

4. Kritische Bemerkungen und Fehlerbetrachtungen

Das durchgeführte Vorhaben zeigt erstmalig für die Bundesrepublik Deutschland eine großflächige Übersicht der Verteilung von 10 Schwermetallen. Hierbei handelt es sich aufgrund der angewendeten Probenentnahmestrategie um einen emittentfernen Untersuchungsansatz, wobei das vorrangige Ziel das Aufzeigen von Hintergrundbelastungen war. Darüber hinaus konnten in der vorliegenden Arbeit die Lage wichtiger regionaler Emissionsquellen von Schwermetallen und hierdurch beeinflusste Gebiete anhand des Moosmonitorings gezeigt werden. Bekannte Industrieareale der Bundesrepublik Deutschland wie das Ruhrgebiet, Bereiche des Saarlandes und Baden-Württembergs sowie hochindustrialisierte und urbane Gebiete Ostdeutschlands wurden dargestellt. Die geografischen Verteilungsmuster der Elementkonzentrationen wurden auf nationaler Ebene interpretiert.

Im Folgenden werden einige Punkte angeführt, die trotz der versuchten Harmonisierung der Methodik Vorbehalte für die Beurteilung der Ergebnisse aufzeigen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, daß eine Standardisierung dieser passiven Monitoringmethode innerhalb eines derartigen Untersuchungsrahmens nicht vollständig zu realisieren ist. Generell sind klimatische Einflüsse, Lageparameter, Zeitfaktoren und genetische Variabilitäten innerhalb der Organismen hauptverantwortlich für die Schwierigkeiten einer Standardisierung.

4.1 Probenentnahme

Die Zeiten der Probenentnahme wurden nicht immer eingehalten. Nach MARKERT (1989) kommt es innerhalb des Jahres aufgrund unterschiedlicher Wachstumsraten (Verdünnungseffekt) zu saisonalen Schwankungen in den Elementkonzentrationen von *Polytrichum formosum*, wobei die höchsten Konzentrationen im Winter gemessen werden. Die Probenentnahme in den neuen Ländern in 1991 fand innerhalb der beträchtlichen Zeitspanne von einem halben Jahr statt (Tab. 2).

Aufgrund der differierenden klimatischen Bedingungen in der Bundesrepublik Deutschland bilden die Moose verschiedenartige Phänotypen aus und weisen dadurch möglicherweise verschiedene Oberflächen/Volumenverhältnisse auf.

Vermutlich spielt die Oberfläche des Moooses eine weitere Rolle. Wegen der passiven Ionenaufnahme wird ein Moos mit einer großen Oberfläche pro Zeiteinheit mehr Schwermetalle aufnehmen können als ein solches mit einer kleineren.

Während der Präparation der Moose wurden unterschiedliche Wuchsformen bei gleichen Arten festgestellt. Weitere makro- und mikroklimatische Gegebenheiten der einzelnen Probenentnahmestandorte, wie z. B. unterschiedliche Niederschlagsintensitäten und -mengen sowie die chemische Zusammensetzung des Regenwassers beeinflussen den Elementgehalt von Moosen. Höhere Niederschlagsmengen können höhere Auswaschungsraten zur Folge haben. Nach GJENGEDAL & STEINNES (1990) wird beschrieben, daß die Aufnahmekapazität für Zink und Cadmium aufgrund des Ionenaustauscheffektes bei einem pH-Wert <pH 3.5 im Niederschlag sinkt.

4.2 Kartendarstellung

Im Rahmen der geplanten systematischen Probenentnahme im 25x25 km² Raster wäre es ideal gewesen, in jedem Rasterquadrat eine Probenentnahmestelle festzulegen. Aufgrund der tatsächlich unter Punkt 2.2.2 zusammengefaßten Einschränkungen zeigt die Anordnung der Probenentnahmestellen nicht immer eine flächendeckende Verteilung. Da sich die Interpolationsberechnung nach Anzahl und Lage der Meßstellen im Suchradius und der Größe des Suchradius selbst richtet, erscheinen auf den Isolinien-Elementkarten Areale (weiße Bereiche), die nicht in die Beurteilung einbezogen werden können.

