

BERICHTE
FREIBURGER FORSTLICHE FORSCHUNG

HEFT 59

18 Jahre Depositionsmessnetz der
Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt
Baden-Württemberg

Ralph Hug, Regina Hepp und Klaus von Wilpert

FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT
BADEN-WÜRTTEMBERG
ABTEILUNG BODEN UND UMWELT

ISSN: 1436-1566

Die Herausgeber:

Forstwissenschaftliche Fakultät der
Universität Freiburg und
Forstliche Versuchs- und
Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Redaktion:

Umschlaggestaltung:

Bernhard Kunkler Design, Freiburg

Druck:

Eigenverlag FVA Freiburg

Bestellungen an:

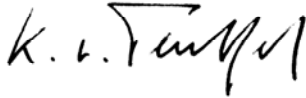
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt
Baden-Württemberg
Wonnhalde 4
79100 Freiburg
Tel. 0761/4018-0, Fax 0761/4018-333
e-Mail: FVA-BW@Forst.bwl.de

Alle Rechte, insbesondere das Recht
der Vervielfältigung und Verbreitung
sowie der Übersetzung vorbehalten

Vorwort

Mit dem vorliegenden Heft der Berichtsreihe „Freiburger Forstliche Forschung“ werden die Ergebnisse aus dem Depositionsmessnetz Baden-Württemberg vorgestellt. Dieses Messnetz wird seit 1983 betrieben und lässt mit seiner nun schon knapp 20-jährigen Zeitreihe neben dem Niveau der Säure- und Stoffeinträge in Wälder deren Entwicklungstendenz erkennen. Die Abnahme der Gesamtsäureeinträge um 25-50% seit Anfang der Depositionsmessungen kann als Erfolg der Luftreinhaltepolitik der Landesregierung gewertet werden. Ebenso deutliche Rückgänge in der Schwermetall- und Chloridbelastung der Niederschläge. Trotzdem liegt die Depositionsbelastung im überwiegenden Teil der Landesfläche immer noch über der für eine ungestörte Funktionstüchtigkeit von Wäldern kritischen Belastungsschwelle, so dass weitere Anstrengungen zur Luftreinhaltung nach wie vor notwendig sind. Dies gilt insbesondere im Bereich der Stickstoffbelastung.

Noch einen Hinweis zum Gebrauch dieser Veröffentlichung möchte ich geben. Diese richtet sich auf etwa 2/3 des Umfangs (Kapitel 2-3) mit methodischen Details, die manchmal etwas sperrig zu lesen sind, an Fachkollegen, die mit dem Betrieb von Depositionsmessnetzen betraut sind und diese Informationen für die Bewertung der Ergebnisse benötigen. Der ergebnisorientierte Leser findet in den Kapiteln 4-5 Informationen zum aktuellen Stand der Depositionsbelastung, sowie zu deren zeitlichen Entwicklung.



Prof. Konstantin Freiherr von Teuffel
- Direktor der FVA -

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNGEN	1
2	MATERIAL UND METHODEN.....	6
2.1	Messorte und Versuchsdesign	6
2.1.1	Anordnung der Messorte	6
2.1.2	Kriterien für die Versuchsflächenauswahl	6
2.1.3	Art und Aufstellung der Niederschlagssammler	7
2.1.4	Weg von der Probenahme bis zur Analyse im Labor	9
2.2	Messmethoden und Bestimmungsgrenzen im Labor	10
2.3	Kronendachdifferenzmodelle	11
2.3.1	Das Ulrich-Modell (1991) zur Abschätzung der Kronenpufferung	13
2.3.2	Das Kronendachdifferenzmodell nach Ulrich '83	17
3	METHODISCHE ERGEBNISSE	20
3.1	Veränderungen der Stickstoffformen in Abhängigkeit der Lagerungszeit	20
3.1.1	Ergebnisse	22
3.1.2	Ergebnisse der Freilandversuche	24
3.1.3	Ergebnisse der Bestandesversuche	27
3.1.4	Resümee	30
3.2	Einfluss von zweiwöchiger Probenlagerung im Kühlraum auf den pH-Wert	31
3.3	Einfluss der Kronendichte	32
3.3.1	Kronenaufnahmen 1995-1997	32
3.4	Einfluss der Kronendichte auf Volumenfluss und chemische Eigenschaften des Bestandesnieder-schlags	40
3.4.1	Niederschlagshöhe im Bestand	43
3.4.2	Protoneneinträge im Bestand	45
3.4.3	Natrium Einträge	46
3.4.4	Chlorid Einträge	48
3.4.5	NH ₄ Einträge	49
3.4.6	NO ₃ Einträge	52

