

## 4 Schlußfolgerungen

Die vorliegende Arbeit „Moos-Monitoring 1995/96“ zeigt die großflächige Übersicht der Verteilung von 12 Metallen in Deutschland in 1995/96 auf der Basis von Moosanalysen sowie den zeitlichen Vergleich mit dem Vorläuferprojekt aus 1990/91.

Nach der analytischen Anpassung der Ergebnisse des Moos-Monitorings 1990/91 (Kap. 3.2) zeigt der Vergleich zu diesem Programm in 1995/96 in den meisten Fällen Abnahmen in den Elementgehalten für Arsen, Chrom, Eisen, Nickel, Blei, Titan und Vanadium. Insbesondere in den neuen Ländern werden für die Elemente Chrom, Eisen, Titan und Vanadium auffällige Rückgänge ermittelt. Zum Teil kann durch die Reduktionen von Staubemissionen (→partikelgebundene Schwermetalle) in den neuen Ländern auch der parallele Rückgang in den Schwermetallgehalten erklärt werden. So zeigt der Vergleich der Schwebstaub-Depositionen in Deutschland aus 1990 und 1995 mit den entsprechenden Elementkarten aus denselben Jahren ähnliche Ausbreitungsmuster (UMWELTBUNDESAMT, Daten zur Umwelt 1997). In erster Linie ist diese Entwicklung vermutlich auf die Schließungen und Sanierungen von Großfeuerungsanlagen, den Einsatz verbesserter emissionsmindernder Technologien sowie ferner auf die Umstellungen von Braunkohle auf andere Energieträger wie Gas im privaten und industriellen Energieversorgungsbereich zurückzuführen. Für die typischen Erdölelemente Vanadium und Nickel zeigen sich die Tendenzen auch in den alten Ländern und deuten hier ebenfalls auf Umstellungen im Energiesektor hin. Darüber hinaus kann vor allem in den neuen Ländern der Rückgang von Kraftfahrzeugen mit Zweitaktmotoren

(Benzin/Ölgemische) für die Abnahme der Vanadium- und Nickelgehalte mit verantwortlich sein.

Der starke Rückgang der Bleigehalte in 1995/96 sowohl in den alten wie auch den neuen Ländern ergibt sich offenbar aus der zunehmenden Verwendung von bleifreiem Benzin. Demgegenüber sind möglicherweise die höheren Zink- und Kupfergehalte in 1995/96 mit dem gleichzeitig zunehmenden Verkehrsaufkommen und damit verbundenen vermehrten Reifen- oder Bremsscheibenabrieb zu erklären. Für Cadmium ist in dem fünfjährigen Vergleichszeitraum keine Veränderung auf der Immissionsseite festzustellen.

An einigen Standorten in hoch industrialisierten Bereichen wie beispielsweise in Hamburg, im Ruhrgebiet oder im Saarland werden insbesondere für Cadmium, Kupfer, Chrom und Zink keine deutlichen Rückgänge gemessen. In Teilbereichen konnten sogar Zunahmen ermittelt werden.

Wie im Moos-Monitoring 1990/91 besteht auch im Moos-Monitoring 1995/96 das Problem der Vergleichbarkeit von Analysen von verschiedenen Moosarten. Unter diesem Aspekt sind bei der Elementaufnahme/-adsorption genetische Variabilitäten zwischen verschiedenen Moosarten, aber auch innerhalb derselben Art zu berücksichtigen. Dies zeigt sich in differierenden Schwermetall-Toleranzen sowie im element- und artspezifischen Aufnahmeverhalten (RÜHLING 1987; ROSS 1990; BERG et al. 1995; WOLTERBEEK et al 1995, THÖNI et al. 1996; SUCHAROVA & SUCHARA 1998). Hierzu liegen in diesem Bericht Untersuchungen vor (Kap. 3.5).

Hinsichtlich der Elementaufnahme/-adsorption divergieren die Moosarten in ihren morphologischen Ausprägungen, was ein Hauptgrund für Unterschiede in den Elementgehalten einzelner Moosarten sein kann. Eine kompaktere Polster-

form und dichte Beblätterung (z. B. *Hypnum cupressiforme*) kann gegenüber lockeren Polstern (z. B. *Pleurozium schreberi*) eine effizientere Ausfilterung der Luft und dadurch höhere Elementgehalte in den Moosen bewirken. Diese morphologischen Effekte betreffen nicht nur unterschiedliche Moosarten sondern auch gleiche Moosarten unter verschiedenen Standort- und Wuchsbedingungen. So zeigen *Pleurozium schreberi* und *Hylocomium splendens* in höheren Lagen kurzstengelige, dichte Polster gegenüber lockeren Polstern in tieferen Lagen (ZECHMEISTER 1995). Darüber hinaus bestehen bei flach am Boden wachsenden Polstern (z. B. *Hypnum cupressiforme*, *Brachythecium rutabulum*) eine höhere Wahrscheinlichkeit der Bodenkontamination oder Beeinflussungen bei Hochwasser.

