

**Umweltforschungsplan  
des Bundesministers für Umwelt,  
Naturschutz und Reaktorsicherheit**

**Ökologie**

**Forschungsbericht 108 02 087**

**Monitoring der Schwermetallbelastung in der  
Bundesrepublik Deutschland  
mit Hilfe von Moosanalysen**

**von**

**Dipl. Biol. Uwe Herpin**

**Arbeitsgruppe Systemforschung  
der Universität Osnabrück**

**Projektleiter  
Prof. Dr. Helmut Lieth  
Prof. Dr. Bernd Markert**

**IM AUFTRAG  
DES UMWELTBUNDESAMTES**

**Juli 1994**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	VII
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	IX
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	XIII
<b>Abkürzungen</b> .....	XVIII
<b>1. Einleitung</b> .....	1
<b>2. Material und Methoden</b> .....	3
<b>2.1 Vorgaben</b> .....	3
2.1.1 Moosarten.....	4
2.1.2 Verteilung der Probenentnahmestellen .....	5
2.1.3 Festlegung des Probenentnahmezeitraums .....	5
2.1.4 Parallelbeprobung verschiedener Moosarten am gleichen Standort .....	5
2.1.5 Auswahl der untersuchten Elemente .....	5
<b>2.2 Durchführung</b> .....	6
2.2.1 Moosarten.....	6
2.2.2 Verteilung der Probenentnahmestellen.....	7
2.2.3 Probenentnahmezeitraum.....	8
2.2.4 Parallelbeprobung verschiedener Moosarten am gleichen Standort .....	8

<b>2.3 Probenaufbereitung und Analyse</b> .....	9
<b>2.4 Qualitätskontrolle</b> .....	10
<b>2.5 Datenauswertung</b> .....	12
2.5.1 Aufarbeitung der Rohdaten.....	12
2.5.2 Vergleichsuntersuchungen verschiedener Moosarten .....	14
2.5.3 Kartografische Darstellung .....	15
2.5.4 Weitere Darstellungsformen .....	16
<b>3. Ergebnisse und Diskussion</b> .....	18
<b>3.1 Vergleichende Betrachtung der Elementkonzentrationen in     verschiedenen Moosarten</b> .....	18
3.1.1 Vergleich der arithmetischen Mittelwerte und Konzentrationsbereiche.....	18
3.1.2 Quotientenbildung und Vorzeichentest .....	22
3.1.3 Regressionsanalysen zum Artenvergleich .....	23
<b>3.2 Elementkonzentrationen in den Moosproben</b> .....	24
3.2.1 Arsen (As).....	24
3.2.2 Cadmium (Cd).....	30
3.2.3 Chrom (Cr).....	34
3.2.4 Kupfer (Cu).....	39
3.2.5 Eisen (Fe) .....	43
3.2.6 Nickel (Ni) .....	48
3.2.7 Blei (Pb).....	53
3.2.8 Titan (Ti).....	58
3.2.9 Vanadium (V).....	62
3.2.10 Zink (Zn) .....	67
3.2.11 Zusammenfassende Betrachtung.....	71
<b>3.3 Ergebnisse anderer europäischer     Moosmonitoringprogramme</b> .....	72
<b>3.4 Korrelationsmatrices der Elementkonzentrationen</b> .....	73

<b>4. Kritische Bemerkungen und Fehlerbetrachtungen</b> .....	77
<b>4.1 Probenentnahme</b> .....	77
<b>4.2 Kartendarstellung</b> .....	78
<b>4.3 Lokale Variation</b> .....	79
<b>4.4 Ausreißereliminierung</b> .....	79
<b>4.5 Naß- und Trockendeposition</b> .....	80
<b>4.6 Vergleich der Arten</b> .....	80
<b>4.7 Empfehlungen zur Verbesserung weiterer Untersuchungen</b> .....	82
<b>5. Zusammenfassung</b> .....	84
<b>6. Summary</b> .....	85
<b>7. Literaturverzeichnis</b> .....	86
<b>Anhang A</b> (Richtlinien zur Probenentnahme, Probenentnahmeprotokoll).....	95
<b>Anhang B</b> (Artenvergleich).....	96
<b>Anhang C</b> (Europavergleich) .....	127