Wie unter 2.5.3 beschrieben, wird beim angewandten Interpolationsverfahren ein nach Entfernung gewichteter Durchschnittswert innerhalb des Suchradius festgelegt. Bei stark differierenden Konzentrationen im Suchradius verursacht diese Mittelung eine "Glättung" der hohen und der niedrigen Elementkonzentrationen. In diesem Zusammenhang werden bei einem einzelnen hohen Meßwert im Suchradius die Umgebungsbereiche stark nach oben beeinflußt. Andererseits kann die Interpolationsberechnung bei großen Entfernungen zwischen zwei Meßstellen mit geringen Elementkonzentrationen und noch ausreichendem Suchradius zu Unterschätzungen von Bereichen führen, in denen normalerweise höhere Schwermetallgehalte zu erwarten sind. Das Verfahren stellt somit eine Annäherung an die gegebene Situation dar und kann nur in der ganzheitlichen Betrachtung die räumliche Verteilung der Schwermetallbelastung wiedergeben. Die bisherigen Ergebnisse weisen aber auch auf Flächen hin, die bei einer erneuten Untersuchung mit einer detaillierteren Probenentnahme zu erfassen sind.

Hinsichtlich der Isoliniendarstellung muß betont werden, daß durch Gebrauch von grünen und roten Farben keine Schätzungen dahingehend abgeleitet werden dürfen, ob die gemessenen Konzentrationen eine Belastung für das Ökosystem darstellen oder nicht. Weiterhin erlaubt diese Art der grafischen Darstellung keine statistischen Schlüsse auf Unterschiede zwischen Gebieten mit unterschiedlichen Farben. Diese können nur aufgrund von Originaldaten gezogen werden. Da es nicht Zielsetzung der Arbeit war, einzelne Probenentnahmestellen gegeneinander statistisch auszuwerten, wurden die meisten Proben innerhalb des Untersuchungsrahmens nur einmal vermessen.

Der Vorzug vieler Einzelmessungen ist die Entstehung eines dichteren Bildes im Gegensatz zu weniger Werten, die mehrfach gemessen wurden. In diesem Zusammenhang ist der Vorteil farbiger Isolinien Darstellungen zu sehen, denn hierdurch werden kleine und nicht systematische Variationen in den analytischen Ergebnissen unterdrückt, während großräumige Variationen in der regionalen Verteilung der Elemente anschaulich gezeigt werden können.

4.3 Lokale Variation

Die Standortvariation der verwendeten Moosarten wurde innerhalb dieses Vorhabens nicht untersucht. Hier sei auf eine Untersuchung in Holland (WOLTERBEEK et al. 1993) hingewiesen, in der jeweils 5 Unterproben von *Pleurozium schreberi* an 6 verschiedenen Standorten separat analysiert wurden. Dabei konnten für die Elemente As, Cr, Fe, Pb, V und Zn durchschnittlich relative Abweichungen von 5-9,4% bestimmt werden. Nach RÜHLING et al. (1994) wurden innerhalb Europas für die Elemente As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V und Zn durchschnittliche relative Standortvariationen von 10-20% nachgewiesen. Die Größenordnung dieser Variabilität zeigte keine Korrelation mit unterschiedlich hohen Konzentrationen.

Demgegenüber weisen in der vorliegenden Studie die Elementgehalte aller Standorte bedeutend höhere Variationsbreiten (hier bezogen auf den 80%-Wertebereich) von 222% (Zn) - 966% (Ti) auf, als die zu vermutenden lokalen Variationen. Dies impliziert gutes Ansprechen der Moose auf großräumige Unterschiede in der Schwermetallbelastung.

4.4 Ausreißereliminierung

Als wesentliches Kriterium für die Herausnahme von Extremwerten wurde Titan als Indikatorelement für Bodenkontaminationen verwendet (BROWN & BROWN 1990).

Nach Prüfung spezieller Fälle konnten hohe Titankonzentrationen im Moos bei gleichzeitig hohen Konzentrationen anderer Elemente mit entsprechenden Bodengehalten in Beziehung gebracht werden (z.B. titan- und vanadiumreiche Schwerminerale im Gestein).

Nach RÜHLING et al. (1987) kann in vegetationsarmen oder freien Gebieten mit hohen Schwermetallgehalten im Boden die Erosion von Bodenmaterial hohe Elementkonzentrationen in Moosen verursachen.

Die Methode der Ausreißereliminierung muß mit Vorbehalten betrachtet werden, da Titan nicht nur in hohen Konzentrationen im Boden vorliegt, sondern durchaus industriebedingt über den Luftweg die Pflanze beaufschlagen kann. Unter anderem weist Braunkohle beträchtliche Gehalte an Titan auf, welches über die Verbrennung ungefiltert in Form von Flugaschen und Stäuben emittiert wird.

