysis and ecotoxicological interpretation. The results accord to data documented in the relevant literature. Phytotoxic concentrations in intercepted water on leaves and needles are probable.

### 1 Schädigung von Waldbäumen durch Schwermetalle

Die Bestimmung der Schwermetall-Frachten von Baumwurzeln gestattet neben den in der überwiegenden Zahl der Untersuchungen durchgeführten Bodenanalysen eine Abschätzung der Belastung von Boden und Bäumen in Forstökosystemen. Weitere Aufschlüsse über den auf die Bäume einwirkenden anthropogen induzierten Stress können Untersuchungen über die Befruchtung von Assimilationsorganen erbringen. Diesem Zweck ist die vorliegende Arbeit gewidmet. Hierbei wird als Schwermetall-Fracht die Summe der incorporierten und der oberflächlich anhaftenden Schwermetalle bezeichnet („Inhaltsstoffe“ i.e.S. + Oberflächendeponat). Beide Fraktionen werden als toxiologisch bedeutsam erachtet.

Das Schadstoffdeponat auf Blättern und Nadeln wirkt als dreifache Belastung:

1. Auf Assimilationsorganen kann es – insbesondere nach längeren Trockenperioden – zu Beginn einer Befeuchtungsphase (Regen, Nebel, Morgentau), beim Verdunsten von interzipiertem Niederschlag oder beim Abtauen von Schnee zu extrem niedrigen pH-Werten (pH 2.3) kommen (FREVERT & KLEMM 1984; FRITSCH 1987a, b, c). Freilandexperimente zeigen, daß daraus in Kombination mit hohen Schwermetall-Frachten auf Nadeln und Blättern infolge der durch Säure möglichen Kutikularerosion und der pH-gesteuerten Schwermetall-Mobilisierung ein erhebliches Schädigungspotential resultiert. Das gilt insbesondere dann, wenn der pflanzliche Organismus aufgrund von Nährstoffmangel nicht zur Säurepufferung und somit zur Immobilisierung der Schwermetalle befähigt ist (GODT 1986: 217; GODT et al. 1986: 272, 1988: 313). Diese Spitzenkonzentrationen lassen sich weder durch das Auffangen der Kronentraufe – auch nicht bei fraktionierter Gewinnung – noch durch Blatt-/Nadelanalysen erfassen.

2. Findet in solchen Streßsituationen Säurepufferung durch Freisetzung von Calcium und Magnesium aus den Assimilationsorganen statt, müssen diese Nährstoffe entsprechend aus dem Boden aufgenommen werden, so daß dieser versauert (VETTER & SCHRÖDER 1989).

3. Der Streufall trägt ganz entscheidend zum Schwermetalleintrag in Forstökosysteme bei (GODT 1986: 14 ff.). Nach Angaben von FRÄNZLE et al.

(1987: E 26) beläuft sich der Anteil des Streufalls am Gesamtbodeninput in 15 km südöstlich Kiels gelegenen Waldstandorten bei Cd auf 11 – 43% (Buche) bzw. 40% (Fichte), bei Cu auf 26 – 38% bzw. 25 – 47% und bei Pb auf 38 – 54% bzw. 55 – 84%.

Zur Charakterisierung der atmosphärischen Schwermetallbelastung in Wäldern wurden für diese Untersuchung acht nordrhein-westfälische Forstökosysteme nach Repräsentanzkriterien ausgewählt (SCHRÖDER et al. 1991; SCHRÖDER & FRÄNZLE 1992). Im Jahre 1986 wurden an diesen in Parzellen unterteilten Standorten Assimilationsorgane von 84 Buchen, 144 Fichten und 24 Kiefern beprobt, um ihre Befruchtung mit Cadmium (Cd), Kupfer (Cu), Eisen (Fe), Mangan (Mn), Blei (Pb) und Zink (Zn) atomabsorptionsspektrometrisch zu bestimmen. 1988 erfolgte eine Wiederholungsbeprobung, bei der statt 12 lediglich drei Bäume pro Untersuchungsparzelle (d. h. mindestens sechs pro Bestand) berücksichtigt werden konnten (vgl. Tab. 1 bis 8).

### 2 Probennahme und -aufbereitung: Methodenkritische Anmerkungen

Die Kontrolle und Sicherung der Qualität der atomabsorptionsspektrometrischen Bestimmung der Schwermetall-Frachten beschreiben (SCHRÖDER et al. 1991). Deshalb wird im folgenden auf die Probennahme und -aufbereitung methodenkritisch eingegangen.

In den Fichtenbeständen entnahm ein Zapfenpflücker Äste des siebenten Wirtels aus verschiedenen Himmelsrichtungen und Lichtexpositionen. Sofort nach dem Absägen der Fichtenzweige wurden ihre ersten sechs Nadeljahrgänge verschiedener Positionen am Ast umfassend beprobt und in Papiertüten überführt, um sie dann darin mindestens 48 Stunden bei 60° C zu trocknen. Analog wurde bei den Kiefern verfahren, deren dem siebenten Quirl entsprechenden Ästen verschiedener Lichtexposition und Himmelsrichtungen drei Nadeljahrgänge entnommen wurden.