## **Vorwort**

Von den skandinavischen Staaten wurde 1985 erstmals ein gemeinsames Monitoringprogramm - aufbauend auf den Untersuchungen in Schweden (RÜHLING & TYLER 1973) - zur Belastung durch Schwermetalldeposition mit Hilfe von Moosanalysen durchgeführt (RÜHLING et al. 1987). Dieses Programm, das vom "Steering Body of Environmental Monitoring in the Nordic Countries" initiiert und unter Schirmherrschaft des "Nordic Council of Ministers" durchgeführt wurde, sollte 1990 auf weitere europäische Staaten ausgedehnt werden. Hierzu erfolgte 1989 in Schweden ein gemeinsames Treffen, an dem neben den skandinavischen Staaten auch die Schweiz und die Bundesrepublik Deutschland teilnahmen. Daneben erfolgten auf Betreiben von Schweden bilaterale Kontakte zu weiteren europäischen Staaten u.a. auch der DDR. Die Koordinierung lag in den Händen der Universität Lund (Rühling).

In den Ländern der Bundesrepublik Deutschland bestand für die Realisierung eines derartigen länderübergreifenden Monitoringprogrammes wegen Zuständigkeit und Aufgabenverteilung zwischen Bund und Ländern ein erheblicher Koordinierungsbedarf. Mit der Durchführung des Gesamtprojektes wurde die Universität Osnabrück, AG Systemforschung im Rahmen eines F+E Vorhabens beauftragt. Die notwendigen Abstimmungen zwischen Bund und den Ländern - hinsichtlich Auswahl der Probeflächen, Durchführung der Beprobung und Validierung der Meßdaten - erfolgte mit den zuständigen Landesbehörden und der Universität Osnabrück im Rahmen des Ländergremiums "Arbeitskreis Bioindikation/Wirkungsermittlung". Die administrative Koordination wurde vom Umweltbundesamt wahrgenommen.

In der DDR wurde 1989/90 die Planung zentral vom Institut für Forstwissenschaften in Eberswalde unter Einbeziehung des Institutes für Landwirtschaftswissenschaften in Halle durchgeführt. Erst im Verlauf des Prozesses der Wiedervereinigung Deutschlands kam es zu einer Zusammenführung der beiden deutschen Programme unter Federführung der Universität Osnabrück.

Den an der Realisierung des beispielhaft und bundesweit durchgeführten Moos-Monitoringprogrammes beteiligten Landesbehörden sei hiermit für die erfolgreiche Zusammenarbeit Dank ausgesprochen. Hierbei eingeschlossen sind die inzwischen in den neuen Ländern arbeitenden neuen Landesoberbehörden.

**Beteiligte Behörden der Länder:**

**Baden-Württemberg:** Landesanstalt für Umweltschutz, Sachgebiet Ökotoxikologie

**Bayern:** Bayerisches Landesamt für Umweltschutz

**Berlin:** Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz, Abt. III

**Brandenburg:** Landesumweltamt Brandenburg

**Hamburg:** Landesforstverwaltung

**Hessen:** Hessische Landesanstalt für Umwelt

**Mecklenburg-Vorpommern:** Landesamt für Umwelt und Natur, Abt. Naturschutz

**Niedersachsen:** Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt

**Nordrhein-Westfalen:** Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung Nordrhein-Westfalen

Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen

**Rheinland-Pfalz:** Landesamt für Umweltschutz und Gewerbeaufsicht

**Saarland:** Universität des Saarlandes, Zentrum für Umweltforschung/Biogeografie

**Sachsen:** Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie

**Sachsen-Anhalt:** Landesamt für Naturschutz und Landschaftspflege

**Schleswig-Holstein:** Landesamt für Naturschutz und Landschaftspflege

**Teilgebiet nordöstliche DDR (1990):** Institut für Forstwissenschaften, Eberswalde

**Teilgebiet südliche ehem. DDR (1992):** Institut für Ökosystemforschung, Berlin/Halle

Zusätzlich war die Durchführung dieses Projektes nur durch die Mithilfe von weiteren Personen möglich, denen der Autor auf diesem Weg danken möchte:

