

### 3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Vergleichende Betrachtung der Elementkonzentrationen in verschiedenen Moosarten

Wie im Abschnitt Moosarten (Tab. 1) dargestellt, konnte im gesamten Untersuchungsgebiet nicht nur eine Moosart beprobt werden. Um dennoch Kenntnis hinsichtlich der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Arten zu erhalten, wurden zur Bestimmung möglicher Kalibrierungsfaktoren verschiedene Testverfahren durchgeführt. Da *Pleurozium schreberi* innerhalb des Vorhabens die hauptsächlich entnommene Art darstellte, galt sie in den Prüfmethode als Bezugsgröße.

Grundlage der Vergleichsuntersuchungen sind die in Tabelle 3 dargestellten Artenkombinationen der gleichen Probenentnahmestellen mit den entsprechenden Stichprobenumfängen.

##### 3.1.1 Vergleich der arithmetischen Mittelwerte, Standardabweichungen und Konzentrationsbereiche

In den Tabellen 9,10,11 sind die arithmetischen Mittelwerte, Standardabweichungen und Konzentrationsbereiche der zu vergleichenden Moosarten von doppelt beprobten Probenentnahmestandorten gegenübergestellt.

Grundsätzlich liegen die jeweiligen Elementmittelwerte sowie die Konzentrationsbereiche in vergleichbaren Größenordnungen. Für die einzelnen Artkombinationen läßt sich feststellen:

- Die Gegenüberstellung der arithmetischen Mittelwerte zwischen *Scleropodium purum* und *Pleurozium schreberi* (Tab. 9) zeigt keine wesentlichen Differenzen zwischen diesen Arten. Aus den Konzentrationsbereichen ist zu erkennen, daß *Scleropodium purum* für As, Cu, Fe, Ni, Ti und Zn höhere Maximalkonzentrationen aufweist. Demgegenüber zeigt *Pleurozium schreberi* für Cd, Cr, Pb und V höhere Konzentrationen.
- *Hylocomium splendens* weist gegenüber *Pleurozium schreberi* (Tab. 10) bis auf Cd für alle Elementen höhere Mittelwerte auf, die innerhalb des Artvergleichs nicht stark differieren. Betrachtet man die Konzentrationsbereiche liegen die

Maximalkonzentrationen in *Hylocomium splendens* höher. Auffällig sind die Elemente Fe und Ni.

- Der Mittelwertvergleich zwischen *Hypnum cupressiforme* und *Pleurozium schreberi* (Tab. 11) zeigt keine wesentlichen Unterschiede. Hinsichtlich der Konzentrationsbereiche weist *Hypnum cupressiforme* bis auf V immer höhere Maximalkonzentrationen auf. Auffällig sind die As- und Pb-Werte.

**Tab. 9:** Arithmetische Mittelwerte der Elementkonzentrationen ( $\mu\text{g/g TS}$ ), Standardabweichungen (s) und Konzentrationsbereiche von *Scleropodium purum* (S.p.) und *Pleurozium schreberi* (P.s.) von doppelt beprobten Probenentnahmestellen.

	S.p. n=49			P.s. n=49		
	x	s	Bereich	x	s	Bereich
As	0,38	0,16	0,21 - 0,81	0,36	0,13	0,2 - 0,67
Cd	0,31	0,10	0,16 - 0,68	0,28	0,09	0,16 - 0,71
Cr	1,5	0,78	0,61 - 4,1	1,6	0,74	0,62 - 5,0
Cu	7,7	2,6	4,0 - 17,2	7,7	2,1	4,3 - 12,9
Fe	442	291	142 - 1555	479	257	149 - 1177
Ni	1,9	0,96	0,53 - 5,3	2,0	0,87	0,59 - 4,8
Pb	10,1	3,4	6,0 - 20,5	11,6	3,9	5,7 - 25,5
Ti	11,5	7,7	2,6 - 43,2	12,8	6,9	3,5 - 33,8
V	2,2	0,98	1,0 - 4,9	2,8	1,2	0,92 - 6,1
Zn	56,5	20,6	27,2 - 135	46,7	17,6	23,9 - 117

**Tab. 10:** Arithmetische Mittelwerte der Elementkonzentrationen ( $\mu\text{g/g TS}$ ), Standardabweichungen (s) und Konzentrationsbereiche von *Hylocomium splendens* (H.s.) und *Pleurozium schreberi* (P.s.) von doppelt beprobten Probenentnahmestellen.