Besonders für Ostdeutschland ist dieser Einflußfaktor nicht unwesentlich. Hinsichtlich dieser Tatsache wäre zu überlegen, Titan auch als Kriterium für staubförmige Emissionen aus der Braunkohleverfeuerung zu verwenden. Da sich das Titanproblem gegen Ende der laufenden Untersuchung konkretisierte, ist eine Quantifizierung von "Bodentitan" und "Lufttitan" mit dem vorliegenden Datenmaterial nicht durchführbar. Diese Problematik müßte durch speziellere Untersuchungen unter Einbeziehung paralleler Regen, Staub- und Bodenuntersuchungen oder Waschungsexperimente weiter verfolgt werden.

Durch das vorgegebene Nichtwaschen des Moosmaterials sowie der individuellen Säuberung während der Moospräparation, sind Bodeneinflüsse immer gegeben und können grundsätzlich den Elementgehalt im Moos beeinflussen.

4.5 Naß- und Trockendeposition

Aus den oben beschriebenen Fakten wird deutlich, daß die gemessene Elementkonzentration im Moos nicht nur, wie oft beschrieben, aus Niederschlägen (Naßdeposition) resultiert, sondern standortbedingt durch Boden, Stäube oder Flugaschen (Trockendeposition) beeinflußt werden kann. Obwohl RÜHLING et al. (1992) sehr gute Korrelationen (logarithmiert) zwischen den Depositionsraten von Cd, Cu, Fe, Ni, Pb und Zn (basierend auf Niederschlagsanalysen) und den entsprechenden Elementkonzentrationen im Moos zeigte, ist daraus das Verhältnis der beiden Depositionsformen zueinander nicht ersichtlich.

4.6 Vergleich der Arten

In Hinblick auf zwischenartliche Kalibrierungsuntersuchungen wurden nur wenige Studien durchgeführt, wobei alle auf relativ kleine Gebiete beschränkt waren (FOLKESON 1979; BOILEAU et al. 1982; SLOOF & WOLTERBEEK 1993).

In der vorliegenden Untersuchung unterlagen die entnommenen Proben den unterschiedlichsten geografischen Bedingungen. Generell schwankten die Elementkonzentrationen der gegenübergestellten Moosarten von einer Probeentnahmestelle durchschnittlich von 12,3% (Cd) bis 67,4% (Ti). Diese Streuungen beinhalten die Unsicherheiten der Probeentnahme, der Probenpräparation, der Standortvariation und der Elementanalyse. Für die unterschiedlichen Elementanreicherungen in den Moosarten sind generell unterschiedliche Aufnahmeeigenschaften verantwortlich. Nach SCHMID-GROB et al. (1993) können Akkumulationsfaktoren aus dem Vergleich von Moosdaten und Depositionsmessungen berechnet werden. ($A=D/C$, A=Akkumulationsfaktor, D=Deposition, C=Konzentration im Moos). Derartige Ergebnisse waren für die vorliegende Studie nicht verfügbar. In diesem Zusammenhang sind die durchgeführten Regressionsanalysen zu

nennen, anhand derer unterschiedliche Aufnahmeigenschaften zum Teil vermutet werden können.

In einigen Fällen wurde durch die Verwendung von Exponentialfunktionen ein besserer Korrelationskoeffizient erreicht. Dies bedeutet, daß speziell in höheren Konzentrationsbereichen die eine Moosart im Vergleich zur anderen, höhere Elementkonzentrationen aufweist. Zu diesen Ergebnissen wären weiterführende Untersuchungen notwendig. Weiterhin sind die morphologischen Unterschiede zwischen den Moosarten von Bedeutung. *Hypnum cupressiforme* ist im Vergleich zu *Pleurozium schreberi* oder *Scleropodium purum* kleiner, weniger verzweigt und weist kompaktere Polsterformen auf. Weitere Einflußfaktoren sind mikroklimatische Bedingungen, kleinstrukturelle Unterschiede am Standort, Alter und die Wachstumsrate.