Herrn Prof. Dr. Å. Rühling, Universität Lund, Schweden für die Diskussionsbereitschaft innerhalb des gesamteuropäischen Projektes, Herrn Priv. Doz. Dr. P. Schramel, GSF Forschungszentrum, München/Neuherberg für die Unterstützung bei der chemischen Analytik, Herrn Dr. H. Bau, Umweltbundesamt Berlin für die nimmermüde Unterstützung bei der Bearbeitung des Gesamtvorhabens, Frau Dr. U. Sachse, Umweltbundesamt Berlin für die redaktionelle Endbearbeitung des Abschlußberichtes, den 10 Osnabrücker Studenten für die tatkräftige und langwierige Säuberung der Moose, Frau Dipl.-Biol. I. Bruns, Martin-Luther-Universität, Halle/Wittenberg für die Unterstützung in der PC-gestützten Auswertung und allen weiteren Personen, die hier nicht namentlich genannt sind.

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Beispiel einer Box- und Whiskerdarstellung.....	17
<b>Abb. 2:</b> Mittlere relative Abweichung (%) der Mediane für Arsenkonzentrationen in Moosen in den Ländern gegenüber dem Median für Arsenkonzentrationen (0,29 µg/g TS) in Moosen in der Bundesrepublik Deutschland. ....	27
<b>Abb. 3:</b> Mittlere relative Abweichung (%) der Mediane für Cadmiumkonzentrationen in Moosen in den Ländern gegenüber dem Median für Cadmiumkonzentrationen (0,31 µg/g TS) in Moosen in der Bundesrepublik Deutschland. ....	31
<b>Abb. 4:</b> Mittlere relative Abweichung (%) der Mediane für Chromkonzentrationen in Moosen in den Ländern gegenüber dem Median für Chromkonzentrationen (1,84 µg/g TS) in Moosen in der Bundesrepublik Deutschland. ....	36
<b>Abb. 5:</b> Mittlere relative Abweichung (%) der Mediane für Kupferkonzentrationen in Moosen in den Ländern gegenüber dem Median für Kupferkonzentrationen (25,5 µg/g TS) in Moosen in der Bundesrepublik Deutschland. ....	40
<b>Abb. 6:</b> Mittlere relative Abweichung (%) der Mediane für Eisenkonzentrationen in Moosen in den Ländern gegenüber dem Median für Eisenkonzentrationen (573 µg/g TS) in Moosen in der Bundesrepublik Deutschland. ....	45
<b>Abb. 7:</b> Mittlere relative Abweichung (%) der Mediane für Nickelkonzentrationen in Moosen in den Ländern gegenüber dem Median für Nickelkonzentrationen (2,4 µg/g TS) in Moosen in der Bundesrepublik Deutschland. ....	50
<b>Abb. 8:</b> Mittlere relative Abweichung (%) der Mediane für Bleikonzentrationen in Moosen in den Ländern gegenüber dem Median für Bleikonzentrationen (12,9 µg/g TS) in Moosen in der Bundesrepublik Deutschland. ....	56
<b>Abb. 9:</b> Mittlere relative Abweichung (%) der Mediane für Titankonzentrationen in Moosen in den Ländern gegenüber dem Median für Titankonzentrationen (14,1 µg/g TS) in Moosen in der Bundesrepublik Deutschland. ....	59
<b>Abb. 10:</b> Mittlere relative Abweichung (%) der Mediane für Vanadiumkonzentrationen in Moosen in den Ländern gegenüber dem Median für Vanadiumkonzentrationen (2,9 µg/g TS) in Moosen in der Bundesrepublik Deutschland. ....	64