Die Sammlung der Buchenblätter fand 1986 erst im Spätsommer statt, da die Blattentwicklung im Frühjahr wegen des langen Winters noch sehr unvollkommen ausgeprägt war. Die Blätter stammen gemäß den Vorschlägen von ZIMMERMANN & PLANKENHORN (1986) von Ästen aus vier Kronenbereichen (oben außen, oben innen, unten außen sowie unten innen). Sie wurden entsprechend getrennt gesammelt und nach der Homogenisierung mit einer Labormühle unter Wahrung gleicher Mengenverhältnisse zu Parzellenmischproben vereint.

Wie bei der Beprobung der Fichten und Kiefern wurde gemäß der Forderung von KRIVAN & SCHALDACH (1986: 167) auch bei den Buchen größter Wert auf die Gewinnung möglichst repräsentativen Probenmaterials geachtet. Dies erscheint angezeigt, wenn man mit ALDINGER (1987: 146) von folgenden Einflußfaktoren für den Elementgehalt in Assimilationsorganen von Waldbäumen ausgeht: Baumart (1), Alter (2) und soziologische Stellung (3) des Probenbaumes, intraspezifische genetische Variabilität (4), Alter der Assimi-

lationsorgane (5), Ablagerungen auf den Assimilationsorganen (6), Erkrankungen (Insekten, Pilze, Viren) (7), Fruktifikation (8), Position des beprobten Astes in der Krone (Quirl; Exposition: Belichtung, Himmelsrichtung) (9), Zeitpunkt der Probennahme (10), Witterungsbedingungen bei der Beprobung (11) sowie Wasser- und Lufthaushalt des Bodens (Nährstoffanlieferung) (12).

Während im Rahmen des Meßkonzeptes dieser Untersuchung (markierte Probenbäume, Beprobung im 2-Jahresabstand) die ersten fünf Faktoren unverändert bleiben, so gilt dies für die anderen nicht oder nur in eingeschränktem Maße. Wie die Blatt- und Nadelinhaltsstoffe so erweisen sich auch die Elementfrachten von Assimilationsorganen (d.h. die Summe aus inkorporiertem und anhaftendem Stoffbestand) an ein und demselben Baum neben o.g. Randbedingungen als abhängig von der dem Beprobungszeitpunkt vorausgehenden Immissionssituation. Neben der Berücksichtigung all dieser Einflußfaktoren kommt es mit Blick auf die Repräsentativität des Probengutes entscheidend auf die Gewinnung großer Probenmengen an, aus denen dann nach der Homogenisierung Aliquote entnommen, mit Salpetersäure aufgeschlossen und analysiert werden. Trägt man somit zwar der baumindividuellen räumlichen Variabilität der Elementbefrachtung Rechnung, läßt sich deren zeitliche Dynamik so nicht erfassen.

Ein Spülen der Assimilationsorgane mit Chloroform zwecks Unterscheidung zwischen incorporierten und oberflächlich sorbierten Schwermetallen konnte im Rahmen dieser Untersuchungen aus zeitlichen Gründen nicht erfolgen (vgl. KRIVAN & SCHALDACH 1986; SCHRÖDER & FRÄNZLE 1992). Für die hier angestrebte Charakterisierung der Gefährdung der Bäume durch Schwermetall-Deposition sind die durchgeführten Analysen dennoch sinnvoll. Hierfür sprechen u.a. folgende Tatsachen: (a) Die Mengenverhältnisse zwischen incorporierten und oberflächlich anhaftenden Schwermetalle hängen neben den oben angeführten zwölf Einflußgrößen sehr entscheidend von der Untersuchungsmethodik ab. Zur Ableitung allgemeingültiger Aussagen fehlt eine breitere Basis vergleichbarer Untersuchungsergebnisse (SCHRÖDER et al. 1991). (b) Wenn auch der incorporierte Schwermetall-Anteil häufig als toxikologisch relevanter eingestuft wird, so ist das Oberflächendeponat als jederzeit aktivierbares Schädigungspotential aufzufassen.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

Die Resultate der atomabsorptionsspektrometrischen Bestimmung von Cd, Cu, Fe, Mn, Pb und Zn sind in den Tabellen 1 bis 8 dokumentiert. Die bei FIEDLER & RÖSLER (1988: 102 ff.) aus einer Vielzahl von Studien für *Fagus silvatica*, *Picea abies* und *Pinus sylvestris* zusammengestellten Schwermetall-Frachten der Assimilationsorgane rangieren in folgenden Intervallen (jeweils in µg/g TS):

Buche: Cd: 0.7 – 1.0, Cu: 4 – 24, Fe: 300, Mn: 1800 – 1940,  
Pb: 16 – 20, Zn: 46 – 78;

Fichte: Cd: 0.02 – 0.5, Cu: 1.5 – 10, Fe < 26 – 410,  
Mn: < 80 – 3200, Pb: 0.1 – 7, Zn: 11 – 60;

Kiefer: Cu: 2 – 7, Fe: 40 – 552, Mn: 70 – 950, Pb: 2 – 8,  
Zn: 25 – 76.

