

Eintragungspfade von Luftverunreinigungen in schleswig-holsteinische Wälder

Von KIRSTEN JENSEN-HUB & FELIX MÜLLER

Gliederung

1. Problemstellung
2. Material und Methoden
3. Freilandeinträge
4. Einträge in die Bestände
 - 4.1 Prozesse im Kronenraum
 - 4.2 Kronentraufe
 - 4.2.1 Stoffkonzentrationen in der Kronentraufe
 - 4.2.2 Stoffeinträge über die Kronentraufe
 - 4.3 Stammabfluß
 - 4.3.1 Stoffkonzentrationen im Stammabfluß
 - 4.3.2 Stoffeinträge in den Stammraum
 - 4.4 Streufall
5. Diskussion
6. Literatur

1. Problemstellung

Nach dem lufthygienischen Meßbericht für das Jahr 1987 (MINISTERIUM FÜR NATUR UND UMWELT 1988) zählt Schleswig-Holstein zu den wenig mit Luftschadstoffen belasteten Gebieten in der Bundesrepublik. Die geringen Schadstoffkonzentrationen übersteigen nur in Ausnahmefällen die Immissionsgrenzwerte der Technischen Anleitung (TA) Luft. Auch die landesweit aus Freilandniederschlägen ermittelten Depositionsraten (LANDESAMT FÜR WASSERHAUSHALT UND KÜSTEN (1988) bestätigen diesen Trend.

Scheinbar im Widerspruch dazu stehen die Ergebnisse der jährlich durchgeführten Waldschadensinventuren, nach denen 1988 48 % der Waldfläche in Schleswig-Holstein geschädigt waren, wofür trotz der o.a. geringen Konzentrationen als Hauptverursacher Luftverunreinigungen verantwortlich gemacht werden (MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, ERNÄHRUNG, FORSTEN UND FISCHEREI 1988). Da monokausale Erklärungsversuche die Ursachen der Waldschäden offensichtlich nicht hinreichend aufdecken können (FRÄNZLE, SCHRÖDER & VETTER 1985), wird zunehmend deutlich, daß

diese als Folgen unterschiedlicher, komplex miteinander vernetzter ökologischer Regelsysteme anzusehen sind. Bei einer umfassenden Beurteilung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen muß daher eine große Zahl interner und externer biologischer und pedologischer Wirkungsgefüge mitberücksichtigt werden. In diesem Rahmen trägt der Eintrag an säurebildenden und anderen Luftschadstoffen sowohl direkt als auch indirekt unstrittbar zu einer nachhaltigen Störung der Ökosysteme bei.

So können schon geringe Belastungen chronisch oder kurzzeitige Spitzenbelastungen umgehend schädigend wirken, wenn die Standorte durch andere Faktoren (z.B. degradierte Böden oder Schädlingsbefall) vorbelastet sind. Synergistische Effekte können darüberhinaus die Toxizitätsschwellen in manchen Fällen erheblich herabsetzen.

Ferner liefern die häufig verwendeten Daten aus Freilandstationen, die außerhalb der betroffenen Forsten liegen, nur geringe Anhaltspunkte über die tatsächliche atmogene Belastung der Wälder, denn die auf das Kronendach gelangenden Stoffe unterliegen während ihrer Passage durch die Vegetationsschichten einer Vielzahl von Prozessen, die in Abhängigkeit von Bestandesart und -aufbau sehr differenzierte Eintragsmuster entstehen lassen. Der RAT DER SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN stellte 1983 fest, daß selbst Wälder in den sogenannten Reinluftgebieten aufgrund der mikroklimatischen Bedingungen im Kronenraum, die den Beständen besondere Filtereigenschaften verleihen, zu Belastungsgebieten werden können. Die Waldschadensinventuren geben Anlaß zur Sorge, daß dies für viele schleswig-holsteinische Wälder bereits zutrifft.

In bezug auf Ursachenforschung und Gefährdungsabschätzung ist es daher besonders wichtig, Aufschluß über die Eintragspfade und die Flüsse der Luftinhaltsstoffe durch Waldökosysteme zu erlangen. Diesen Fragen wurde im Rahmen eines vom Umweltbundesamt geförderten Forschungsprojektes (FRÄNZLE et al. 1987) nachgegangen. Im folgenden werden einige Ergebnisse aus diesem Vorhaben zur Passage von Nähr- und Schadstoffen durch die Kronenräume verschiedener Bestände vorgestellt.

2. Material und Methoden

Die Eintragsmessungen wurden in vier unterschiedlichen Vergleichsforsten auf dem Gebiet des Gutes Rastorf (ca. 15 km süd-östlich von Kiel) durchgeführt, wobei die Verhältnisse in einem Eichenwald besonders intensiv bearbeitet werden konnten. Die forstlichen Bestandescharakteristika gehen aus der Tabelle 1 hervor. Die Untersuchung umfaßte die Messung und Analyse des Freiland- und des Bestandesniederschlages, des Stammabflusses und des Streufalles. Die Probenahme der Niederschläge erfolgte mittels offener Sammler und PE-Trichter, die durch engmaschige Netze vor groben Verunreinigungen geschützt wurden. Der Stammabfluß wurde an 12 Bäumen im Eichenwald mit Hilfe von Manschetten aus PU-Schaum über Silikonschläuche in PE-Auffangballons geleitet. Alle Niederschlagsproben wurden zunächst täglich, ab Oktober 1985 wöchentlich genommen, in PE-Flaschen ins Labor transportiert und dort bis zur Analyse tiefgefroren. Die Laubstreu wurde monatlich mit speziellen Streufängern (Aufnahmefläche 1 m · 1 m) gesammelt.

Tab. 1: Standortcharakteristika der untersuchten Waldbestände

Standort	Dominante Baumarten	Alter	Höhe	Dichte	% Interzeption
EICHE	Quercus robur	94 a	25–30 m	470/ha	Sommer: 36,2
	(Larix decidua)	90 a	25–30 m		Winter: 18,4
	(Fagus sylvatica)	30 a	< 10 m		
BUCHE	Fagus sylvatica	62 a	30 m	425/ha	Sommer: 31,1
	(Quercus robur)	110 a	30 m		Winter: 22,5
LÄRCH	Larix decidua	62 a	20 m	500/ha	Sommer: 46,6
	(Acer campestre)	100 a	25–30 m		Winter: 25,3
FICHTE	Picea abies	62 a	20 m	650/ha	Sommer: 34,6 Winter: 31,2

Als Indikatoren zur Bewertung der Depositionssituation wurden neben den Hauptsäurebildern Schwefel und Stickstoff auch die Schwermetalle Blei, Cadmium und Kupfer sowie der pH-Wert gemessen. Ab 1985 wurden auch die Nährstoffe Kalium, Calcium, Natrium und Magnesium in das Programm einbezogen. Die Analytik der Schwermetalle erfolgte mit Graphit-AAS, die Nährstoffe wurden photometrisch bzw. mit einem Flammen-AAS bestimmt. Die genauen Aufschluß- und Analysenmethoden werden bei FRÄNZLE et al (1987) und JENSEN (1985) beschrieben.

3. Freilandeinträge

– pH-Werte und Wasserstoffionen-Eintrag

Die Abbildung 1 weist auf den relativ niedrigen Wasserstoffioneneintrag auf den Rastorfer Freilandstandort hin, der durchaus auf dem Niveau anderer ländli-

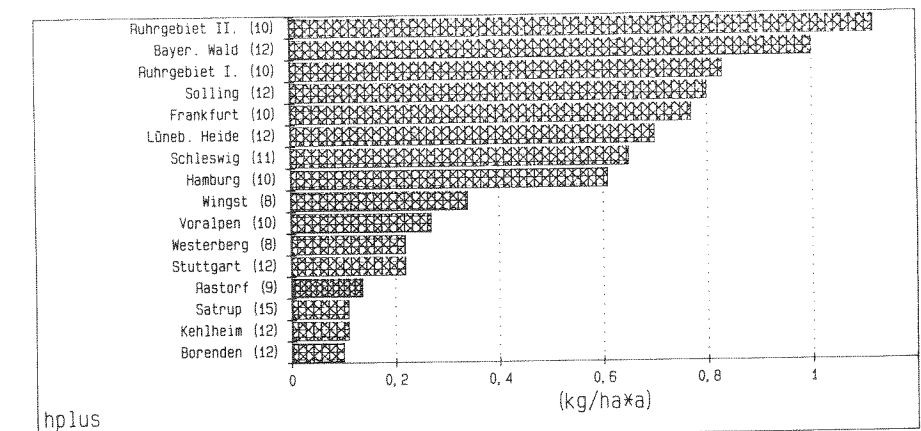


Abb.1: Vergleich von Literatur- und Meßdaten zum Wasserstoffioneneintrag im Freiland (Zahlen in Klammern weisen auf Literaturstellen hin)

cher, peripher gelegener Regionen liegt. Die hohen pH-Werte des Freilandniederschlages dürften aus der Neutralisation der Säurebildner durch marine Aerosole resultieren, aber auch als Folge von Kalkungs- und Bodenbearbeitungsmaßnahmen auf den umliegenden Feldern sowie als Auswehungen von basisch reagierenden Bodenstäuben eines nahe gelegenen Wirtschaftsweges eintreten.