Der Vergleich der Ergebnisse beider Monitoring-Programme kann aus den o. g. Gründen durch die Verwendung verschiedener Moosarten am selben Standort in 1990/91 und 1995/96 zu Konzentrations- und elementabhängigen Abweichungen führen. Hier können mögliche Unterschiede in den Elementgehalten zwischen den Jahren auch nur auf den artspezifischen Unterschieden beruhen.

Wie eine Reihe von Untersuchungen zeigen, ist das Wachstum von Moosen im wesentlichen von klimatischen Faktoren und der Höhelage abhängig (CALLAGHAN et al. 1978; SVEINBJÖRNSON & OECHEL 1992; ZECHMEISTER 1995). Dies hat auch Einfluß auf die jährliche Produktion (Biomasse) der jeweiligen Moosart im Untersuchungszeitraum. Bei hoher Biomassenproduktion können so Verdünnungseffekte auftreten. Zudem kann es im Jahresgang aufgrund unterschiedlicher Biomassenzuwächse zu saisonalen Schwankungen in den Elementgehalten kommen (MARKERT & WECKERT 1989; KIRCHHOFF

& RUDOLF 1989). In der vorliegenden Untersuchung wurde der Hauptteil der Proben innerhalb eines eng begrenzten Zeitrahmens entnommen, so daß nicht von saisonalen Effekten ausgegangen werden kann. Allerdings muß im Hinblick auf Biomasseneffekte und/-produktion beachtet werden, daß Abweichungen im Wachstumsverhalten auch in ursächlichem Zusammenhang mit dem Einfluß von Immissionen stehen können (→ Reaktionsindikatoren).

Neben dem generellen Einfluß klimatischer Bedingungen und Umweltfaktoren auf die Biomassenproduktion und die Phänologie von Moosen, zeigen sich klare Korrelationen zwischen der Niederschlagsmenge und den Elementgehalten von Moosen. Niederschläge sorgen einerseits für einen gesteigerten Eintrag von Elementen (Ionen), andererseits sind sie für die Auswaschung bereits eingelagerter Ionen wie auch der Abwaschung oberflächlich anhaftender Partikel verantwortlich (TAYLOR & WITHERSPOON 1972; GROET 1976). Auch die Niederschlagsform und -menge hat einen Einfluß auf Depositionsprozesse. Durch starke Niederschläge werden im Verhältnis weniger Schadstoffe abgelagert, als durch Niederschläge, welche die gleiche Regenmenge über mehrere Tage verteilen. So unterliegen weiträumige Bereiche Ostdeutschlands langjährigen mittleren Niederschlagsmengen von <500-600 mm gegenüber 600 bis über 1000 mm im westlichen Deutschland. Dies kann beim Vergleich derselben Arten aus den genannten Arealen und anderen Landesteilen mit ähnlichen Immissionsgegebenheiten Fehlbeurteilungen bewirken.

Aufgrund der Interaktionen zwischen Niederschlag und Kronendach kann sich die chemische Zusammensetzung des Niederschlagswassers verändern. SIEWERS & ROOSTAI (1989) zeigen Unterschiede zwischen Freilandniederschlag

und Kronendurchlaß im Fichtenbestand mit bedeutend höheren Werten im Bestandesniederschlag. Dies kann bei nicht exakter Einhaltung der Probenentnahme-Richtlinien schon auf kleinräumiger Ebene zu einer hohen Variabilität der Elementgehalte in den Moosen führen. Deshalb wurden die Probenentnehmer auf einem Probenentnahme-Seminar in die korrekte Umsetzung der Richtlinien eingewiesen. Oft ist die Einhaltung der Vorgaben für die Festlegung des Entnahmeortes nicht immer zu realisieren. Dies wird bereits durch die subjektive Einschätzung des Standortes eines jeden Probenentnehmers eingeschränkt.

Aufgrund des bodennahen Vorkommens von Moosen unterliegen sie geogenen und anthropogenen Einflußmöglichkeiten. Da die Moose nach einer europaweiten Übereinkunft nicht gewaschen werden, können Bodenpartikel die Elementgehalte beeinflussen (FIEDLER & RÖSLER 1993). Durch hohe geogene Gehalte oder die hohe Akkumulation von Elementen in den oberen Bodenhorizonten können Bodenpartikel über retrospektive Zeiträume die aktuelle Deposition von Elementen überschätzen. So zeigen die Moose um den Entnahmestandort Nordenham an der Wesermündung hohe Elementgehalte und suggerieren damit hohe aktuelle Schwermetalleinträge. Nach Auskunft der LUFA Oldenburg werden hier seit 1994 keine Erze mehr verhüttet und auch der neu angesiedelte Industriezweig (Recycling von Bleiakumulatoren) zeigt anhand von länderinternen Untersuchungen keine bedeutenden Emissionen mehr. Hier scheinen vermutlich die über Jahrzehnte im Boden akkumulierten Elemente die Elementgehalte in den Moosen zu beeinflussen. Der Einfluß von Bodenpartikeln ist z.B. aus den Ergebnissen parallel beprobter Moosarten oder

der Standortvariabilität von nur einer Moosart abzuleiten. In verschiedenen Moosarten sowie bei einer Moosart am selben Standort wurden bei anzunehmender gleicher atmosphärischer Deposition differierende Gehalte typischer Bodenelemente (Aluminium, Cer, Lanthan, Titan, Vanadium, Eisen) festgestellt. Aufgrund des geogenen Charakters der genannten Elemente sind die Moose vermutlich infolge mikroklimatischer und kleinräumiger Kontraste unterschiedlich mit Bodenpartikeln kontaminiert worden und zeigen abweichende Gehalte. Auch anhand von Waschungsexperimenten konnten diese Einflüsse beobachtet werden (Tab. 31, 32). Diese Ergebnisse erschweren die Bestimmungen der aktuellen anthropogen-atmosphärischen Einträge.