Wie ein Blick auf die Tabellen 1 bis 8 zeigt, liegen die Schwermetall-Frachten der Assimilationsorgane aus dem Hochsauerland und der Hohen Mark (Haltern) in den eben dokumentierten Intervallen. Dies gilt überraschenderweise auch für das in den Baumwurzeln in so hoher Konzentration gefundene Cu (SCHRÖDER & FRÄNZLE 1992; vgl. FIEDLER & RÖSLER 1988; FRÄNZLE et al. 1988; GODT 1986; GODT et al. 1988; ISERMANN 1985; KOENIES 1982; KRIVAN et al. 1986; MAYER 1981; MAYER & HEINRICHS 1980; ZECH & POPP 1983; ZÖTTL 1985).

Die Befrachtung der Fichtennadeln mit Cd, Cu, Fe, Pb und Zn ist geringer als die ihrer Wurzeln (SCHRÖDER & FRÄNZLE 1992). Eine Ausnahme bildet – wie auch den o.a. Arbeiten zu entnehmen ist – das Mn. Hierbei handelt es sich um ein äußerst mobiles Element, das im Gegensatz zu den anderen Schwermetallen in erheblichem Maße von den Wurzeln der Waldbäume aufgenommen, in die Assimilationsorgane transportiert und aus diesen leicht ausgewaschen wird. Für die Buchen gilt dies mit Ausnahme von Cd, das in den Blättern z.T. etwas höhere Gehalte als in den Wurzeln aufweist.

Ordnet man die Bestandesmittelwerte der Schwermetall-Frachten von Blättern und Nadeln (jeweils über alle Jahrgänge) und addiert die Rangplätze der Waldbestände über alle Elementfrachten, so ergibt sich folgende Belastungsrangfolge (Abkürzungen vgl. Tab. 1 – 8):

1986: HaKi > BurBu > SteBu/WiBu > BurFi > RoFi > SteFi > WiFi

1988: Haki > BurBu > SteBu > BurFi > WiBu > SteFi > RoFi > WiFi

Σ: HaKi > BurBu > SteBu > BurFi > WiBu > SteFi > RoFi > WiFi

Die hervorgehobene Stellung des am Rande des Ruhrgebietes bei Haltern gelegenen Kiefernbestandes überrascht nicht. Erstaunlich sind jedoch zwei Sachverhalte: Vielfach wird angenommen, daß die Schadstoffbelastung der Fichten aufgrund ihrer ausgeprägten Filtereffektivität höher als die von Laubbäumen sei. Dies läßt sich aus den vorliegenden Daten für die Schwermetall-Befrachtung von Assimilationsorganen in Übereinstimmung mit den Solling-Daten von MAYER (1981: 44) und GODT et al. (1988: 312) mit Ausnahme des Elements Cd (im Solling bildet Cu die Ausnahme) nicht ablesen. Die Schadstoffbelastung von Buchenblättern ist insofern nur mit der von Nadeln vergleichbar, wenn diese einjährig, d.h. wie die Blätter im Probennahmejahr ausgetrieben sind. In diesem Falle ist davon auszugehen, daß die Immissionsbedingungen benachbarter Laub- und Nadelbaumbestände im Rahmen der normalen räumlichen Variabilität liegen.

Positive Korrelationen zwischen Nadelalter und Schwermetall-Deponat lassen Fe, Mn und Pb erkennen. Die entsprechenden Beziehungen bei Cd und Cu sind negativ, während sich bei Zn keinerlei gerichtete Assoziationen ab-

zeichnen. Die entsprechenden Solling-Werte weisen bei Fe, Mn und Pb in dieselbe Richtung, während bei Cu der Anstieg weniger linear verläuft und bei Cd kein Trend festzustellen ist.

Als ökotoxikologisch von zentraler Bedeutung gilt die Unterscheidung zwischen den Blatinhaltsstoffen und den auf der Blattoberfläche deponierten Stoffen. Nach KRIVAN & SCHALDACH (1986: 165, 167) ist der Anteil des Oberflächendeponats an der gesamten Elementfracht ungewaschener Fichtennadeln für Ca, Mg, K, Mn und Zn „entweder nicht erkennbar oder vernachlässigbar niedrig“. Die Oberflächenfracht nehme hingegen bei Al, Fe, Cd und Pb mit 20 bis 95% erhebliche Ausmaße an. Diesen Befunden widersprechen mit Ausnahme des Elementes Mn Untersuchungen von GODT (1986: 195, 202 f.). Demnach betragen die oberflächlich deponierten Schwermetall-Frachten auf Fichtenzweigen bezogen auf deren Gesamtstoffbestand selbst nach einer zweieinhalbwöchigen Trockenperiode bei Cd 9.0%, Cu 0.2%, Fe 1.0%, Mn 0.06%, Pb 6.0% und Zn 118%.