Die Werte wurden vorerst ohne Umrechnungsfaktoren in den Karten dargestellt. Diese Vorgehensweise ist aus der Tatsache zu begründen, daß z. B. die ermittelten Regressionsgleichungen genaugenommen nur für den untersuchten Wertebereich innerhalb der Regressionsanalyse gelten dürfen. Insofern wären zwar Umrechnungen und Anpassungen innerhalb dieses Bereichs bei gesicherten Voraussetzungen möglich, außerhalb dieser Spanne liegende Werte dürften dagegen streng gesehen nicht in die Berechnung einfließen. Da die Wertebereiche teilweise sehr klein waren, würde eine Umrechnung nur einen geringen Teil der Elementgehalte betreffen und zu Uneinheitlichkeiten innerhalb der Gesamtbetrachtung führen. Erst durch weitere Untersuchungen mit verbessertem Datenmaterial (siehe 4.7 Punkt ⑦) können gesicherte Vorhersagen zum Zusammenhang zwischen den Arten abgeschätzt werden. Hohe Korrelationen müssen dabei auf ihre Kontinuität hin weiter verfolgt werden. Demgegenüber sollten auch schlechte Vergleichbarkeiten weiter überprüft werden, da dies noch kein Beweis dafür ist, daß wirklich keine Korrelation besteht. Z. B. kann eine stärkere Verschmutzung der einen Moosart und die damit möglich einhergehende Konzentrationsbeeinflussung den Zusammenhang verfälschen. Ließen sich bei der geplanten Wiederholungsuntersuchung in 1995 ähnliche und absicherbare Zusammenhänge feststellen, könnten bei einem Vergleich der Ergebnisse für 1991 Korrekturen vorgenommen werden.

Hinsichtlich der Artenkombinationen ist die Gegenüberstellung von *Hylocomium splendens* und *Pleurozium schreberi* aus bundesdeutscher Sicht von untergeordneter Relevanz. Zum einen flossen innerhalb des Vorhabens nur vier Standorte mit *Hylocomium splendens* als Hauptart in die Kartendarstellung ein. Andererseits gilt diese Moosart in einigen Ländern als "Rote Liste" Art. Es ist daher vorzuschlagen, diese Art aus der Prioritätenliste herauszunehmen. Ohnehin zeigt die Regressionsstatistik zwischen *Hylocomium splendens* und *Pleurozium schreberi* oft nicht signifikante Korrelationen.

Mit dieser Arbeit ist die Basis für Wiederholungsuntersuchungen im Abstand von fünf Jahren geschaffen. Das Moosmonitoring bietet die Möglichkeit, mit relativ geringen Aufwand regionale Belastungsunterschiede darzustellen und ihre langfristigen Entwicklungen zu erkennen. Andererseits ist anhand der Moosdaten allein eine Bewertung von Risiken und toxischen Wirkungen für Boden, Pflanze, Tier und Mensch nicht ohne ergänzende Paralleluntersuchungen z.B. der Standort- und Nutzpflanzenvegetation sowie durch physikalisch-chemische Meßmethoden möglich.

4.7 Empfehlungen zur Verbesserung weiterer Untersuchungen

① Die unterschiedlichen Moosmeßnetzteile sollten hinsichtlich ihrer Probandichte angepaßt und optimiert werden, damit ein gleichmäßiges Rastermeßnetz entsteht. In Problemgebieten sollte möglicherweise verdichtet werden.

② Eine bestimmte Anzahl von Probenentnahmestandorten sollten in unmittelbarer Nähe von Dauerbeobachtungsflächen der Länder und des Bundes lokalisiert werden, damit Bezug zur Standortvegetation gewährleistet ist und vergleichendes Datenmaterial zur Interpretation genutzt werden kann.

③ Zur Probenentnahme sollte auf dem Gebiet der Bryophyten qualifiziertes Personal eingesetzt werden.

④ Die Auswahl der zu beprobenden Moosarten sollte streng eingehalten werden. *Hylocomium splendens* ist aus der Liste der zum Sammeln vorgeschlagenen Moosarten herauszunehmen, da diese Art in der Bundesrepublik Deutschland nur an vier Stellen als Hauptart beprobt wurde. Möglicherweise sind andere Moosarten wie z. B. *Polytrichum commune* oder *Brachythecium rutabulum* einzusetzen.

⑤ In größeren Bundesländern sollten zur Einhaltung des Probenentnahmezeitraumes entsprechend mehr Personen die Probenentnahme durchführen.

⑥ Zur besseren Bestimmung der Standortvariation innerhalb einer oder mehrerer Art(en) sollten mindestens 5 Einzelproben von solchen Standorten analysiert werden, durch die der jeweilige Naturraum charakterisiert wird.

⑦ Hinsichtlich gesicherter Vergleichsuntersuchungen zwischen den Arten sollten Parallelbeprobungen an nicht belasteten, mittel belasteten und hoch belasteten Standorten durchgeführt werden, damit die Beurteilungsbereiche größer werden.

⑧ An Ländergrenzen benachbarter Länder innerhalb der Bundesrepublik Deutschland sowie auch zu europäischen Nachbarstaaten sollten grenzüberschreitende Probenentnahmen durchgeführt werden.

⑨ In Hinblick auf die Vergleichbarkeit der im europäischen Projekt zusammengeführten Untersuchungen werden weitere gemeinsame methodische Abstimmungen dringend für erforderlich gehalten.