– Nitrat- und Sulfateinträge

Der Eintrag von Stickstoff in Form von Nitrat beläuft sich jährlich auf 26,6 kg/ha. Unter Einbeziehung der Stickstoff-Deposition in Form von Ammonium und organisch gebundenem Stickstoff ergibt sich für Rastorf ein mittleres Depositionsniveau. Verbrennungsprozesse in Haushalt, Verkehr und Industrie stellen hierfür die Hauptquellen dar. Als lokale Ursachen sind vor allem landwirtschaftlich bedingte Emissionen des benachbarten Gutsbetriebes anzuführen.

Der jährliche Sulfateintrag zeichnet sich mit 80.5 kg/ha (= 27 kg S) im Vergleich zu anderen Regionen ähnlicher Belastungskategorie durch leicht überdurchschnittliche Werte aus. Ein deutliches SO₄-Maximum während der Wintermonate unterstreicht den Einfluß der Heizperiode auf den Eintrag dieser Schwefelverbindung. Daneben dürften auch marine Quellen einen Einfluß haben. Ein Blick auf die durch das LANDESAMT FÜR WASSERHAUSHALT UND KÜSTEN (1988) ermittelten Schwefel- und Stickstoff- Einträge ergibt eine relativ gute Übereinstimmung (vgl. Tabelle 2).

Tab. 2: Vergleich der Freilandeinträge verschiedener Substanzen in Rastorf mit dem Landesmittel (kg/ha · a) (abgeleitet aus: LANDESAMT FÜR WASSERHAUSHALT UND KÜSTEN 1988)

Substanz/Element	Landesmittel	Rastorf
Sulfat	64,3	80,5
Nitrat	27,5	26,6
Natrium	20,0	8,7
Magnesium	2,1	2,7
Calcium	6,9	7,5
Kalium	4,1	3,4

– Schwermetalleinträge

Sehr geringe Einträge sind bei den Schwermetallen Cadmium (Cd: 3,6 g/ha · a), Blei (Pb: 26,4 g/ha · a) und Kupfer (Cu: 40,2 g/ha · a) zu verzeichnen, so daß sich der Rastorfer Raum gut in die Kategorie unbelasteter ländlicher Gebiete einordnen läßt (vgl. Abb. 2). Das niedrige Eintragsniveau resultiert aus dem Fehlen größerer Schwermetalle emittierender Quellen in der unmittelbaren Umgebung. Das winterliche Eintragsmaximum legt allerdings den Schluß nahe, daß sich die Heizperiode meßbar in den Raten niederschlägt. Der sommerliche

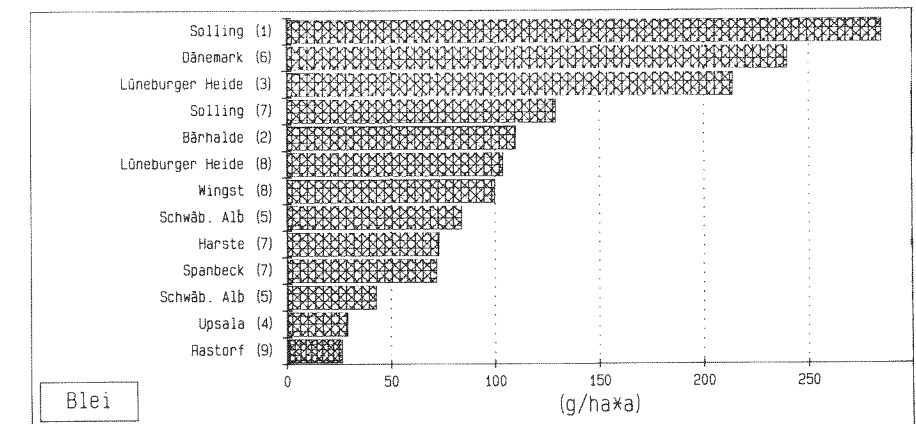
Höhepunkt der Cd- Einträge läßt dagegen auf biogene und landwirtschaftlich bedingte Quellen (z.B. Phosphat-Düngung) schließen.

– Natrium, Magnesium, Calcium und Kalium

Hinsichtlich der kationischen Nährstoffe lassen sich, verglichen mit weiter im Binnenland gelegenen Stationen (FÜHRER et al 1988) beim Natrium (Na: 8,72 kg/ha · a) und beim Magnesium (Mg: 2,72 kg/ha · a) überdurchschnittlich hohe Beträge feststellen (vgl. Tab. 2). Dies deutet darauf hin, daß erhebliche Anteile des Deponats marinen Ursprungs sind. Diese Annahme wird durch das winterliche Konzentrations- und Depositionsmaximum als Folge des häufigeren Auftretens herbstlicher und winterlicher Stürme untermauert. Demgegenüber weisen Calcium (Ca) und Kalium (K) mit 7,65 kg/ha · a und 3,43 kg/ha · a geringere Depositionsraten als die binnenländischen Vergleichsstandorte auf. Als Kalium- und Calcium- Quellen kommen in erster Linie Boden- und Düngerstäube in Betracht. ULRICH et al (1979) fanden Ca und Mg häufig im gleichen Aerosol wie Sulfat, woraus zu schließen ist, daß diese Ionen als Reaktionsprodukte der Neutralisation der aus SO₂ gebildeten schwefligen Säure und Schwefelsäure mit den Boden- und Kalkstäuben anzusehen sind.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß das Untersuchungsgebiet als ein gering bis durchschnittlich mit Luftverunreinigungen belasteter Raum anzusprechen ist. Als Ursachen können genannt werden:

- ländliche, vor allem agrarisch geprägte Umgebung (häufig stehen die Einträge direkt mit landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen im Zusammenhang)
- keine unmittelbare Beeinflussung durch den Kfz-Verkehr
- Fehlen von Industrie- und Ballungszentren in der Nähe
- kein direkt meßbarer Einfluß aus dem Kieler Stadtgebiet.



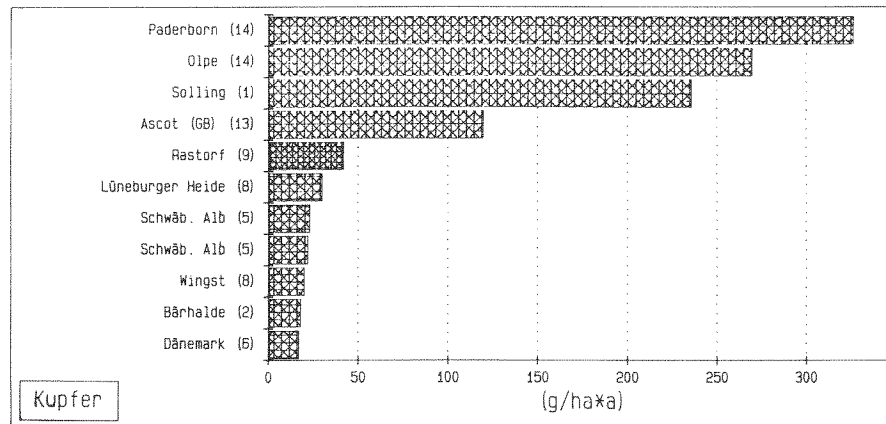
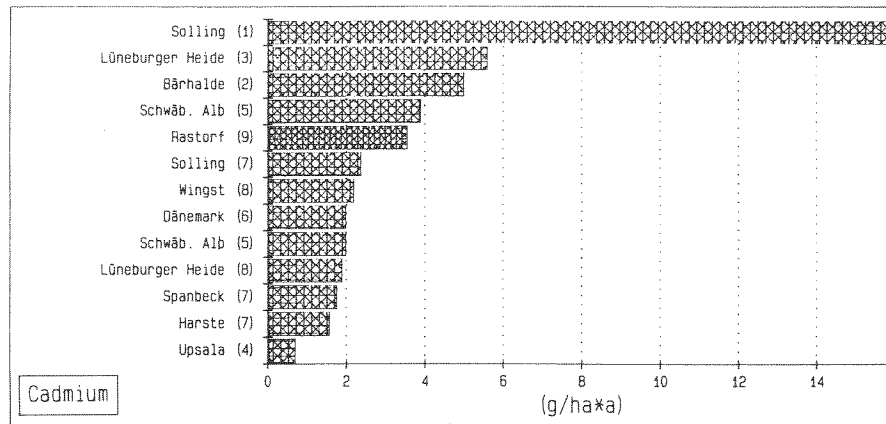


Abb. 2: Vergleich von Literatur- und Meßdaten zum Schwermetalleintrag im Freiland (Zahlen in Klammern weisen auf Literaturstellen hin)

4. Einträge in die Bestände

4.1 Prozesse im Kronenraum

Eingangs wurde bereits erwähnt, daß die Niederschläge auf ihrem Weg durch den Kronenraum einer Vielzahl von Prozessen unterliegen, wobei die Vegetationsbedeckung maßgeblich die effektiv in den Boden gelangenden Stoffraten bestimmt. Die Abbildung 3 zeigt eine Übersicht der wichtigsten Mechanismen.