<b>Abb. 11:</b> Mittlere relative Abweichung (%) der Mediane für Zinkkonzentrationen in Moosen in den Ländern gegenüber dem Median für Zinkkonzentrationen (50,6 µg/g TS) in Moosen in der Bundesrepublik Deutschland. ....	68
<b>Abb. 12:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Scleropodium purum</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Arsen).....	97
<b>Abb. 13:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Scleropodium purum</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Cadmium).....	98
<b>Abb. 14:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Scleropodium purum</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Chrom) .....	99
<b>Abb. 15:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Scleropodium purum</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Kupfer) .....	100
<b>Abb. 16:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Scleropodium purum</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Eisen).....	101
<b>Abb.17:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Scleropodium purum</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Nickel).....	102
<b>Abb. 18:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Scleropodium purum</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Blei).....	103
<b>Abb. 19:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Scleropodium purum</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Titan).....	104
<b>Abb. 20:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Scleropodium purum</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Vanadium) .....	105
<b>Abb. 21:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Scleropodium purum</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Zink).....	106
<b>Abb. 22:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hypnum cupressiforme</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Arsen).....	107
<b>Abb. 23:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hypnum cupressiforme</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Cadmium).....	14
<b>Abb. 24:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hypnum cupressiforme</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Chrom) .....	115



<b>Abb. 25:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hypnum cupressiforme</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Kupfer) .....	110
<b>Abb. 26:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hypnum cupressiforme</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Eisen).....	111
<b>Abb. 27:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hypnum cupressiforme</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Nickel).....	112
<b>Abb. 28:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hypnum cupressiforme</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Blei).....	113
<b>Abb. 29:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hypnum cupressiforme</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Titan).....	114
<b>Abb. 30:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hypnum cupressiforme</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Vanadium) .....	115
<b>Abb. 31:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hypnum cupressiforme</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Zink).....	116
<b>Abb. 32:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hylocomium splendens</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Arsen).....	117
<b>Abb. 33:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hylocomium splendens</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Cadmium).....	118
<b>Abb. 34:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hylocomium splendens</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Chrom) .....	119
<b>Abb. 35:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hylocomium splendens</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Kupfer) .....	120
<b>Abb. 36:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hylocomium splendens</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Eisen).....	121
<b>Abb. 37:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hylocomium splendens</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Nickel).....	122
<b>Abb. 38:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hylocomium splendens</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Blei).....	123

<b>Abb. 39:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hylocomium splendens</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Titan) .....	124
<b>Abb. 40:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hylocomium splendens</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Vanadium) .....	125
<b>Abb. 41:</b> Regressionsanalyse zwischen <i>Hylocomium splendens</i> und <i>Pleurozium schreberi</i> (Zink) .....	126