Dieser Gegensatz offenbart sich nicht nur in den ermittelten Schwermetall-Deponatanteilen, sondern auch in der Beurteilung ihres Toxizitätspotentials: Nach Einschätzung von KRIVAN & SCHALDACH (1986: 167) sind die auf den Fichtennadeln abgelagerten Schwermetalle „offenbar nur von geringer biologischer Wirksamkeit“, womit u.a. eine „Revision ... [von] ... Hypothesen über Akkumulation und toxische Wirkung von Schwermetallen in den Nadeln ... dringend notwendig“ würde. Zu einer gegenteiligen Auffassung gelangen GODT (1986: 200 f., 217) sowie GODT et al. (1986, 1988). Ihre Bewertung der Toxizität oberflächlich auf Assimilationsorganen deponierter Schwermetalle kann jedoch nur dann als stimmig betrachtet werden, wenn der in bezug auf die gesamte Schwermetall-Fracht der Fichtennadeln als „nicht sehr stark“ bzw. „mäßig“ (GODT 1986: 202 f.) bezeichnete Anteil des Schwermetall-Nadeloberflächendeponates ausreicht, um die in Abwaschversuchen festgestellten und im Verhältnis zur Kronentraufe extremen Schwermetall-Konzentrationen mit dem daraus abgeleiteten Toxizitätspotential zu entfalten.

Hierfür geben die Abwaschversuche von GODT (1986: 191 ff.) Hinweise. In den Abwaschlösungen der Fichtenzweige, die für die Bestimmung o.a. %-Anteile des Nadeloberflächendeponates herangezogen wurden, fanden sich nach der zweieinhalbwöchigen Trockenzeit folgende „Abwaschmengen“ ( $\mu\text{g/l}$  pro 200 g TS Nadelmaterial; in Klammern die entsprechenden Werte von acht Tage – davon fünf Regentage – später geernteten Zweigen desselben Solling-Bestandes): Cd 7.67 (0.97), Cu 11.2 (2.06), Fe 550 (230), Pb 269.58 (13.06) und Zn 13.42 (2.05). Es zeigt sich mithin deutlich, daß eine ausgeprägte Akkumulation von Schwermetallen auf der Oberfläche von Fichtennadeln nachweisbar ist. Dieser Sachverhalt läßt dort hohe Schwermetall-Konzentrationen im Flüssigkeitsfilm nach Benetzung mit Niederschlagswasser erwarten. GODT (1986: 200) findet folgende maximale Schwermetall-Konzentrationen in Abwaschlösungen ( $\mu\text{g/l}$ ; in Klammern Durschnittskonzentration der Kronentraufe des Fichtenbestandes F1 im Solling: Cd 20.2 (3.4), Cu 71 (34), Fe 3030 (281), Pb 935 (78) und Zn 38530 (288).

Diese Befunde zeigen, daß die Schwermetall-Konzentrationen in Haftwasserfilmen auf Assimilationsorganen von Waldbäumen weit über den entsprechenden Mittel- und Maximalwerten der Kronentraufe liegen können. Falls sich diese Beobachtungen in mehreren Untersuchungen bestätigen ließen, dann ist aufgrund vergleichbarer Schwermetall-Belastungen von größenordnungsmäßig ähnlichen Spitzenkonzentrationen in Haftwasserfilmen auf den Assimilationsorganen der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Buchen, Fichten und Kiefern auszugehen.