Die auf das Kronendach gelangende nasse bzw. feuchte Deposition (Niederschläge, Nebel) und die in Form von Aerosolen und Stäuben als trockene Deposition eingetragenen Substanzen werden entweder in den Vegetationsschichten abgelagert (Interzeption), durch diese assimiliert oder sie gelangen als Kronentraufe, Stammabfluß bzw. mit der Laubstreu direkt auf den Bestandesboden. Die Befruchtung dieser Pfade wird hauptsächlich durch folgende Prozesse gesteuert:

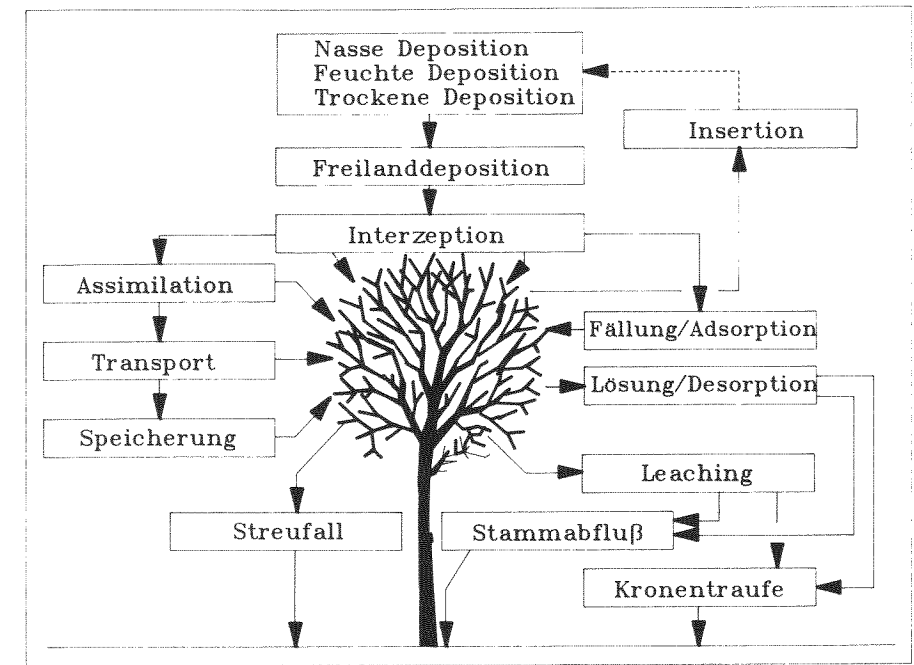


Abb. 3: Wichtige Prozesse bei der Stoffpassage des Kronenraums

Durch Fällungs-, Adsorptions- und Assimilationsmechanismen werden die Stoffkonzentrationen während der Kronenraumpassage vermindert. Die auf diese Weise biogen gebundenen Elemente gelangen entweder über Streufall oder über die internen Kreisläufe (Wurzelefflux) in den Boden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, daß durch Änderung der Randbedingungen (z.B. Absinken der pH-Werte im Benetzungswasser) bereits auf oder in den Sproßorganen gespeicherte Substanzen remobilisiert werden und durch Leaching (Blattauswaschung) sowie Desorptions- und Lösungsprozesse zu einer Anreicherung der Stoffbefruchtung beitragen.

Die nasse Deposition stellt in ländlichen Regionen bei den meisten Elementen den effektivsten Eintragsmechanismus dar. Hierbei sind geringe Niederschlagsmengen als Folgen der Abspülungs- und Auswaschungsmechanismen, die zu Niederschlagsbeginn und nach längeren Trockenperioden am intensivsten ausfallen, häufig mit hohen Stoffkonzentrationen verknüpft. Länger andauernde Niederschläge zeichnen sich in Übereinstimmung mit GEORGII (1965) und NÜRNBERG et al (1983a) zwar durch höhere Anfangskonzentrationen aus; im weiteren Verlauf überwiegen dann jedoch Verdünnungseffekte.

Neben der Niederschlagsmenge hat auch die Niederschlagsform Einfluß auf die Stoffkonzentration. So weisen Pb, Cu sowie SO₄ im Schneedeponat erhöhte Konzentrationen auf. Auch Reif, Tau und Nebel bewirken überdurchschnittliche Stoffgehalte. Da die Gefährdung der Organismen u.a. von den z.T. extrem

hohen Konzentrationen im Benetzungswasser auf den pflanzlichen Oberflächen ausgeht, können infolge dieser Niederschlagsformen bei tiefen pH-Werten hochkonzentrierte Schadstofflösungen direkte Schädigungen auf und in den Blättern hervorrufen (FREVERT & KLEMM 1984).

Je nachdem, in welcher Weise die einzelnen Substanzen durch die oben geschilderten Ab- bzw. Anreicherungsprozesse betroffen werden, fungiert der Kronenraum als Quelle (negative Kronenraumbilanz) oder als Senke (positive Kronenraumbilanz) für die eingetragenen Umweltchemikalien. Die Effizienz dieser Mechanismen wird maßgeblich durch das Löslichkeitsverhalten der Substanzen bestimmt, das wiederum vom pH-Wert im Benetzungswasser auf den Sproßorganen gesteuert wird.

Zusammenfassend können demnach als wichtige Ursachen für die Stoffanreicherungen in den Rastorfer Beständen folgende Prozesse angeführt werden:

- (1) Ausfilterung vornehmlich der trockenen Deposition, anschließende Lösung und Abspülung
- (2) Lösung und Desorption ungelöster Stoffe (ohne besondere Bedeutung der trockenen Deposition) anschließende Anreicherung
- (3) Leachingprozesse

4.2 Kronentraufe

Zur Beurteilung und Identifizierung der genannten Prozesse können die Konzentrationswerte der Referenzsubstanzen genutzt werden. Die Einträge, die durch Multiplikation von Konzentration und Niederschlagsmenge errechnet werden, sind gagegen wichtig für die Ermittlung der Depositionssituation und ihrer Konsequenzen für den Stoffhaushalt der untersuchten Ökosysteme.

4.2.1 Stoffkonzentrationen in der Kronentraufe

Die in den folgenden Abbildungen dokumentierten Stoffkonzentrationen in der Kronentraufe zeigen, daß die meisten Substanzen bei der Passage des Kronendaches konzentriert werden. Dies gilt für Sulfat, Nitrat, Calcium, Magnesium und Natrium ganzjährig, für Cadmium im Winter und für Kupfer während des Sommerhalbjahres. Blei erfährt als einziges Element ganzjährig eine Abreicherung in der Kronentraufe (vgl. Abb. 4).

Die Konzentrationszunahme hat bei den einzelnen Elementen unterschiedliche Ursachen: Lösung und Abspülung dürften beim Sulfat und Nitrat die Hauptbegründung liefern. Vor allem die trockene Deposition wird mit großer Effizienz durch das Blätterdach ausgefiltert. Das besondere Kronenraumklima und die hohe Oberflächenrauigkeit der Bestände bewirken eine verstärkte Sedimentation, und die feuchten pflanzlichen Oberflächen erhöhen das Sorptionsvermögen für Luftverunreinigungen. Nachfolgende Lösungs- und Abspülungsvorgänge vergrößern daraufhin die Stofffracht der Bestandesniederlage.

Dieser Mechanismus ist auch im Rahmen der winterlichen Cadmium-Konzentrierung wirksam. So wurde festgestellt, daß der Anteil der trockenen Deposi-

tion in Freiland 7.5 mal höher ist als unterhalb der Kronenschicht. Somit werden die zunächst trocken deponierten und dann im relativ sauren Benetzungswasser gelösten Cd-Komponenten entweder assimiliert oder abgespült. Da der Konzentrationsmindernde Effekt der Assimilation im Winter weitgehend entfällt, lösen die Abspülungseffekte die auf den Zeitraum von November bis April beschränkte Anreicherung aus.