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Anzahl der Probenentnahmestellen und der jeweils entnommenen Moosarten <i>Pleurozium schreberi</i> (P.s.), <i>Scleropodium purum</i> (S.p.), <i>Hypnum cupressiforme</i> (H.c.) und <i>Hylocomium splendens</i> (H.s.) in den beteiligten Ländern .....	6
<b>Tabelle 2:</b> Entnahmezeiträume in den beteiligten Ländern .....	8
<b>Tabelle 3:</b> Anzahl und Artkombination der durchgeführten Mehrfachbeprobungen je Standort .....	9
<b>Tabelle 4:</b> Übersicht der gemessenen Elemente und der verwendeten Meßtechniken in Labor München und Labor Osnabrück.....	10
<b>Tabelle 5:</b> Mittlere relative Standardabweichungen (%) von 51 Doppelaufschlüssen in Labor München und Labor Osnabrück.....	11
<b>Tabelle 6:</b> Vergleich der Analysenergebnisse mit den Referenzwerten von Citrus leaves und Pine needles ermittelt in Labor München und Labor Osnabrück. ....	12
<b>Tabelle 7:</b> 98 Perzentil für die untersuchten Elemente in µg/g.....	13
<b>Tabelle 8:</b> Korrekturergebnisse des nationalen Datensatzes nach Anwendung der aufgestellten Kriterien. ....	14
<b>Tabelle 9:</b> Arithmetische Mittelwerte der Elementkonzentrationen (µg/g), Standardabweichungen und Konzentrationsbereiche von <i>Scleropodium purum</i> (S.p.) und <i>Pleurozium schreberi</i> (P.s.) von doppelt beprobten Probenentnahmestellen. ....	19
<b>Tabelle 10:</b> Arithmetische Mittelwerte der Elementkonzentrationen (µg/g), Standardabweichungen und Konzentrationsbereiche von <i>Hylocomium splendens</i> (H.s.) und <i>Pleurozium schreberi</i> (P.s.) von doppelt beprobten Probenentnahmestellen. ....	20
<b>Tabelle 11:</b> Arithmetische Mittelwerte der Elementkonzentrationen (µg/g), Standardabweichungen und Konzentrationsbereiche von <i>Hypnum cupressiforme</i> (H.c.) und <i>Pleurozium schreberi</i> (P.s.) von doppelt beprobten Probenentnahmestellen. ....	21

- Tabelle12:** Elementmediane der Quotienten von  
*Scleropodium purum* (S.p.)/*Pleurozium schreberi* (P.s.),  
*Hylocomium splendens* (H.s.)/*Pleurozium schreberi* (P.s.)  
und *Hypnum cupressiforme* (H.c.)/*Pleurozium schreberi* (P.s.),  
rel. Standardabweichungen (%) und Vorzeichentest (p= 0,05). ..... 22
- Tabelle13:** Bereiche der Konzentrationsquotienten von  
*Scleropodium purum* (S.p.)/*Pleurozium schreberi* (P.s.),  
*Hylocomium splendens* (H.s.)/*Pleurozium schreberi* (P.s.)  
und *Hypnum cupressiforme* (H.c.)/*Pleurozium schreberi* (P.s.)..... 23
- Tabelle 14:** Arsenkonzentrationen in Moosproben in den einzelnen Ländern. Es  
sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Maximum  
und Minimum in µg/g TS für die entnommenen Moosarten aufgeführt  
(unkorrigierter Datensatz). Moosarten: *Pleurozium schreberi* (P.s.),  
*Scleropodium purum* (S.p.), *Hypnum cupressiforme* (H.c.),  
*Hylocomium splendens* (H.s.). ..... 29
- Tabelle 15:** Cadmiumkonzentrationen in Moosproben in den einzelnen Ländern. Es  
sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Maximum  
und Minimum in µg/g TS für die entnommenen Moosarten aufgeführt  
(unkorrigierter Datensatz). Moosarten: *Pleurozium schreberi* (P.s.),  
*Scleropodium purum* (S.p.), *Hypnum cupressiforme* (H.c.),  
*Hylocomium splendens* (H.s.). ..... 32
- Tabelle 16:** Chromkonzentrationen in Moosproben in den einzelnen Ländern. Es  
sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Maximum  
und Minimum in µg/g TS für die entnommenen Moosarten aufgeführt  
(unkorrigierter Datensatz). Moosarten: *Pleurozium schreberi* (P.s.),  
*Scleropodium purum* (S.p.), *Hypnum cupressiforme* (H.c.),  
*Hylocomium splendens* (H.s.). ..... 37
- Tabelle 17:** Kupferkonzentrationen in Moosproben in den einzelnen Ländern. Es  
sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Maximum  
und Minimum in µg/g TS für die entnommenen Moosarten aufgeführt  
(unkorrigierter Datensatz). Moosarten: *Pleurozium schreberi* (P.s.),  
*Scleropodium purum* (S.p.), *Hypnum cupressiforme* (H.c.),  
*Hylocomium splendens* (H.s.). ..... 42