#### 4 Zitierte Literatur

- ALDINGER, E.: Elementgehalte im Boden und in Nadeln verschieden stark geschädigter Fichten-Tannen-Bestände auf Praxisdüngungsflächen im Buntsandstein-Schwarzwald. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen **19** (1987)
- FIEDLER, H.J. & H.J. RÖSLER: Spurenelemente in der Umwelt. Stuttgart (1988)
- FRÄNZLE et al.: Darstellung der Vorhersagemöglichkeiten der Bodenbelastung durch Umweltchemikalien. – Umweltforschungsplan des BMNUR. Forschungsbericht 106 05 026, im Auftrag des Umweltbundesamtes. Kiel (1987)
- FRÄNZLE et al.: Erarbeitung und Erprobung einer Konzeption für die integrierte regionalisierende Umweltbeobachtung am Beispiel des Bundeslandes Schleswig-Holstein. – Umweltforschungsplan des BMNUR. Forschungsbericht 109 02 033, im Auftrag des Umweltbundesamtes. Kiel (1988)
- FREVERT, T.; O. KLEMM: Wie ändern sich die pH-Werte im Regen- und Nebelwasser beim Abtrocknen auf der Pflanzenoberfläche? In: Archives for Meteorology, Geophysics and Bioclimatology, Ser. B. **34**, 75 – 81 (1984)
- FRITSCHKE, U.: Neuartige Waldschäden in Abhängigkeit vom Abtropfverhalten des Niederschlags. In: Allgemeine Forstzeitschrift **18**, 467 – 468 (1987a)
- FRITSCHKE, U.: Investigations on the immission stress in spruce forests in dependence on their altitude above sea level and the distance from the edge of the forest. In: R. PERRY et al. (eds.): Acid rain: Scientific and technical advances, 239 – 243. London (1987b)
- FRITSCHKE, U.: Zur Abscheidung von Luftverunreinigungen an Waldrändern verglichen mit dem Bestandesinneren. In: 8. Seminarbericht „Waldschäden/Luftverunreinigungen“ zum 9. UBA-/BMNUR-Statusseminar am Fraunhofer Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie vom 15. bis 16. Oktober 1987, 71 – 86. Schmallenberg (1987c)
- GODT, J.: Untersuchungen von Prozessen im Kronenraum von Waldökosystemen und deren Berücksichtigung bei der Erfassung von Schadstoffeinträgen – unter besonderer Beachtung der Schwermetalle. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben **19** (1986)
- GODT, J.; M. SCHMIDT; R. MAYER: Processes in the canopy of trees: internal and external turnover of elements. In: H.-W. GEORGI (ed.): Atmospheric pollutants in forest areas, 263 – 274. Dordrecht (1986)
- GODT, J., SCHMIDT, M.; R. MAYER: Pathways of heavy metals in beech and spruce canopy: internal and external cycling. In: J.N. CAPE; P. MATHY (eds.): Scientific

- basis of forest decline symptomatology. Proceedings of a workshop jointly organised by the CEC, and the Institute of Terrestrial Ecology, Bush Estate Research Station, in Edinburgh, Scotland, 21 – 24 March 1988, 307 – 315. Dodrecht (1988)
- ISERMANN, K.: Diagnose und Therapie der „neuartigen Waldschäden“ aus der Sicht der Waldernährung. Vortrag anlässlich des VDI-Kolloquiums „Waldschäden“ am 18. – 20. Juni 1985 in Goslar (Harz)
- KOENIS, H.: Über die Eigenart der Mikrostandorte im Fußbereich der Altbuchen unter besonderer Berücksichtigung der Schwermetallgehalte in der organischen Auflage und im Oberboden – Eine vegetations- und landschaftsökologische Studie. – Diss. Kassel (1982)
- KRIVAN, V.; G. SCHALDACH: Untersuchungen zur Probenahme und -vorbehandlung von Baumnadeln zur Elementanalyse. In: Fresenius Zeitschrift für Analytische Chemie **324**, 158 – 167 (1986)
- KRIVAN, V.; U. LÜTTGE; G. SCHALDACH: Profile von Makro- und Mikromineralnährstoffen in gesunden und kranken Fichten (*Picea abies* [L.] Karst.) auf verschiedenen Standorten in Südwestdeutschland. In: Angewandte Botanik **60**, 373 – 389 (1986)
- MAYER, R.: Natürliche und anthropogene Komponenten des Schwermetallhaushalts von Waldökosystemen. Göttinger Bodenkundliche Berichte **70** (1981)
- MAYER, R.; H. HEINRICHS: Flüssebilanzen und aktuelle Änderungsraten der Schwermetall-Vorräte in Wald-Ökosystemen des Sollings. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde **143**, 232 – 246 (1980)
- SCHRÖDER, W.: Ökosystemare und statistische Untersuchungen zu Waldschäden in Nordrhein-Westfalen: Methodenkritische Ansätze zur Operationalisierung einer wissenschaftstheoretisch begründeten Konzeption. Diss. Kiel (1989)
- SCHRÖDER, W.; O. FRÄNZLE: Heavy metal loads of fine roots in beech and spruce forest ecosystems in Northrhine Westfalia (Germany). In: Fresenius Environmental Bulletin **1**, 499 – 505 (1992)
- SCHRÖDER, W.; C.-D. GARBE-SCHÖNBERG; O. FRÄNZLE: Die Validität von Umweltdaten. In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung **3** (4), 237 – 241 (1991)
- VETTER, L.; W. SCHRÖDER: Darstellung der Waldschäden als komplexes Beziehungsgeflecht. In: Die Geowissenschaften **10**, 285 – 298 (1989)
- ZECH, W.; E. POPP: Magnesiummangel, einer der Gründe für das Fichtensterben in Nordostbayern. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt **102**, 50 – 55 (1983)
- ZIMMERMANN, R.-D.; W.E. PLANKENHORN: Methodik der Blattprobenahme an der Rotbuche unter immissionsökologischem Aspekt. In: Allgemeine Forstzeitschrift **3** (Sonderdruck o. S.) (1986)
- ZÖTTL, H.W.: Waldschäden und Nährelementversorgung. In: Düsseldorfer Geobotanisches Kolloquium **2**, 31 – 41 (1985)