Die Kupfer-Konzentrierung ist besonders im Sommer ausgeprägt. Da Cu als Spurenelement an den biogenen Umsätzen teilnimmt, ist davon auszugehen, daß neben Lösungs- und Abwaschungsprozessen auch Leachingmechanismen zu der sommerlichen Konzentrierung der Kronentraufe beitragen.

Die Blei-Anreicherung im Sommer stellt eine Folge der erhöhten Filterkapazität der sommergrünen Arten dar. Da Pb nur in geringem Umfang durch die Pflanzen aufgenommen und dann vor allem in den Wurzeln festgelegt wird, sind Anreicherungen durch Leaching auszuschließen, so daß als Ursache für die Konzentrierung nur die Abspülung des vorher auf den Blättern deponierten Bleis angeführt werden kann.

Die Kombination aus Leaching- und Abspülungseffekten führt bei den kationischen Nährstoffen zu einer ganzjährigen Anreicherung in der Kronen-

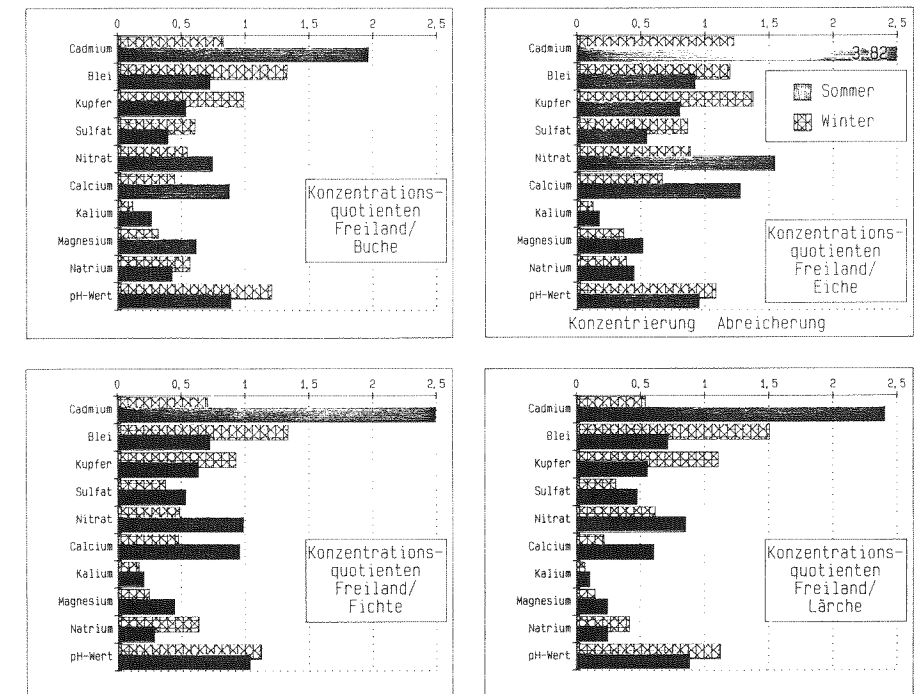


Abb. 4: Verhältnisse zwischen Freilanddeposition und Kronentraufe bei einigen Referenzsubstanzen auf der Basis halbjährlicher Konzentrationsmittelwerte

traufe. Beim Kalium ist ein deutliches Sommermaximum erkennbar, während Calcium, Natrium und Magnesium durch höhere Winterkonzentrationen gekennzeichnet sind. Neben Leachingeffekten sind auch Pufferreaktionen bei dieser Elementgruppe bedeutsam. Dabei werden nach ULRICH et al. (1979) Wasserstoffionen aus dem Niederschlag von den Blättern im Austausch gegen Nährstoffkationen aufgenommen. Im Winter gewinnen Lösungs- und Desorptionsmechanismen vor dem Hintergrund der zu dieser Jahreszeit tieferen pH-Werte an Bedeutung.

Eine deutliche Abreicherung der Kronentraufe ist beim Blei im Winter und beim Cadmium im Sommer zu erkennen. Als Ursache für den ersten Fall kommt nur eine Festlegung auf den oberirdischen Sproßorganen in Betracht. Diese Tatsache ist insofern verwunderlich, als daß trotz der tieferen pH-Werte im Niederschlag keine verstärkte Pb-Mobilisierung erfolgt ist.

Eindeutiger ist die Cadmium-Abreicherung während des Sommers zu erklären. Bedingt durch die hohe Cd-Mobilität ist eine dauerhafte Festlegung auf den Blättern kaum denkbar. Vor dem Hintergrund sehr tiefer pH-Werte, die sich im Benetzungswasser einstellen, scheint eine Assimilation des vorher in Lösung gegangenen Cd durch die Blätter wahrscheinlicher. Über eine solche Cd-Aufnahme durch die Pflanze berichten auch MAYER (1983b) und OMROD (1984).

Die pH-Werte liegen im Winter deutlich unter dem Freilandniveau. Im Sommer dagegen übersteigt der pH-Wert in den Bestandesniederschlägen aufgrund der o.a. Pufferreaktionen den Freilandwert.

4.2.2 Stoffeinträge über die Kronentraufe

Die um den Betrag der Interzeption geminderte Kronentraufe betrug für den Hauptzeitraum der Untersuchungen (Mai 1983 – Dezember 1984) im Eichenbestand 72.7 % des Freilandniederschlages, im Buchenbestand wurden 73.2 %, im Lärchenstandort 64.1 % und auf der Fichtenfläche 67.1 % der Freilandniederschlagsmenge gemessen. Hieraus ergeben sich auf der Basis von täglich erhobenen Werten für die Referenzsubstanzen die folgenden Eintragungsmengen:

Tab. 3: Einträge der Referenzsubstanzen mit der Kronentraufe (Freilandeintrag in kg/ha · a bzw. g/ha · a bei Cd, Pb, Cu und H+, Bestandeseinträge als % Freilandeintrag)

a. Jahressumme

Bestand	Cd	Pb	Cu	SO ₄	NO ₃	H+	Ca	K	Mg	Na
Eintrag Freiland	3,56	26,4	42	80,5	26,6	138	7,54	3,43	2,72	8,72
Eiche	39	61	74	97	61	50	162	396	200	255
Buche	65	61	114	72	39	88	181	401	181	218
Lärche	44	52	80	126	51	52	446	903	417	360
Fichte	42	61	95	96	72	60	238	496	247	276

b. Sommerhalbjahr (Mai – Oktober)

Bestand	Cd	Pb	Cu	SO ₄	NO ₃	H+	Ca	K	Mg	Na
Eintrag Freiland	2,29	15,3	23	41,9	16,2	80,3	5,15	1,7	1,3	2,78
Eiche	28	65	96	82	41	13	111	245	159	155
Buche	58	44	100	75	41	5	104	372	142	158
Lärche	17	34	81	60	43	10	198	730	298	297
Fichte	26	50	97	73	78	40	126	525	202	261

c. Winterhalbjahr (November – April)

Bestand	Cd	Pb	Cu	SO ₄	NO ₃	H+	Ca	K	Mg	Na
Eintrag Freiland	1,27	11,1	19	38,6	10,3	57,2	2,4	1,73	1,42	5,94
Eiche	60	55	49	114	92	102	270	545	239	302
Buche	80	84	130	68	36	205	346	429	216	247
Lärche	94	77	80	197	64	111	980	1075	526	389
Fichte	72	74	94	121	70	87	478	468	290	283

Bei den Schwermetallen errechnete sich aus diesen Daten eine positive Kronenraumbilanz, d.h. daß ein erheblicher Anteil des Schwermetalleintrages im Kronenraum verbleibt und über Stammabfluß, Streufall oder interne Flüsse den Bestandesboden erreicht. Im Falle des Cu sind die Interzeptionsverluste relativ gering; im Buchenbestand ist sogar ein Gewinn zu verzeichnen, der aus zusätzlichen Leachingprozessen resultiert.

Die Anionen weisen eine negative Kronenbilanz auf, wobei die Interzeptionsverluste im Sommer höher als während des Winterhalbjahres ausfallen. Die winterlichen Sulfatwerte übersteigen die Freilandeinträge insbesondere in den Nadelbeständen.

Jahreszeitliche Unterschiede sind auch in bezug auf die H⁺-Deposition zu beobachten. Während der Wasserstoffioneneintrag in die Bestände im Sommer aufgrund der Pufferreaktionen weit unter das Freilandniveau sinkt, werden während der Wintermonate im Buchen- und Lärchenbestand höhere Einträge erreicht, die auf den verstärkten Eintrag von Säurebildnern durch Auskämmeffekte zurückzuführen sind.