- Tabelle 18:** Eisenkonzentrationen in Moosproben in den einzelnen Ländern. Es sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Maximum und Minimum in  $\mu\text{g/g}$  TS für die entnommenen Moosarten aufgeführt (unkorrigierter Datensatz). Moosarten: *Pleurozium schreberi* (P.s.), *Scleropodium purum* (S.p.), *Hypnum cupressiforme* (H.c.), *Hylocomium splendens* (H.s.). ..... 46
- Tabelle 19:** Nickelkonzentrationen in Moosproben in den einzelnen Ländern. Es sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Maximum und Minimum in  $\mu\text{g/g}$  TS für die entnommenen Moosarten aufgeführt (unkorrigierter Datensatz). Moosarten: *Pleurozium schreberi* (P.s.), *Scleropodium purum* (S.p.), *Hypnum cupressiforme* (H.c.), *Hylocomium splendens* (H.s.). ..... 51
- Tabelle 20:** Bleikonzentrationen in Moosproben in den einzelnen Ländern. Es sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Maximum und Minimum in  $\mu\text{g/g}$  TS für die entnommenen Moosarten aufgeführt (unkorrigierter Datensatz). Moosarten: *Pleurozium schreberi* (P.s.), *Scleropodium purum* (S.p.), *Hypnum cupressiforme* (H.c.), *Hylocomium splendens* (H.s.). ..... 57
- Tabelle 21:** Titankonzentrationen in Moosproben in den einzelnen Ländern. Es sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Maximum und Minimum in  $\mu\text{g/g}$  TS für die entnommenen Moosarten aufgeführt (unkorrigierter Datensatz). Moosarten: *Pleurozium schreberi* (P.s.), *Scleropodium purum* (S.p.), *Hypnum cupressiforme* (H.c.), *Hylocomium splendens* (H.s.). ..... 61
- Tabelle 22:** Vanadiumkonzentrationen in Moosproben in den einzelnen Ländern.  
Es sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Maximum und Minimum in  $\mu\text{g/g}$  TS für die entnommenen Moosarten aufgeführt (unkorrigierter Datensatz). Moosarten: *Pleurozium schreberi* (P.s.), *Scleropodium purum* (S.p.), *Hypnum cupressiforme* (H.c.), *Hylocomium splendens* (H.s.). ..... 66
- Tabelle 23:** Zinkkonzentrationen in Moosproben in den einzelnen Ländern. Es sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Maximum und Minimum in  $\mu\text{g/g}$  TS für die entnommenen Moosarten aufgeführt (unkorrigierter Datensatz). Moosarten: *Pleurozium schreberi* (P.s.), *Scleropodium purum* (S.p.), *Hypnum cupressiforme* (H.c.), *Hylocomium splendens* (H.s.). ..... 69