Grundsätzlich muß in Einzelfällen aus den oben genannten Gründen für Moose eine Beeinflussung durch Immissionen aus Industrieprozessen und aus natürlichen Quellen angenommen werden.

## Ausblick

Höchstwahrscheinlich sind Moose aufgrund ihrer physiologischen Eigenheiten besser als die meisten anderen Organismen zur aktuellen Überwachung von Schwermetalleinträgen geeignet, obwohl die Moosanalysen nur die relativen flächenhaften und zeitlichen Änderungen der Immissionssituation beschreiben. Sie ersparen aber somit langjährige und kostenintensive apparative Messungen.

Flechten haben die Nachteile, daß sie entweder an Bäumen wachsen und damit durch den Stammbau oder auf Steinen festsetzen und somit durch diese beeinflusst werden.

Es bestehen allerdings noch nicht gelöste Probleme hinsichtlich der geforderten Umrechnung der Moosgehalte auf die absolute Höhe der Schwermetalldepositionen auf die Fläche. Hierfür sollten auch künftig flächenbezogene Probenentnahmen durchgeführt werden und Untersuchungen zur Aufnahmekapazität (Effizienzfaktor) der verwendeten Moosarten.

Eine enge Anbindung an das UBA-Luftmeßnetz kann sicherlich die Quantifizierung der Immissionsdaten aus dem Moos-Monitoring verbessern.

Allerdings wachsen auch mit zunehmender Etablierung vom Monitoring-Programmen die Anforderungen an eine Bewertung der Ergebnisse und deren Darstellung. Zur Bewertung von chemisch - physikalischen Messungen im Rahmen der Umweltüberwachung steht eine umfangreiche Richt- und Grenzwertesammlung für die Medien Wasser, Boden und Luft zur Verfügung. Vergleichbare Angaben fehlen für die belebte Umwelt fast völlig. Die natürliche Komplexität biologischer Systeme und die auf sie wirkenden abiotischen und anthropogenen Faktoren sowie die unterschiedliche Wirkungsweise von Schadstoffgemischen erschweren die Bewertungen der Ergebnisse aus Bioindikationsverfahren erheblich. Bei Untersuchungen von Elementgehalten in biologischen Proben stellt sich die grundsätzliche Frage, welche Gehalte "normal" sind und welche immissionsbedingt erhöht sind. In der vorliegenden Arbeit erfolgte der Versuch, durch die Bestimmung der Normalbereiche der untersuchten Elemente eine Beurteilungsbasis für das Erkennen von Besonderheiten und Abweichungen zu erhalten. Diese "Normalwerte" wurden mit dem vorgestellten Bewertungsmodell aus den untersuchten Teilmodellen (Elemente) zu einer integrierenden Bewertung in Hinblick auf die Umweltgüte zusammengefaßt und in

Güteklassen dargestellt. Streng genommen kann aber hiermit unter Beachtung der o.g. moos-spezifischen Unsicherheitsfaktoren nur eine Teilqualität der Umwelt (Luftqualität) abgeleitet werden. Die hier ermittelten Ergebnisse können aber als Teilergebnis in eine Gesamtbeurteilung einbezogen werden mit dem Ziel einer zusammengefaßten medienübergreifenden Bewertung und Darstellung verschiedener Ökosysteme und Teilmodelle zu einer "gesamtökologischen Gütekarte". Zukünftig bedarf es allerdings weiteren Untersuchungen zu Bewertungen von Bioindikationsdaten hinsichtlich der Wirkungen auf Boden, Pflanze, Tier und Mensch.

Generell zeigt die vorliegende Arbeit regionale wie auch punktuelle Unterschiede in der Immissionssituation in Deutschland. Sie ermöglicht damit, Langzeit-Effekte und Entwicklungen mit geringem finanziellen Aufwand zu erkennen. Im Sinne einer allgemeinen ökologischen Umweltbeobachtung können damit die Ergebnisse dieser Arbeit die Wirkungen staatlicher Umweltschutzmaßnahmen aufzeigen sowie eine Datengrundlagen für weitere Untersuchungen zum Immissionsschutz in den Ländern liefern. Zusätzlich können Bodenkundler diese Ergebnisse nutzen, um natürliche, geogene Elementgehalte und anthropogene, technische Element-Überlagerungen und - einträge in den verschiedenen Gebieten in Deutschland auseinander zu halten.