Hinsichtlich der kationischen Nährstoffgruppe ergibt sich ein einheitliches Bild. Die starke Konzentrierung im Bestandesniederschlag führt besonders bei

den Gymnospermen zu weit über den Freilandeinträgen liegenden Depositionen.

4.3 Stammabfluß

Der Stammanfluß stellt bei glattrindigen Laubbäumen aufgrund der häufig feststellbaren Anreicherung vieler Niederschlagsinhaltsstoffe einen sehr effektiven Eintragspfad in den Waldboden dar. Bei der Buche können aufgrund der Wuchsform und der Beschaffenheit der Rinde bis zu 20 % des Freilandniederschlages am Stamm ablaufen. Die Eiche dagegen zeigt ihrer rauhen Borke und der zahlreichen Wasserreiser wegen wesentlich geringere Stammabflußmengen; sie betragen in Rastorf nur 1,6 % des Freilandniederschlages. Da ein Großteil des über den Stammabfluß angelieferten Niederschlagswassers direkt im Stammfußbereich versickert, ergeben sich hier z.T. 8- bis 12-fach höhere Wassermengen, die den Stammraum im Vergleich zum übrigen Bestandesboden erreichen. Menge und Stoffbefrachtung des Stammabflusses sind im wesentlichen abhängig von folgenden Parametern (JOCHHEIM 1985):

- Baumart (Wuchsform, Borke, Blattbeschaffenheit, Benetzungskapazität, Phänologie)
- Standort (Einzelbaum, Waldrand, Waldinneres)
- Niederschlagsparameter (Art, Intensität, Dauer)
- Windrichtung und Windstärke
- PC-Eigenschaften der Substanzen

4.3.1 Stoffkonzentrationen im Stammabfluß

Abgesehen vom Blei zeigen alle untersuchten Stoffe eine starke Konzentrierung im Stammablauf, die in der Regel ein Wintermaximum aufweist und neben den stärkeren winterlichen Emissionen auf die größeren Stammabflußmengen und die tieferen pH-Werte, die die Lösung von in der Rinde fixierten Elementen bewirken können, zurückzuführen ist.

Jahreszeitlich bedingte Unterschiede ergeben sich hauptsächlich im Zusammenhang mit den o.a. im Bereich des Kronendaches ablaufenden Prozessen. Diese Vorgänge verlaufen am Stamm nicht nur wesentlich intensiver ab als im Kronenraum; vielmehr addieren sich die Effekte, da das Stammabflußwasser den geschilderten Mechanismen bereits in den Kronen unterliegt. Die Zusammensetzung des Stammabflusses dürfte in starkem Maße durch die raue Eichenborke beeinflusst werden, die, bedingt durch ihre große Oberfläche, beträchtliche Stoffmengen zu binden vermag. Häufig konnten daher nach längeren Trockenperioden, bei geringen Niederschlagsmengen und im Verlauf von Nebelphasen Konzentrationsspitzen festgestellt werden.

Die hohen Sulfatwerte im Stammabfluß, die in der Abbildung 5 durch geringe Abreicherungsquotienten gekennzeichnet werden, sind sowohl auf die bereits erörterten Filtermechanismen als auch darauf zurückzuführen, daß SO_2 durch die feuchte raue Eichenborke sorbiert und nachfolgend zu Sulfat oxidiert wird. Durch diese Reaktionen können zugleich die erhöhten Wasserstoffionen-Konzentrationen erklärt werden. Die Nitratkonzentration verdoppelt sich im Stammabfluß vor allem durch Abspülvorgänge im Kronenraum.

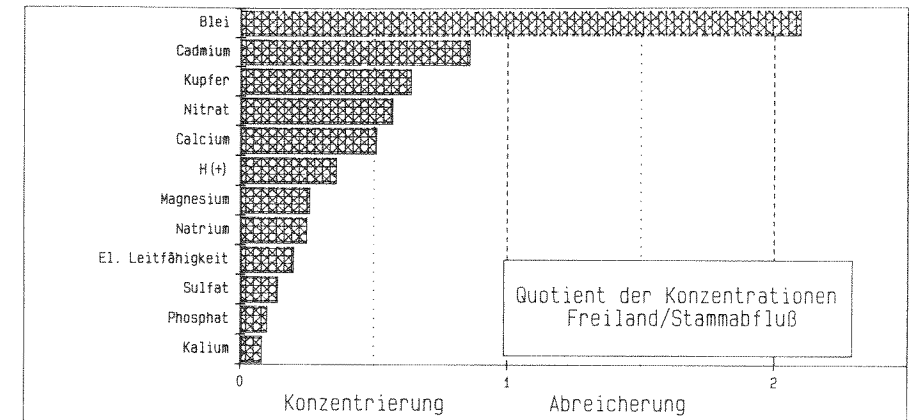


Abb. 5: Verhältnis zwischen den Stoffkonzentrationen im Freilandniederschlag und Stammabflußwasser des Standortes „Eiche“ in Rastorf

Die kationischen Nährstoffe werden im Winter emissionsbedingt stärker angereichert als im Sommer. Außerdem ist angesichts tieferer winterlicher pH-Werte zu vermuten, daß diese Elemente in stärkerem Maße aus den pflanzlichen Oberflächen gelöst und abgewaschen werden. Die stärkere Konzentration der einwertigen Kationen Natrium und Kalium gegenüber den zweiwertigen Elementen Calcium und Magnesium kann als ein Hinweis auf die leichtere Mobilisierbarkeit der einwertigen Substanzen interpretiert werden. Im Sommer sind vor allem beim K Leachingprozesse von Bedeutung, bei Ca und Mg bewirken die bereits erläuterten Pufferreaktionen eine Elementanreicherung im Stammabfluß.

In bezug auf die Schwermetalle fällt auf, daß die Stammabflußkonzentrationen beim Pb ganzjährig und bei Cu im Winter niedriger ausfallen als im Freiland. Im Vergleich zur Kronentraufe sind die Cu-Werte um das Doppelte erhöht, während das Pb ganzjährig durch die Rinde festgelegt wird. Der jahreszeitliche Vergleich macht deutlich, daß im Sommer hohe Cu-Beträge aus dem internen Umsatz den Stammablauf speisen. Die Cd-Werte zeigen ein Wintermaximum, das mehr als dem Doppelten der Kronentraufe entspricht.

Im Winter liegt der pH-Wert deutlich unter dem Bestandesniveau, im Sommer dagegen bewirken die im Kronenraum ablaufenden Pufferreaktionen auch im Stammabfluß eine Anhebung der pH-Werte, so daß die kationischen Substanzen in Abhängigkeit von ihrem Löslichkeitsverhalten vorrangig im Sommer am Stamm fixiert werden. Somit stellt der pH-Wert eine wichtige Steuergröße für die Elementkonzentration des Stammablaufes dar.

4.3.2 Stoffeinträge in den Stammraum

Da die als Stammablauf eingetragenen Wassermengen nicht den gesamten Waldboden betreffen, ist es sinnvoll, die Depositionsberechnungen auf der Grundlage von konzentrischen Versickerungsbereichen vorzunehmen. Für die Ermittlung der Versickerungsradien wurde für alle untersuchten Bäume ein

mittlerer Umfang für den Fußbereich errechnet. Geländebeobachtungen ergaben in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität verschiedene Versickerungsreichweiten zwischen 5 und 20 cm, bei denen aufgrund des vorhandenen Reliefs die Geländeneigung vernachlässigt werden konnte. Auf dieser Grundlage wurde eine Kreisringfläche ermittelt, die es ermöglicht, die jeweilige, für die Eintragsberechnung erforderliche Versickerungsfläche zu bestimmen. Dieses hypothetische Verfahren läßt zumindest eine Annäherung an die tatsächlichen Einträge in den Stammraum zu.

Die Tabelle 4 zeigt, daß der Eintrag über diesen Pfad bei allen Elementen – bezogen auf die Gesamtfläche – zu vernachlässigen ist. Legt man die einzelnen Versickerungsbereiche zugrunde, so erweist sich der Stammraum als ein Bereich des Bestandesbodens, der außerordentlich hohen Einträgen ausgesetzt ist.