Tab. 1: Cd-Frachten [ $\mu\text{g/g TS}$ ] von Fichtennadeln (aus: SCHRÖDER 1989)

Standort	Parzelle	Nadeljahrgänge (Nummerierung bezogen auf Probennahmejahr 1986 1988)							
		1988	1987	1986	1985	1984	1983	1982	1981
				1	2	3	4	5	6
Wilzenberg (WiFi) R 34.52,7 H 56.69	1	.212	.097	.138 .075	.124 .075	.128 .078	.092	.150	
	2	.150	.066	.120 .079	.114 .059	.114 .092	.053	.138	
	3	.105	.048	.114 .049	.116 .056	.120 .072	.072	.152	
	4	.217	.099	.126 .082	.121 .090	.134 .095	.073	.144	
	5	.155	.080	.190 .066	.196 .059	.170 .094	.082	.168	
Robecke (RoFi) R 34.51,7 H 56.70,9	9	.396	.363	.480 .359	.290 .387	.272 .400	.268 .384	.338	.326
	10	.394	.402	.294 .350	.298 .380	.250 .178	.390	.320	
	11	.238	.194	.264 .116	.224 .182	.264 .198	.172	.284	
Burbecke (BurFi) R 34.39 H 56.68	14	.552	.211	.610 .185	.346 .341	.306 .424	.292 .460	.300	.320
	15	.568	.392	.656 .276	.364 .304	.294 .316	.264 .368	.298	.310
Stemel (SteFi) R 34.32,6 H 56.91,6	16	.280	.236	.364 .152	.212 .164	.238 .220	.236 .212	.280	.330
	17	.400	.320	.460 .280	.286 .272	.268 .288	.256 .328	.274	.295

Pro Parzelle wurden 1986 zwölf, 1988 drei Bäume beprobt.

Tab. 2: Cu-Frachten [ $\mu\text{g/g TS}$ ] von Fichtennadeln  
(aus: SCHRÖDER 1989)

Standort	Parzelle	Nadeljahrgänge (Nummerierung bezogen auf Probennahmejahr 1986 1988)							
		1988	1987	1986	1985	1984	1983	1982	1981
				1	2	3	4	5	6
		1	2	3	4	5	6		
Wilzenberg (WiFi) R 34.52,7 H 56.69	1	3.40	1.96	3.70 1.94	3.74 1.83	4.36 1.82	4.56 1.76		
		3.56	2.01	3.40 2.24	5.28 1.92	3.48 1.98	1.15	5.56	
	3	2.88	2.33	3.70 2.30	5.70 2.01	3.46 1.97	1.86	3.28	
	4	4.04	1.94	3.34 1.97	3.32 2.02	8.70 1.86	1.83	3.92	
	5	3.34	1.99	2.92 2.06	6.76 1.94	3.22 1.83	1.72	2.80	
Robecke (RoFi) R 34.51,7 H 56.70,9	9	3.26	2.09	4.82 1.86	2.48 2.03	2.28 1.88	2.80 2.05	2.88	8.30
	10	3.52	2.27	2.72 2.44	3.32 2.06	3.20 1.96	1.87	3.00	
	11	3.62	2.20	4.62 2.12	2.88 2.05	3.36 1.97	1.70	4.36	
Burbecke (BurFi) R 34.39 H 56.68	14	3.44	2.12	5.02 2.29	2.48 2.00	2.56 1.80	2.84 1.81	3.00	2.48
	15	3.74	2.07	9.90 2.22	10.50 2.13	63.20 1.94	74.80 2.57	165.00	62.10
Stemel (Stefi) R 34.32,6 H 56.91,6	16	2.01	3.50	19.80 2.99	9.60 2.18	14.60 2.16	11.60 2.43	8.72	5.30
	17	3.58	2.31	8.20 1.94	15.90 2.03	6.80 1.84	6.76 1.74	5.76	6.20

Pro Parzelle wurden 1986 zwölf, 1988 drei Bäume beprobt.

Tab. 3: Fe-Frachten [ $\mu\text{g/g TS}$ ] von Fichtennadeln  
(aus: SCHRÖDER 1989)