- Tabelle 24:** 80%-Wertebereiche mit den entsprechenden Variationsbreiten (%) der ermittelten Elementkonzentrationen in der Bundesrepublik Deutschland. Es liegt der unkorrigierte Datensatz zugrunde. .... 72
- Tabelle 25:** Korrelationsmatrix (n=425) aller in den alten Ländern gemessenen Elementkonzentrationen in Moosproben ( $\mu\text{g/g}$ ) der Probenentnahme 1991. .... 73
- Tabelle 26:** Korrelationsmatrix (n=50) aller in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen gemessenen Elementkonzentrationen in Moosproben der Probenentnahme 1991/1992. .... 74
- Tabelle 27:** Korrelationsmatrix (n=117) aller in der nordöstlichen DDR gemessenen Elementkonzentrationen in Moosproben ( $\mu\text{g/g}$ ) der Probenentnahme 1990. Es fehlen die Arsen- und Cadmiumwerte. Zusätzlich erscheinen Aluminium und Kalzium. .... 74
- Tabelle 28:** Cadmiumkonzentrationen in Moosproben in europäischen Staaten. Es sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Minimum und Maximum in  $\mu\text{g/g}$  TS aufgeführt. Für die deutschen Daten liegt der korrigierte Datensatz zugrunde .....127
- Tabelle 29:** Chromkonzentrationen in Moosproben in europäischen Staaten. Es sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Minimum und Maximum in  $\mu\text{g/g}$  TS aufgeführt. Für die deutschen Daten liegt der korrigierte Datensatz zugrunde. ....128
- Tabelle 30:** Kupferkonzentrationen in Moosproben in europäischen Staaten. Es sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Minimum und Maximum in  $\mu\text{g/g}$  TS aufgeführt. Für die deutschen Daten liegt der korrigierte Datensatz zugrunde. ....129
- Tabelle 31:** Eisenkonzentrationen in Moosproben in europäischen Staaten. Es sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Minimum und Maximum in  $\mu\text{g/g}$  TS aufgeführt. Für die deutschen Daten liegt der korrigierte Datensatz zugrunde. ....130
- Tabelle 32:** Nickelkonzentrationen in Moosproben in europäischen Staaten. Es sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert, Minimum und Maximum in  $\mu\text{g/g}$  TS aufgeführt. Für die deutschen Daten liegt der korrigierte Datensatz zugrunde. ....131

- Tabelle 33:** Bleikonzentrationen in Moosproben in europäischen Staaten.  
Es sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert,  
Minimum und Maximum in  $\mu\text{g/g}$  TS aufgeführt. Für die deutschen  
Daten liegt der korrigierte Datensatz zugrunde. ....132
- Tabelle 34:** Vanadiumkonzentrationen in Moosproben in europäischen Staaten.  
Es sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert,  
Minimum und Maximum in  $\mu\text{g/g}$  TS aufgeführt. Für die deutschen  
Daten liegt der korrigierte Datensatz zugrunde. ....133
- Tabelle 35:** Zinkkonzentrationen in Moosproben in europäischen Staaten.  
Es sind die Konzentrationen als Median, arithmetischer Mittelwert,  
Minimum und Maximum in  $\mu\text{g/g}$  TS aufgeführt. Für die deutschen  
Daten liegt der korrigierte Datensatz zugrunde. ....134

## Abkürzungsverzeichnis

AAS	Atomabsorptionsspektrometrie
EMEP	European monitoring and evaluation programme
H.c.	<i>Hypnum cupressiforme</i> Hedw. s. str.
H.s.	<i>Hylocomium splendens</i> (Hedw.) B.S.G.
P.s.	<i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt.
S.p.	<i>Scleropodium purum</i> (Hedw.) Limpr.
TS	Trockensubstanz
ICP-AES	Atomemissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
As	Arsen
Cd	Cadmium
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
Fe	Eisen
Ni	Nickel
Pb	Blei
Ti	Titan
V	Vanadium
Zn	Zink



## 1. Einleitung

Die zeitlich und räumlich schleichende Akkumulation von Schwermetallen und die damit verbundene langsame Schädigung lebender Organismen macht eine sorgfältige Überwachung ihres Eintrags, des Verbleibs und der Wirkung notwendig (ERNST 1974; BOWEN 1979; KABATA-PENDIAS & PENDIAS 1984; ADRIANO 1986; FIEDLER & RÖSLER 1988; FREEDMAN 1989; LIETH & MARKERT 1990).

In den vergangenen Jahren wurde nach Methoden gesucht, die eine Kontrolle der Schwermetalldeposition ermöglichen. Es sollten Alternativen zu den herkömmlichen Untersuchungen insbesondere des Niederschlages gefunden werden, da diese oft sehr aufwendig, mit analytischen Schwierigkeiten und der Inhomogenität der Niederschlagsereignisse verbunden sind. Die neuen Methoden sollten dagegen einfach, integrierend, repräsentativ und kostengünstig sein.