Tab. 4: Einträge durch den Stammabfluß im Rastorfer Eichenbestand;
Angaben für 4 verschiedene Versickerungsradien in % des Freilandeintrags, Winter 1985/86

	Cd	Pb	Cu	SO ₄	NO ₃	H+	Ca	K	Mg	Na
Kronentr.	48	53	74	130	81	121	270	545	239	302
SA Ø 5 cm	271	200	397	2370	611	1699	3912	9982	3068	3447
SA Ø10 cm	118	87	172	1027	265	736	1695	4325	1329	1493
SA Ø15 cm	22	51	101	602	156	430	997	2543	781	878
SA Ø20 cm	46	34	68	405	105	291	669	1707	525	590

Die höchsten absoluten Eintragsraten in den Stammraum erreicht das Sulfat mit einem Maximum im Winter. Einen verhältnismäßig hohen Input weisen ebenfalls die kationischen Nährstoffe auf. Auch beim Nitrat wird ein verstärkter Eintrag in die Baumfußbereiche wirksam. Bei den Schwermetallen schließlich ergibt sich zwar ebenfalls ein höherer Input als im Freiland, dieser bleibt jedoch im Falle von Cd und Pb auf die inneren Versickerungsradien beschränkt. Cd weist im Sommer sogar einen niedrigeren Eintrag auf als im Freiland. Die höchsten Schwermetalleinträge sind beim Cu zu beobachten, die zum Teil dem internen Umsatz entstammen. In den Eintragsraten der Wasserstoffionen spiegelt sich der Jahresgang der pH- Werte mit einem sehr geringen sommerlichen Input wider.

4.4 Streufall

Zur Ermittlung des Stoffeintrages in Waldböden ist neben dem Input über den Bestandesniederschlag auch der Eintrag über den Streufall von großer Bedeutung. Über diesen Pfad gelangen sowohl die Stoffe aus dem internen Umsatz als auch die über Deposition extern in das System eingetragenen und auf den Blättern abgelagerten Substanzen auf den Bestandesboden. Die Streu

wurde in allen vier Beständen auf die Schwermetalle sowie Ca, Na und K hin untersucht.

Die Messungen in Rastorf ergaben Streumengen von 4,38 t/ha · a im Buchenbestand, 5,01 t/ha · a im Fichtenforst, 4,74 t/ha · a unter Eiche und 3,38 t/ha · a im Lärchenwald. Die Streuzufuhr konzentriert sich bei den laubwerfenden Arten auf die Zeit zwischen den Monaten Oktober bis Dezember. Unter Fichte ist der Streufall in der Zeit von Februar bis April am intensivsten. Blattaustrieb und Blütezeit schlagen sich in allen Beständen in einem zweiten Maximum nieder, das in die Monate Mai bis Juli fällt.

Die Eintragswerte lassen in bezug auf die laubwerfenden Arten erkennen, daß zwischen 50 % und 80 % des Jahreseintrages über den Streufall von Oktober bis Dezember erfolgt. Je stärker die Elemente an internen Stoffkreisläufen teilnehmen, desto intensiver prägt sich ein zweites Sommermaximum aus; der Input über den herbstlichen Streufall ist dementsprechend geringer. Dieser Sachverhalt trifft vor allem auf K und Cu zu. Der Jahresgang der Konzentration zeigt einen deutlichen Höhepunkt im Sommer, was vermuten läßt, daß die K- und Cu-Einträge während der Vegetationsperiode hauptsächlich den internen Kreisläufen entstammen. Im Gegensatz dazu steht das Cadmium. Hier deuten relativ niedrige sommerliche Konzentrationen in der Streu auf die oben erörterten Assimilationsmechanismen hin. Demnach wird das durch die Blätter aufgenommene Cadmium nicht in den Blättern gespeichert, sondern in der Pflanze verlagert und im Holz festgelegt (HEINRICHS & MAYER, 1980). Die Konzentration der übrigen Stoffe Pb, Ca und Na wird in wesentlich stärkerem Umfang durch den atmosphärischen Stoffeintrag bestimmt, wie das deutliche Wintermaximum dieser Substanzen zeigt. Die Abbildung 6 stellt den Eintrag über den Streufall in Beziehung zum Niederschlagseintrag. Es wird deutlich, daß der Streufall mit einem erheblichen Anteil zum Gesamtbodeninput beiträgt und teilweise sogar den Niederschlagseintrag übertrifft.

Vergleicht man Laub- und Nadelbestände, so ergibt sich für Cd und Pb, daß der Eintrag über die Streu in den Nadelbeständen gegenüber dem Niederschlag einen höheren Betrag erreicht als auf den Laubstandorten. Umgekehrt verhält es sich bei den Nährstoffen: Hier hat der Eintrag über die Laubstreu einen höheren Anteil am Bodeninput als in den Nadelbeständen. Dieser Sachverhalt zeigt einerseits den höheren Nährstoffpegel der Laubarten, dokumentiert zugleich aber auch, daß die atmosphärischen Schadstoffe effizienter durch die Gymnospermen ausgefiltert werden.

Stellt man die prozentualen Anteile des Streufalls anderen, zum Teil stärker durch Luftverunreinigungen betroffenen Gebieten gegenüber (z.B. Solling; vgl. MAYER, 1981; ASCHE, 1985), so zeigt sich, daß die Relativwerte im Rastorfer Untersuchungsraum wesentlich höher ausfallen. Der Streuinput erlangt demnach in Gebieten mit geringen Schadstoffeinträgen insbesondere bei schwerlöslichen Substanzen, eine vergleichsweise größere Bedeutung als in stärker belasteten Regionen. Dort herrschen niedrigere pH-Werte im Benetzungswasser, die einer erhöhten bzw. verlängerten Stoffakkumulation auf den oberirdischen Sproßorganen entgegenwirken.