3.4.7	SO ₄ Einträge	52
3.4.8	Kalium und Mangan Einträge	54
3.4.9	Ca Einträge	54
3.4.10	Mg Einträge	55
3.5	Vergleichsrechnung zwischen den Kronendachdifferenzmodellen nach Ulrich '83 und Ulrich '91	56
3.6	Vergleich der im Depositionsmessnetz verwendeten Niederschlagssammler mit anderen Sammlertypen	58
3.7	Harmonisierung der Eintragsdaten aus unterschiedlichen Aufstellungsarten der Totalisatoren	59
4	ERGEBNISSE DER DEPOSITIONSMESSUNGEN DES HYDROLOGISCHEN JAHRES 2000	61
4.1	Stickstoffeinträge im Hydrologischen Jahr 2000	61
4.2	Gesamtsäureeinträge im Hydrologischen Jahr 2000	64
5	ENTWICKLUNG DER STOFFEINTRÄGE IM UNTERSUCHUNGSZEITRAUM	68
5.1	Entwicklung der Stickstoffeinträge	68
5.2	Entwicklung der messbaren Protoneneinträge	71
5.3	Entwicklung der Chlorid Einträge	75
5.4	Entwicklung der Schwermetalldepositionen	76
5.5	Entwicklung der Einträge der basischen Kationen Kalium, Calcium und Magnesium	81
5.6	Vergleich Nullflächen - Düngeflächen	82
5.6.1	Vergleich Ochsenhausen	82
5.6.2	Station Heidelberg	84
	ZUSAMMENFASSUNG	86
	LITERATUR	90

ABBILDUNGSVERZEICHNIS 92

TABELLENVERZEICHNIS 95

ZUSAMMENFASSUNG

An landesweit 25 Messorten werden derzeit die Stoffeinträge vergleichend unter einem Fichtenbestand und einer benachbarten Freilandmessstelle überwacht. Die Messpunkte des Depositionsmessnetzes sind auf Regionen mit vorwiegend nichtkarbonatischen Standorten konzentriert, da dort die standortspezifische Pufferrate durch die aktuellen Säureeinträge großflächig überschritten wird. Aus Standardisierungsgründen werden die Depositionsmessstellen auf Fichtenbestände beschränkt.

An den Depositionsmessstationen werden die Einträge von Säurebildnern und die Gesamtstickstoffeinträge gemessen. Die Säureeinträge im Niederschlag setzen sich aus Sulfat (SO_4), Nitrat (NO_3), Chlorid (Cl) und Ammonium (NH_4) zusammen. Während die Sulfat- und Nitratdepositionen überwiegend aus der Verbrennung fossiler Energieträger stammen, Chlorid aus der Verbrennung von Kunststoffen, werden die anthropogenen Ammoniumeinträge zu einem erheblichen Teil durch Tierhaltung, aber auch durch Emissionen aus Kläranlagen und der chemischen Industrie verursacht.

Ein erheblicher Teil der mit dem Niederschlag eingetragenen Säuren wird bereits im Kronenraum aufgenommen (z.B. direkte Aufnahme von Ammonium) oder durch Freisetzung von Basen abgepuffert und entzieht sich somit der direkten Messung. Dieser Anteil wird als Kronenpufferung bezeichnet. Er wird durch Modellrechnungen ermittelt und der direkt gemessenen Säuremenge zugeschlagen. Die im Kronenraum aufgenommenen Säureäquivalente müssen zur Aufrechterhaltung der Elektroneutralität durch die Abgabe von Kationen („Leaching“) gepuffert werden. Die abgegebenen Kationen werden unter Freisetzung von Protonen im Wurzelraum wieder ersetzt. Die Gesamtsäureeinträge sind in den Waldbeständen im Durchschnitt ca. zwei- bis dreimal so hoch wie im Freiland. Das bedeutet, dass Wälder mit ihrer großen Kronenoberfläche Stäube und Aerosole aus der Luft ausfiltern und damit aktiv zur Luftreinhaltung beitragen. Lediglich in den immissionsarmen Windschattenlagen des Schwarzwaldes treten vereinzelt im Waldbestand und im benachbarten Freiland vergleichbare Gesamtsäureeinträge auf.

Die Gesamtsäureeinträge in die Wälder Baden-Württembergs betragen aktuell zwischen ca. 0,5-2,5 $\text{kmol}_e/\text{ha}/\text{Jahr}$ und sind nach wie vor so hoch, dass sie das natürliche Puffervermögen nichtkarbonatischer Standorte in der Regel übersteigen. Regional sind drei Bereiche unterschiedlicher Depositionsintensität unterscheidbar. Im Windschatten des Schwarzwaldes werden die niedrigsten Gesamtsäureeinträge ($<1 \text{ kmol}_e/\text{ha}/\text{Jahr}$) gemessen, entlang des Schwarzwald-Westkamms mit Werten zwischen 1,5 und 2,5 $\text{kmol}_e/\text{ha}/\text{Jahr}$ die höchsten. Die übrige Landesfläche ist mit Säureeinträgen zwischen 1 und 1,5 $\text{kmol}_e/\text{ha}/\text{Jahr}$ bezüglich der Depositionsrate wenig differenziert.