Da die biologisch wirksamen immissionsbedingten Einflüsse nur über Messungen am Organismus selbst festgestellt werden können, sind vor allem Pflanzen geeignete Anzeigorganismen. Diese als Bioindikatoren benutzten Organismen übernehmen Zeigerfunktionen über die Wirkung von Luftverunreinigungen, wie z.B. Änderungen in der Populationsdynamik, Ausbildung bestimmter Schadsymptome oder/und Anreicherungen von Schadstoffen (GOODMANN & ROBERTS 1971; LITTLE & MARTIN 1974; MANNING & FEDER 1980; MARTIN & COUGHTREY 1982; STEUBING & JÄGER 1982; SCHUBERT 1985; ARNDT et al. 1987; FORSTER et al. 1990; HERTZ 1991; BAU 1992; BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 1992; ZIMMERMANN 1992; WITTIG 1993; MARKERT 1993).

Ende der 60er Jahre benutzten die schwedischen Wissenschaftler Åke Rühling und Germund Tyler Moose für das Umweltmonitoring von Schwermetallen. Sie stellten fest, daß insbesondere *Hylocomium splendens* und *Pleurozium schreberi* ausgezeichnete "Fangorganismen" für nasse und trockene Depositionen von Schwermetallen sind, so daß bestimmte Moose als Indikatoren der Schwermetallbelastung eingesetzt werden können. Eine derartige Nutzung der Moose zur Umweltüberwachung wurde seitdem systematisch ausgebaut.

Als besonderer Vorteil der weitaus meisten Moosarten stellte sich dabei ihre Eigenschaft heraus, ihren Nährstoffbedarf weitgehend ausschließlich aus der Atmosphäre zu decken, da ein echtes Wurzelsystem bzw. ein Wasserleitgewebe nicht entwickelt ist (ektohydre Moose). Die Aufnahme von Schwermetallen erfolgt somit über die Oberfläche der Pflanzen.

Nur bei wenigen Moosen wie den *Polytrichum*-Arten wird die Wasser- und damit die Schwermetallaufnahme durch einen internen Transpirationsstrom ergänzt (endohydre Moose) (RÜHLING & TYLER 1968, 1969, 1970, 1971, 1973; ELLISON et al. 1976; GROET 1976; CALLAGHAN et al. 1978; MASCHKE 1981; LOETSCHERT & WANDTNER 1982; WOLF et al. 1984; ENGELKE 1984; Steinnes 1984; THOMAS 1986;

RÜHLING et al. 1987, GLOOSCHENKO & ARAFAT 1988; MARKERT & WECKERT 1989a, b; ROSS 1990; BROWN & BROWN 1990; BURTON 1990; HERRMANN 1990; WIERSMA et al. 1990; TYLER 1990; RÜHLING et al. 1992; STEINNES 1993; MARKERT 1993; SCHMIDT-GROB et al. 1993).

In der Bundesrepublik Deutschland wurde 1990 in Anlehnung an das Monitoringprogramm der skandinavischen Staaten zur Ermittlung der Belastung durch Deposition von Schwermetallen und Arsen mit Hilfe von Moosanalysen ein entsprechendes Forschungsvorhaben begonnen, das von Bund und Ländern gemeinsam koordiniert wurde.

**Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden folgende Ziele verfolgt:**

• Installation und Erprobung eines bundesweiten Meßnetzes unter Berücksichtigung der Vorgaben des skandinavischen Moosmonitoringprogrammes

• Ermittlung des Ausmaßes der regionalen Belastung durch bestimmte Schwermetalle

• Erkennen von Problemgebieten und lokalen Emissionsquellen

• Schaffung einer Datenbasis für vergleichende Wiederholungsuntersuchungen im Abstand von fünf Jahren

• Kartografische Umsetzung der Meßdaten

Neben dem nationalen Bericht bildet die vorliegende Arbeit den deutschen Beitrag zum europäischen Projekt "Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe - estimations based on moss analysis", welches Teil des "European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP): Co-operative programme for monitoring and evaluation of the long-range transmission of air pollutants in Europe" ist (RÜHLING 1994).