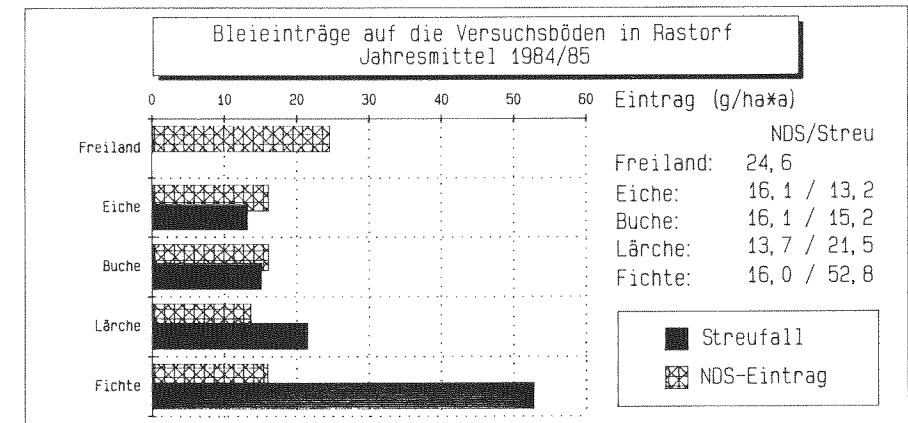
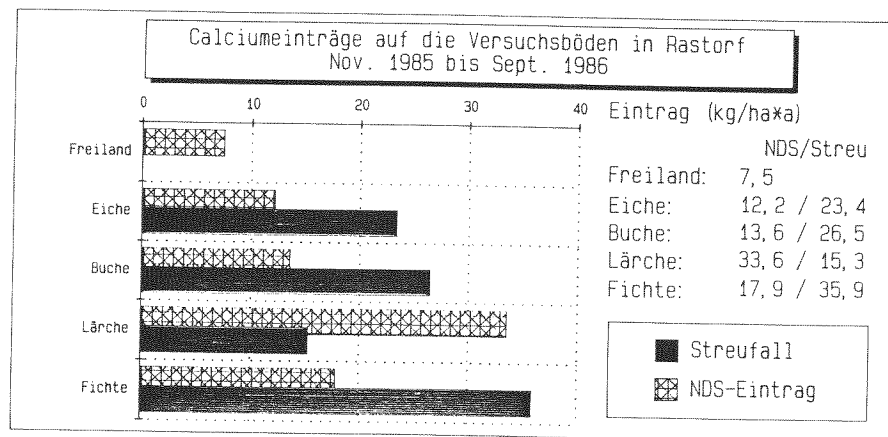
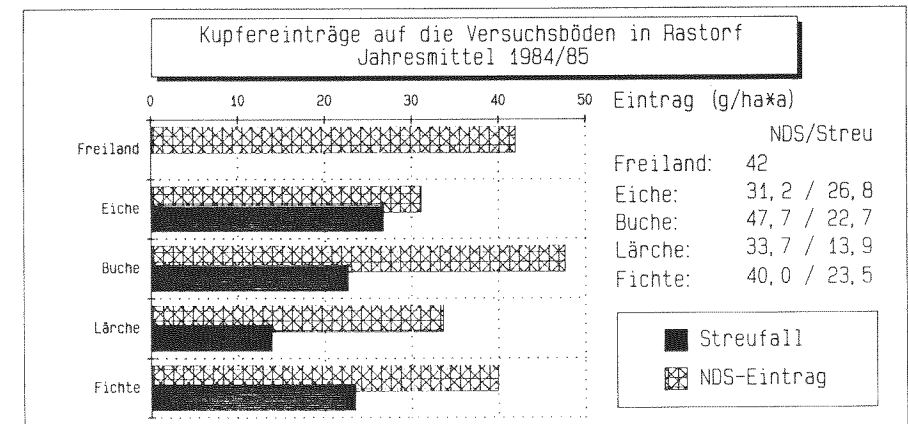
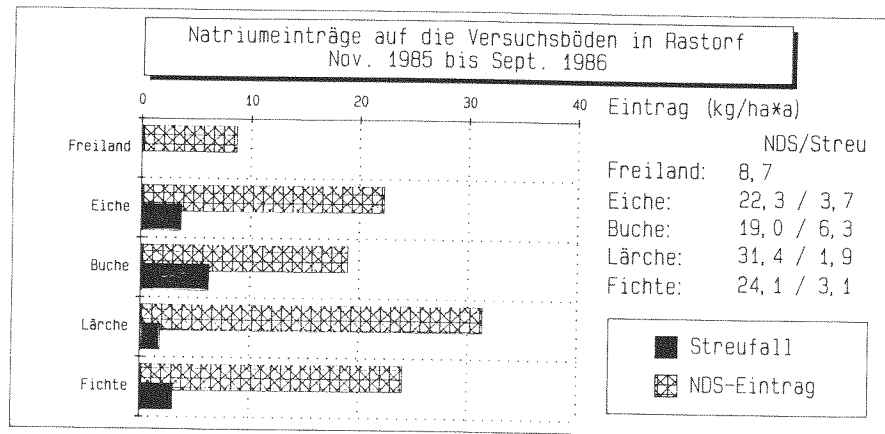
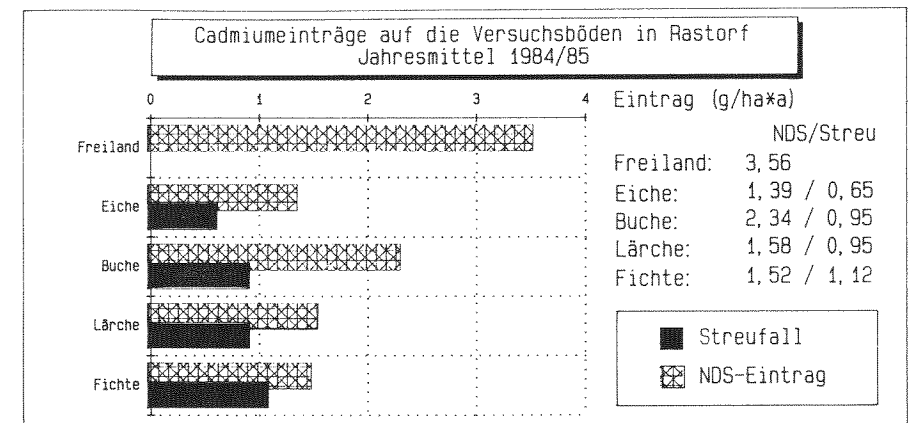
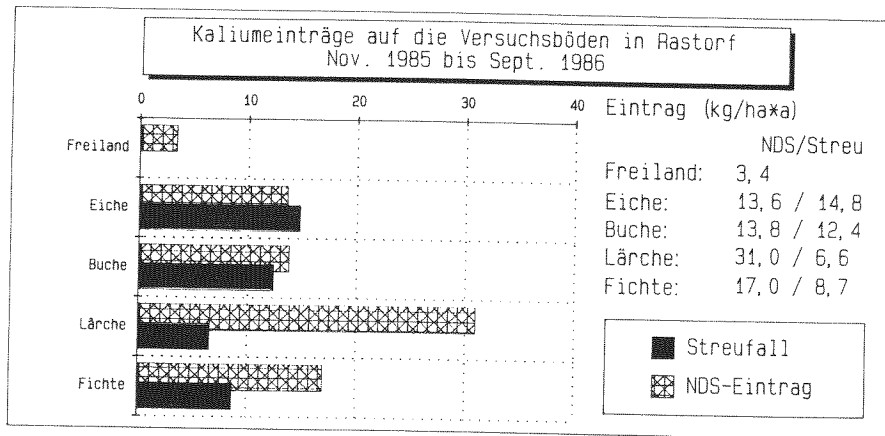


Abb. 6: Vergleich zwischen Streueinträgen und Niederschlagseinträgen auf die untersuchten Bestandesböden

5. Diskussion

Die Belastungssituation des Untersuchungsstandortes in Rastorf ist in vielerlei Hinsicht typisch für ländliche Regionen, die relativ weit entfernt von größeren Schadstoffemittenden liegen. Neben marinen Einflüssen prägen vor allem die Aktivitäten der Landbewirtschaftung die Depositionsniveaus der Substanzen. Letzteres gilt für die Wasserstoffionen sowie für den Stickstoff-, Cadmium-, Kalium- und Calciumeintrag auf die Meßstation im Freiland.

Es wurde gezeigt, daß zwischen den Freilandwerten und den Eintragsraten auf die Bodenoberflächen verschiedener Waldbestände erhebliche Unterschiede existieren, die auf eine Reihe von Prozessen im Kronenraum der Wälder zurückzuführen sind. Diese Mechanismen führen bei den meisten Stoffen insbesondere im Winter zu Anreicherungen in der Kronentraufe. Diese Konzentrierungen finden besonders stark im Lärchenwald statt, Fichten und Buchen konzentrieren die Substanzen auf einem mittleren Niveau, während diese Prozesse in den Eichenbeständen mit der geringsten Wirkung ablaufen. Bezogen auf die Stofffrachten konnten bezüglich der Schwermetalle positive, bezüglich der Anionen negative Kronenraumbilanzen errechnet werden. Die kationischen Nährstoffe werden grundsätzlich im Bestandesniederschlag angereichert, während die Wasserstoffioneneinträge in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der Niederschlagsbefrachtung mit Säurebildnern variieren.

Neben dem Pfad über die Kronentraufe erreichen erhebliche Stoffmengen die Bodenoberflächen über den Streufall, der größtenteils während der Monate Oktober und Dezember erfolgt. Hierbei gelangen bei den Gymnospermen vergleichsweise geringe Nährstoffmengen, aber hohe Schwermetallfrachten, auf den Bestandesboden. Dieses Verhältnis ist bei den Laubbäumen, insbesondere bei der Eiche, umgekehrt. Der Anteil des Streufalls am Gesamtbodeninput liegt zwischen 119 und 77% und nimmt auf Bestandesniveau in der Reihenfolge Fichte>Eiche>Buche>Lärche ab, bezogen auf die untersuchten Stoffe ergibt sich die Rangfolge Blei>Calcium>Kalium>Kupfer>Cadmium>Natrium.

Addiert man die Eintragsmengen durch Kronentraufe und Streufall und stellt diese den Freilandeinträgen gegenüber (vgl. Abbildung 6), so ergeben sich Anreicherungsfaktoren, die zwischen den Zahlen 0,6 und 11 liegen. Werte unter 1, die eine Abreicherung repräsentieren, ergeben sich nur beim Cadmium, während alle anderen Stoffe – diese gilt insbesondere für die Nährstoffe – in den Beständen konzentriert werden. Innerhalb der untersuchten Baumarten werden die Stoffe im Mittel in folgender Reihenfolge angereichert: Lärche>Fichte>Buche>Eiche.

Ein Eintragspfad, dem bislang nur wenig Bedeutung beigemessen wurde, ist der Stammabfluß. Bezogen auf die Gesamtfläche eines Bestandes trägt er mengenmäßig nur wenig zur Gesamtbilanz bei, im großmaßstäblichen Bereich jedoch gewinnt er außerordentlich an Bedeutung. Die Untersuchung hat gezeigt, daß mit Ausnahme des Bleis alle Elemente eine zum Teil starke Anreicherung im Stammablauf erfahren. Daß dieser Effekt selbst in einer durch Immissionen eher gering belasteten Region deutlich ausgeprägt ist, unterstreicht die Rolle des Stammablaufes als einen schon sehr frühzeitig reagierenden Belastungsindikator für Luftverunreinigungen in Waldökosystemen. Durch die Konzentrie-

rung dieses Pfades auf den unmittelbaren Stammfuß ist diese Zone des Waldbodens sehr hohen Einträgen ausgesetzt (vgl. Tab. 4). Dadurch gelangen relativ viele Komponenten des Stammablaufes direkt in den Transpirationsstrom der Pflanzen. Ferner verursacht der hohe Input an Säurebildnern einerseits eine verstärkte Nährstoffauswaschung, zum anderen nimmt die Verfügbarkeit toxischer Schwermetalle in der unmittelbaren Umgebung des Stammfußes zu.