An Standorten, an denen seit Mitte der 80er Jahre kontinuierlich Depositionsmessungen durchgeführt worden sind, konnte der zeitliche Entwicklungstrend der Gesamtsäureeinträge dargestellt werden. Die jährlichen Einträge von Protonen, Ammonium und Sulfat für den Beobachtungszeitraum an diesen Stationen zeigen in allen Fällen eine Abnahme der Säureeinträge auf Werte zwischen 25 und 50% des Maximums, das zwischen 1987 und 1990 lag. An allen Stationen geht diese Abnahme überwiegend auf eine Reduktion der direkten Protoneneinträge zurück, die mit einem entsprechenden Rückgang der Sulfateinträge korrespondiert. Aber auch die Ammoniumeinträge, die zu großen Anteilen aus der Landwirtschaft stammen, sind in der Beobachtungsperiode leicht zurückgegangen. Die Reduktion von Sulfateinträgen wurde durch den konsequenten Einbau von Filteranlagen in Großfeuerungsanlagen und die Reduktion des Schwefelgehaltes in Brennstoffen aus Erdöl erreicht wurde. Das ist als klarer Erfolg der über die TA Luft und Folgeverordnungen umgesetzten Luftreinhaltepolitik zu bewerten.

Die Stickstoffeinträge liegen mit Werten zwischen 10 und 45 kg/ha/Jahr auf einem Großteil der Landesfläche um ein Mehrfaches über den Stickstoffmengen, die im Biomassezuwachs fixiert werden können. Nur in den Leelagen des Schwarzwaldes wurden Stickstoffeinträge gemessen, die zwischen 9 und 25 kg/ha/a und damit im oder knapp über dem Bereich der biologischen Aufnahmekapazität von wüchsigen Wäldern liegen.

Bei der stofflichen Zusammensetzung der Stickstoffeinträge überwiegt im Westen des Landes der Nitratanteil, während im Ostteil der Ammoniumanteil dominiert. Im Landesdurchschnitt liegt der Anteil an Ammonium, der für den Anteil der Stickstoffbelastung aus der tierischen Produktion steht, etwas niedriger als der dem Individualverkehr zurechenbare Nitratanteil.

Die Höhe der Stickstoffeinträge liegt in der Größenordnung einer extensiven landwirtschaftlichen Düngung. Dies ist für Wälder und ihre typische Bodenvegetation problematisch, da diese evolutionsbiologisch nicht an Stickstoffüberfluss angepasst sind. Die Folge ist eine Verschiebung der Artenzusammensetzung in der Bodenvegetation in Richtung stickstoffliebender Arten und eine Verdrängung oftmals seltener und naturschützerisch interessanter Waldarten. In der Waldernährung sind Nährstoffungleichgewichte (z.B. eine Verschärfung von Kaliummangelerscheinungen) die Folge zunehmender Stickstoffsättigung.

Analog zu den Gesamtsäureeinträgen wurde auch bei den Stickstoffeinträgen die zeitliche Entwicklung an den drei seit Mitte der 80er Jahre betriebenen Depositionsstationen ermittelt. Über die gesamte Messperiode sind die Stickstoffeinträge annähernd gleich geblieben, allenfalls in Oberschwaben (Station Brunnenholzried) scheint sich eine schwache Abnahmetendenz im letzten Drittel der 90er Jahre zu stabilisieren. Unerwarteterweise sind die absoluten Höhen der Nitratinträge sehr konstant geblieben, während Ammoniumeinträge leichte Abnahmetendenzen aufweisen. Der leichte Rückgang der Ammoniumeinträge stellt eine erstmals erkennbare Trendwende dar, da bisher die Einträge dieses Elements auf hohem Niveau stagnierten. Hier wirken sich u.U. erstmalig messbar Emissionsminderungs-

strategien der Landwirtschaft aus. Es ist dagegen unerwartet, dass im Nitratreintrag die Wirkung einer Reduktion oxidierten Stickstoffverbindungen durch die Einführung von Katalysatoren in Kraftfahrzeugen noch nicht erkennbar ist.