Standort	Parzelle	Nadeljahrgänge (Nummerierung bezogen auf Probennahmejahr 1986 1988)							
		1988	1987	1986	1985	1984	1983	1982	1981
				1	2	3	4	5	6
		1	2	3	4	5	6		
Wilzenberg (WiFi) R 34.52,7 H 56.69	1	43.3	81.1	107 91.4	105 101	142 105	115	208	
	2	39.3	98.0	58.8 110	78.2 106	95.2 104	71.5	138	
	3	39.1	93.6	102 105	79.2 107	98.4 109	118	142	
	4	37.6	91.1	65.2 96.0	109 107	119 104	124	129	
	5	47.2	103	65.8 107	94.4 104	102 102	116	167	
Robecke (RoFi) R 34.51,7 H 56.70,9	9	29.3	76.8	55.5 78.4	92.8 77.2	103 77.8	103 79.6	103	106
	10	36.0	105	76.0 110	94.8 119	99.2 117	113	110	
	11	43.4	115	78.2 147	88.8 130	99.6 132	127	111	
Burbecke (BurFi) R 34.39 H 56.68	14	33.4	75.0	63.2 100	94.4 114	98.6 121	108 136	114	134
	15	51.1	95.3	54.8 105	75.6 118	96.2 115	109 120	114	126
Stemel (Stefi) R 34.32,6 H 56.91,6	16	45.9	110	63.6 139	102 121	111 122	134 119	142	159
	17	52.5	114	62.4 122	107 149	126 139	135 133	139	165

Pro Parzelle wurden 1986 zwölf, 1988 drei Bäume beprobt.

Tab. 4: Mn-Frachten [ $\mu\text{g/g TS}$ ] von Fichtennadeln  
(aus: SCHRODER 1989)

Standort	Parzelle	Nadeljahrgänge (Numerierung bezogen auf Probennahmejahr 1986 1988)							
		1988	1987	1986	1985	1984	1983	1982	1981
				1	2	3	4	5	6
		1	2	3	4	5	6		
Wilzenberg (WiFi) R 34.52,7 H 56.69	1	229	651	474 456	562 415	622 444	414	669	
	2	165	502	495 268	542 251	493 262	138	454	
	3	185	421	461 259	502 263	472 264	249	472	
	4	171	530	504 354	549 317	501 303	266	508	
	5	213	567	574 355	686 313	631 275	247	552	
Robecke (RoFi) R 34.51,7 H 56.70,9	9	451	1535	632 1504	1438 1660	1444 1788	1678 1811	1894	1829
	10	510	1351	1388 1261	1707 1438	1599 1602	1588	1749	
	11	273	1015	1122 962	1370 1132	1455 1227	1071	1513	
Burbecke (BurFi) R 34.39 H 56.68	14	457	1008	552 951	1083 1156	1028 1074	1044 1035	1028	969
	15	505	1267	564 989	1252 1099	1288 1092	1105 1041		967
Stemel (SteFi) R 34.32,6 H 56.91,6	16	259	755	321 589	609 576	601 553	635 485	733	696
	17	263	819	319 784	638 817	614 813	659 881	620	649

Pro Parzelle wurden 1986 zwölf, 1988 drei Bäume beprobt.

Tab. 5: Pb-Frachten [ $\mu\text{g/g TS}$ ] von Fichtennadeln  
(aus: SCHRODER 1989)

Standort	Parzelle	Nadeljahrgänge (Numerierung bezogen auf Probennahmejahr 1986 1988)							
		1988	1987	1986	1985	1984	1983	1982	1981
				1	2	3	4	5	6
		1	2	3	4	5	6		
Wilzenberg (WiFi) R 34.52,7 H 56.69	1	.53	1.07	1.60 1.29	2.12 1.88	3.12 2.26	3.32	9.50	
		.44	1.25	1.18 1.66	2.22 1.90	2.94 2.09	1.13	4.40	
	3	.64	1.61	1.26 1.34	2.00 2.07	2.46 2.24	2.45	3.86	
	4	.37	1.13	1.08 1.34	1.96 1.93	2.78 1.71	2.10	3.90	
	5	.43	1.42	1.56 1.70	1.88 2.07	2.40 2.12	2.84	3.08	
Robecke (RoFi) R 34.51,7 H 56.70,9	9	.48	1.26	.50 1.47	1.32 1.75	3.56 1.95	2.70 2.16	3.06	3.26
	10	.49	1.32	1.18 1.76	1.96 2.14	2.08 2.44	2.54	3.43	
	11	.59	1.45	.74 2.15	2.02 2.44	2.48 2.60	2.80	4.44	
Burbecke (BurFi) R 34.39 H 56.68	14	.56	1.49	.59 1.88	1.06 2.46	1.72 2.90	2.48 3.94	3.00	3.48
	15	.68	1.60	.46 2.03	1.20 2.90	1.82 3.48	2.10 3.76	2.94	3.86
Stemel (SteFi) R 34.32,6 H 56.91,6	16	.66	1.78	1.02 2.46	1.66 2.82	2.64 3.28	2.66 3.24	3.66	4.78
	17	.74	1.82	1.10 2.40	1.68 3.32	1.88 3.66	3.40 4.20	3.94	4.77

Pro Parzelle wurden 1986 zwölf, 1988 drei Bäume beprobt.