	<b>H.s. n=11</b>			<b>P.s. n=11</b>		
	<b>x</b>	<b>s</b>	<b>Bereich</b>	<b>x</b>	<b>s</b>	<b>Bereich</b>
<b>As</b>	<b>0,37</b>	<b>0,12</b>	<b>0,23 - 0,55</b>	<b>0,32</b>	<b>0,10</b>	<b>0,19 - 0,44</b>
<b>Cd</b>	<b>0,22</b>	<b>0,04</b>	<b>0,16 - 0,31</b>	<b>0,25</b>	<b>0,03</b>	<b>0,20 - 0,32</b>
<b>Cr</b>	<b>1,8</b>	<b>1,1</b>	<b>1,1 - 4,5</b>	<b>1,5</b>	<b>0,39</b>	<b>0,97 - 2,1</b>
<b>Cu</b>	<b>9,1</b>	<b>3,0</b>	<b>4,9 - 14,4</b>	<b>8,1</b>	<b>2,2</b>	<b>4,1 - 11,5</b>
<b>Fe</b>	<b>550</b>	<b>363</b>	<b>210 - 1583</b>	<b>416</b>	<b>133</b>	<b>202 - 622</b>
<b>Ni</b>	<b>2,5</b>	<b>1,1</b>	<b>1,4 - 5,1</b>	<b>1,9</b>	<b>0,64</b>	<b>1,1 - 2,8</b>
<b>Pb</b>	<b>12,9</b>	<b>3,1</b>	<b>9,2 - 18,7</b>	<b>11,2</b>	<b>1,2</b>	<b>9,8 - 12,8</b>
<b>Ti</b>	<b>15,5</b>	<b>12,6</b>	<b>4,5 - 47</b>	<b>13,1</b>	<b>8,3</b>	<b>4,6 - 33,8</b>
<b>V</b>	<b>2,8</b>	<b>1,2</b>	<b>1,8-6,1</b>	<b>2,5</b>	<b>0,70</b>	<b>1,5 - 4,1</b>
<b>Zn</b>	<b>44,1</b>	<b>14,4</b>	<b>26,5 - 81,6</b>	<b>40,8</b>	<b>8,5</b>	<b>27,2 - 52,4</b>

**Tab. 11:** Arithmetische Mittelwerte der Elementkonzentrationen ( $\mu\text{g/g TS}$ ), Standardabweichungen (s) und Konzentrationsbereiche von *Hypnum cupressiforme* (H.c.) und *Pleurozium schreberi* (P.s.) von doppelt beprobten Probenentnahmestellen.

	H.c.			P.s.		
	x	s	Bereich	x	s	Bereich
As	0,45	0,50	0,21 - 2,3	0,38	0,20	0,21 - 0,93
Cd	0,39	0,30	0,20 - 1,7	0,33	0,14	0,16 - 0,78
Cr	1,3	0,86	0,62 - 3,6	1,6	0,75	0,62 - 3,3
Cu	8,0	2,7	4,6 - 14,8	8,1	2,4	4,5 - 12,9
Fe	484	276	180 - 1340	507	268	149 - 1327
Ni	2,6	1,3	0,65 - 5,5	2,05	0,95	0,59 - 4,1
Pb	19,4	27,0	5,3 - 145	16,6	14,8	5,7 - 80,5
Ti	15,1	12,9	6 - 68,2	15,80	11,20	3,92 - 48
V	2,9	1,1	1,2 - 5,4	3,1	1,2	1,3 - 6,1
Zn	48,2	14,9	30,4 - 81,4	41,9	9,7	23,9 - 61,8

Obwohl sich die Mittelwerte und die Konzentrationsbereiche in den meisten Fällen nur geringfügig unterscheiden, bedeutet dies nicht, daß die gegenübergestellten Moosarten auf dieser Beurteilungsebene als vergleichbar anzusehen sind. Die zu vergleichenden Konzentrationen können stark schwanken, im Durchschnitt aber einen ähnlichen Mittelwert aufweisen. Somit ist die Ermittlung von durchschnittlichen Kalibrierungsfaktoren z.B. aus dem Verhältnis zweier Mittelwerte mit diesem Verfahren in Frage zu stellen.