Die Vermutung, dass die Höhe der Gesamtstickstoffeinträge von der Niederschlagshöhe abhänge, konnte anhand der Ergebnisse aus dem Depositionsmessnetz der FVA nicht eindeutig bestätigt werden. Vielmehr scheinen die Entwicklungstrends von Stickstoffeinträgen wie bei den Gesamtsäureeinträgen, sicherlich mit einiger Zeitverzögerung, stärker von der Entwicklung der Emissionen abzuhängen.

Neben Sulfat, Ammonium und Nitrat ist auch das als HCl eingetragene Chlorid eine aus industriellen Prozessen stammende Versauerungskomponente. Chlorid stammt im Bereich industrieller Ballungsräume überwiegend aus der Verbrennung von chlorierten Kohlenwasserstoffen. Da in Baden-Württemberg meerbürtige Chlorideinträge kaum eine Rolle spielen, sind nahezu alle hier gemessenen Chloridmengen als anthropogene Einträge anzusehen. Mit Ausnahme der Stationen im Windschatten des Schwarzwaldes, die auf sehr niedrigem Niveau kaum einen Trend aufweisen, ist an allen Standorten eine deutliche Abnahme der Chlorideinträge auf etwa die Hälfte der Eintragungshöhen von Mitte/Ende der 80er Jahre zu erkennen. Dies ist mit hoher Sicherheit der zunehmenden Diskriminierung chlorierter Kohlenwasserstoffe aus Fertigungsprozessen und der Kunststoffherstellung zuzuschreiben und damit Folge einer umfassenden Luftreinhaltepolitik.

Über Bestandesniederschläge werden in Wäldern nicht nur Säuren und Stickstoff eingetragen, sondern auch Schwermetalle. An einigen Messstationen werden zusätzlich zum Routinemessprogramm seit Mitte der 80er Jahre Schwermetalleinträge überwacht. An allen Messstationen konnte ein genereller Trend abnehmender Schwermetalleinträge im Bestandesniederschlag beobachtet werden. Für Cadmium ist dieser nicht ganz einheitlich, in Freudstadt und Welzheim ist bei vergleichsweise niedrigem Eintragsniveau kein Trend erkennbar. An den anderen Stationen waren die Cadmumeinträge am Ende der Beobachtungsperiode auf ca. die Hälfte der Anfangswerte zurückgegangen. Bleieinträge sind bei auffallend geringer Streuung an allen Stationen stark zurückgegangen und betragen am Ende der Beobachtungsperiode noch 20 bis 30% der Anfangswerte. Beides ist als eindeutiger Erfolg von Luftreinhaltemaßnahmen zu werten.

Im Rahmen der Untersuchung methodischer Randbedingungen der Depositionsmessungen wurden neben technischen Details (z.B. Geometrie der Sammler) schwerpunktmäßig Fragen der Probenlagerung und des Sammeltturnus, sowie der Einfluss wechselnder Kronendichte auf Menge und chemische Zusammensetzung der Bestandesniederschläge untersucht. Die wesentliche Quintessenz dieser methodischen Untersuchungsreihen war:

- Die Abhängigkeit von Menge und Zusammensetzung der Bestandesniederschläge von der Kronendichte war in den meisten Fällen inhaltlich plausibel und in den Punktwolken trotz mehr oder weniger breiten Streubändern um die Ausgleichsfunktionen identifizierbar. Damit wird die Notwendigkeit hinreichend vieler Messwiederholungen bei

der Bestandesniederschlagsmessung betont (wir verwenden 12-16 Sammler im Bestand). Außerdem beinhaltet die Dokumentation der Kronendichteentwicklung an den einzelnen Messstellen die Option einer Standardisierung der Messreihen durch „nachträgliches Herausrechnen“ des Kronendichtefaktors. Dies könnte ein Ansatz zur Verbesserung der Erkennungsmöglichkeiten emissionsbedingter Depositionstrends sein.

- Die Untersuchungen zum Sammeltturnus zeigten im Wesentlichen, dass innerhalb der ersten 14 Tage auch unter erschwerten Bedingungen (z.B. heißer Sommer 1995) die Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Niederschlagsproben (insbesondere bezüglich der Stickstoffkomponenten) tolerabel waren. Damit erscheint der aus organisatorischen Gründen festgelegte 14-tägige Sammeltturnus weiterhin vertretbar.
- Aus dem Vergleich verschiedener Sammlertypen, die sich hauptsächlich in der Größe der Auffangfläche unterschieden, konnte abgeleitet werden, dass die FVA-Sammler mit 100 cm² Auffangfläche für flüssige Niederschläge mit Abweichungen von bis zu 2% zur Referenz (Hellmann Sammler) hinreichend genau sind. Bei Schnee treten höhere Ungenauigkeiten auf. Diese müssen durch die zusätzliche Ausbringung von Schneesammlern im Winter berücksichtigt werden.