Auf der Basis dieser Zusammenhänge können die in der Problemstellung genannten scheinbaren Widersprüche aufgeklärt werden. Es ergibt sich zwangsläufig, daß Depositionswerte aus Freilandstationen nicht zur Erklärung der Stoffeinträge in Waldökosysteme herangezogen werden können, weil durch die Anreicherungsprozesse im Kronenraum, durch die mikrometeorologischen Besonderheiten der Wälder und durch synergistische Mechanismen völlig andere Relationen vorliegen als über einer gut gemähten Grasnarbe. Insofern darf es nicht verwundern, daß auch in den sogenannten Reinluftgebieten erhebliche Schädigungen der Wälder auftreten und daß immer wieder neue Baumarten, wie jetzt z.B. die Eichen, von den Umweltbelastungen betroffen werden. Es gibt demnach auch keinen Grund, die Diskussion um geeignete Gegenmaßnahmen versickern zu lassen, vielmehr sollten wir uns darüber klar sein, daß die stetige chronische Belastung beim Überschreiten noch unbekannter Schwellenwerte sehr schnell zu irreversiblen Schädigungen, deren Ausmaße nicht abzusehen sind, führen kann.

6. Literatur

- ANDERSSON, A. 1981: Cadmium and Lead in Precipitation in Drainage Water. – Swedish J. Agric. Res. 11, 119–125 (4)
- ASCHE, N. 1985: Stoffeinträge in das Naturschutzgebiet Braunschweig-Riddagshausen. – Ber. des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, Bd. 14, 228 S.
- BLOCK, J., BARTELS, U. 1985: Ergebnisse der Schadstoffmessungen in Waldökosystemen in den Meßjahren 1981/1982 und 1982/1983. – Forschung und Beratung, Reihe C, 296 S. (14)
- BÜTTNER, G., LAMMERSDORF, N. 1985: Deposition und Stoffaustag aus unterschiedlich geschädigten Fichten-Ökosystemen in der Wingst. – Exkursionsführer des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, 331–358 (8)
- FRÄNZLE, O., BRUHM, I., GRÜNBERG, K.-U., JENSEN-HUSS, K., KUHN, D., KUHN, G., MICH, K., MÜLLER, F., REICHE, E.-W. 1987: Darstellung der Vorhersagemöglichkeiten der Bodenbelastung durch Umweltchemikalien. – Abschlußbericht des FE-Vorhabens 106 05 026 – Umweltbundesamt Berlin (9)
- FRÄNZLE, O., SCHRÖDER, W., VETTER, L. 1985: Synoptische Darstellung möglicher Ursachen des Waldsterbens. – Abschlußbericht des FE-Vorhabens 106 07 046/13 – Umweltbundesamt Berlin
- FREVERT, T., KLEMM, O. 1984: Wie ändern sich die pH-Werte im Regen- und Nebelwasser beim Abtrocknen auf Pflanzenoberflächen?. – Arch. Met. Geoph. Biol. 34, Ser.B., 75–81
- FÜHRER, H.-W., BRECHTEL, H.-M., ERNSTBERGER, H., ERPENBECK, C. 1988: Ergebnisse von neuen Depositionsmessungen in der Bundesrepublik Deutschland und im benachbarten Ausland. – Mitteilungen des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Heft 14, 122 S.
- GEORGII, H.W. 1965: Untersuchungen über Ausregnen und Auswaschen atmosphärischer Spurenstoffe durch Wolken und Niederschläge – Ber. des Dt. Wetterdienstes, 100, Bd. 14 – Offenbach

- HEINRICHS, H., MAYER, R. 1980: The Role of Forest Vegetation in the Biochemical Cycle of Heavy Metals. – in: J. Environm. Qual. 9: 111–118
- HORLER, D.N.H., BARBER, J. 1979: Relationships between Vegetation and Heavy Metals in the Atmosphere – Proc. Management and Control of Heavy Metals in the Environment, 275–278 (13)
- HÜSER, R., DUNKEL, I. 1985: Stoffdeposition durch Niederschläge in bayerischen Waldlandschaften. – Allg. Forstzeitschrift 11, 238–240 (12)
- JENSEN, K. 1985: Untersuchungen zum Schwermetallhaushalt eines Waldökosystems unter besonderer Berücksichtigung des Stammabflusses. – Diplomarbeit, Kiel
- JOCHHEIM, H. 1985: Der Einfluß des Stammabflußwassers auf den chemischen Bodenzustand und die Vegetationsdecke in Altbuchenbeständen verschiedener Waldbestände. – Ber. des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, Bd. 13, 225 S.
- LANDESAMT FÜR WASSERHAUSHALT UND KÜSTEN SCHLESWIG-HOLSTEIN 1988: Untersuchung der Niederschlagsmenge und Niederschlagsbeschaffenheit für 1985 – 1987 in Schleswig-Holstein – Kiel (15)
- MAYER, R. 1983 a: Schwermetalle in Waldökosystemen der Lüneburger Heide. – Mittl. Dt. Bodenkdl. Ges. 38, 251–256
- MAYER, R. 1983 b: Interaction of Forest Canopies with Atmospheric Constituents: Aluminium and Heavy Metals – in: ULRICH, B. PANKRATH, J. (eds.), 47–55 (7)
- MAYER, R. 1981: Natürliche und anthropogene Komponenten des Schwermetallhaushaltes von Waldökosystemen. – in: Göttinger Bodenkdl. Berichte 70: 292 S. (1)
- MATZNER, E. 1985: Raten der Deposition von H⁺, S und N in Waldgebieten Norddeutschlands. – Exkursionsführer des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, 56–70 (3)
- MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT, FORSTEN UND FISCHEREI DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN 1988: Waldschadensinventur 1988 – Kiel
- MINISTERIUM FÜR NATUR UND UMWELT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN 1988: Meßbericht – Lufthygienische Überwachung – Kiel
- NÜRNBERG, H.W., VALENTA, P., NGYUEN, V.D. 1983 a: The Wet Deposition of Heavy Metals from the Atmosphere in the Federal Republic of Germany – Proc. of the 3rd Intern. Conf. Heavy Metals in the Environment, Vol 1, CEP Consultants, 115–123, Edinburgh (11)
- NÜRNBERG, H.W., NGYUEN, V.D., VALENTA, P. 1983 b: Deposition von Säure und toxischen Schwermetallen mit den Niederschlägen in der Bundesrepublik Deutschland. – Jahresber. Kernforschungsanlage Jülich 1982/83, 41–53 (10)
- NÜRNBERG, H.W., VALENTA, P., NGYUEN, V.D., GÜDDE, M. 1984: Studies on the Deposition of Acid and of Ecotoxic Heavy Metals with Precipitation from the Atmosphere. – Fres. Z. Anal. Chem. 317, 314–323
- OMROD, D.P., 1984: Impact of Trace Element Pollution on plants. – in: TRESHOW, M. (ed.): 291–319
- RAISCH, W., ZÖTTL, H.W. 1983: Schwermetallverteilung in Fichtenbeständen der Bärhalde (Südschwarzwald). – Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges. 38, 146 (2)
- RAT DER SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN 1983: Waldschäden und Luftverunreinigungen. – Stuttgart, Mainz
- SAUERBECK, D. 1985: Funktionen, Güte und Belastbarkeit des Bodens aus agrilkulturchemischer Sicht. – Stuttgart (6)
- SCHLICHTING, E., MÜLLER, D. 1979: Schwermetallbilanzen und -umsätze in südwestdeutschen Kleinlandschaften aus Sedimentgestein. – Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges. 29, 545–547 (5)
- SCHULTZ, R. 1985: Unterschiede der Schwermetalleinträge in Buchen- und Fichtenwälder exponierter und geschützter Lagen. – Exkursionsführer des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, S. 94–98
- TRESHOW, M. ed. 1984: Air Pollution and Plant Life. – Norwich

- ULRICH, B., MAYER, R., KHANNA, P.K. 1979: Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. – Schriften aus der Forstl. Fak. d. Univ. Göttingen und der Nieders. Forstl. Versuchsanstalt, 58, 291 S.
- ULRICH, B., PANKRATH, J. eds. 1983: Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems. – D. Reidel, Dordrecht
- WENTZEL, K.F. 1978: Immissionsgrenzwerte für den Wald. – Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen, 5, 368–380

Die Zahlen in Klammern beziehen sich auf die Abbildungen 1 und 2

Anschrift der Verfasser

Kirsten Jensen-Huß & Felix Müller
 Projektzentrum Ökosystemforschung
 der Universität Kiel
 Schauenburger Str. 112

D-2300 Kiel