Tab. 6: Zn-Frachten [ $\mu\text{g/g TS}$ ] von Fichtennadeln  
(aus: SCHRÖDER 1989)

Standort	Parzelle	Nadeljahrgänge (Nummerierung bezogen auf Probenahmejahr 1986 1988)							
		1988	1987	1986	1985	1984	1983	1982	1981
				1	2	3	4	5	6
Wilzenberg (WiFi) R 34.52,7 H 56.69	1	33.3	27.9	35.9 19.2	38.4 23.9	27.4 27.2	25.8	34.6	
		43.8	25.2	26.4 24.9	25.0 19.7	23.8 19.4	14.1	31.4	
	3	37.9	23.8	25.4 21.7	23.8 20.8	25.8 21.7	20.1	29.2	
	4	35.5	23.9	24.5 17.7	23.2 19.6	22.8 18.9	19.6	27.4	
	5	40.4	22.9	23.0 18.3	24.6 17.6	21.6 25.3	17.1	24.0	
Robecke (RoFi) R 34.51,7 H 56.70,9	9	42.3	48.2	38.3 32.1	27.4 34.7	32.1 32.9	27.0 34.9	35.2	32.2
	10	40.6	45.2	33.6 36.3	31.8 38.5	27.8 39.6	34.1	39.8	
	11	36.0	33.7	33.2 32.1	38.0 34.7	39.0 40.7	36.1	47.1	
Burbecke (BurFi) R 34.39 H 56.68	14	42.5	40.2	41.5 30.7	36.8 40.1	30.6 42.9	26.6 42.3	29.8	34.5
	15	60.8	50.4	44.8 29.9	35.2 34.6	32.2 39.7	30.0 37.8	30.9	32.9
Stemel (SteFi) R 34.32,6 H 56.91,6	16	47.7	47.0	39.8 32.9	25.2 37.8	24.8 38.8	29.4 35.4	36.1	43.3
	17	49.7	58.6	41.6 45.4	30.2 45.4	29.8 46.5	28.8 49.7	35.6	39.5

Pro Parzelle wurden 1986 zwölf, 1988 drei Bäume beprobt.

Tab. 7: Element-Frachten [ $\mu\text{g/g TS}$ ] von Buchenblättern  
aus vier Kronenbereichen (aus: SCHRÖDER 1989)

Element	Proben- nahmejahr	Standorte Rechts-/Hochwert Parzellen							
		Wilzenberg 34.53,7 / 56.70,9			Burbecke 34.38,8 / 56.67,8		Stemel 34.31,8 / 56.91,2		
		6	7	8	12	13	18	19	
Cd	1986	.229	.169	.362	.292	.342	.244	.316	
	1988	.336	.270	.242	.268	.300	.262	? .604?	
Cu	1986	7.18	6.86	7.99	8.10	6.56	6.16	6.68	
	1988	6.84	7.00	7.04	6.64	6.68	7.30	6.64	
Fe	1986	157	111	131	174	138	129	138	
	1988	98.7	87.1	91.6	98.4	111	114	109	
Mn	1986	1025	927	836	1047	894	1535	1515	
	1988	1329	967	709	905	1116	1273	1353	
Pb	1986	4.10	2.96	3.68	6.68	4.18	2.92	4.04	
	1988	1.91	1.45	1.29	1.88	2.00	1.94	1.84	
Zn	1986	41.1	31.6	36.8	48.4	24.5	32.8	31.2	
	1988	53.6	38.9	32.7	45.3	49.5	35.0	37.5	

Pro Parzelle wurden 1986 zwölf, 1988 drei Bäume beprobt.



Tab. 8: Element-Frachten [ $\mu\text{g/g TS}$ ] von Kiefernadeln (Haltern)  
(aus: SCHRÖDER 1989)

Element	Proben- nahmejahr	Parzellen Rechts-/Hochwert Nadeljahrgänge					
		20 25.82,2 / 57.39,5			21		
		1	2	3	1	2	3
Cd	1986	.560	.576	.600	.478	.460	.392
	1988	.884	.732	.448	.580	.416	.316
Cu	1986	10.40	8.18	19.20	4.36	7.84	4.08
	1988	4.98	3.54	3.2	5.20	3.86	3.48
Fe	1986	47.2	247	335	44.2	283	278
	1988	55.7	249	336	71.8	297	329
Mn	1986	118	225	281	117	207	256
	1988	144	250	213	185	286	283
Pb	1986	1.06	5.40	7.00	1.50	13.30	11.90
	1988	1.38	8.00	10.70	1.64	10.40	10.50
Zn	1986	41.8	38.6	41.0	36.4	36.5	37.0
	1988	46.7	47.9	44.9	51.2	58.0	50.2

Pro Parzelle wurden 1986 zwölf, 1988 drei Bäume beprobt.

Anschriften der Verfasser:

Schröder, Winfried, Dr. rer. nat., M.A.,  
Geographisches Institut  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,  
Ludewig-Meyn-Straße 14,  
24118 Kiel 1

Fränze, Otto, Dr. rer. nat.,  
ordentlicher Universitätsprofessor,  
Geographisches Institut  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,  
Ludewig-Meyn-Straße 14,  
24118 Kiel 1