### 3.1.2 Quotientenbildung und Vorzeichentest

Ideal wäre, wenn die Quotienten aus den Konzentrationswerten der zu vergleichenden Moosarten für alle Elemente 1 ergeben würden. Zur Kontrolle wurden für jedes Element die Quotienten gebildet und die Mediane dieser Quotienten berechnet. Unter Zugrundelegung eines hypothetischen Medians von 1 (gute Vergleichbarkeit) ergab der anschließende Vorzeichentest ( $p=0,05$ ) die folgenden Resultate (Tab. 12):

**Tab. 12:** 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 (s %) und Vorzeichentest ( $p=0,05$ ). \* = signifikant, n.s. = nicht signifikant.

	Median S.p./P.s.	s %	p= 0,05	Median H.s./P.s.	s %	p= 0,05	Median H.c./P.s.	s %	p= 0,05
As	0,92	31	n.s.	1,26	32,2	n.s.	1,08	63,9	n.s.
Cd	1,12	16,4	n.s.	0,88	12,3	n.s.	1,04	39,2	n.s.
Cr	0,94	25	n.s.	1,06	37,2	n.s.	1,09	23,8	n.s.
Cu	0,98	17	n.s.	1,06	16,7	n.s.	1,01	17,1	n.s.
Fe	0,87	31,5	n.s.	1,15	46,9	n.s.	0,97	30	n.s.
Ni	0,91	32,1	n.s.	1,27	30,3	n.s.	1,24	31,5	n.s.
Pb	0,85	15,7	*	1,16	16,5	n.s.	1,05	55,2	n.s.
Ti	0,87	37,3	n.s.	1,19	67,4	n.s.	0,93	42	n.s.
V	0,81	27,3	*	1,15	20,8	n.s.	0,92	25,4	n.s.
Zn	1,16	22,6	*	1,00	22,1	n.s.	1,14	18,4	*

- Für S.p./P.s zeigt der Vorzeichentest bei Blei und Vanadium signifikant kleinere Mediane als 1 und für Zink einen signifikant höheren Median als 1. Die anderen Elemente weisen keine signifikant unterschiedlichen Mediane von 1 auf.
- Für H.s./P.s. ergab der Vorzeichentest bei allen betrachteten Elementen nicht signifikant unterschiedliche Mediane von 1.
- Für H.c./P.s. zeigt der Vorzeichentest mit einer Ausnahme für alle Elemente nicht signifikant unterschiedliche Mediane von 1 Für Zink ist der Median signifikant höher als 1.

Für eine Korrektur der Werte nach oben oder nach unten wäre nur die Verwendung der Elementmediane der Artenkombinationen zulässig, die signifikant verschieden von 1 sind. Hinsichtlich dieser Fälle variieren die Quotienten insgesamt um 15,5%-27,3% (Tab.

12). Die anderen Medianvergleiche zeigen keine signifikanten Unterschiede von 1 und lassen daher gute Übereinstimmung vermuten. Hier sei aber auf die teilweise hohen Streuungsbereiche 12,3% - 67,4% (Tab. 12, 13) hingewiesen, die den Versuch der Vergleichbarkeit in Frage stellen.

**Tab. 13:** 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.).

	<b>S.p./P.s. Quotientenbereich</b>	<b>H.s./P.s. Quotientenbereich</b>	<b>H.c./P.s. Quotientenbereich</b>
<b>As</b>	<b>0,57 - 2,05</b>	<b>0,58 - 1,83</b>	<b>0,33 - 2,47</b>
<b>Cd</b>	<b>0,66 - 1,59</b>	<b>0,69 - 1,10</b>	<b>0,50 - 2,19</b>
<b>Cr</b>	<b>0,40 - 2,04</b>	<b>0,69 - 2,16</b>	<b>0,50 - 1,62</b>
<b>Cu</b>	<b>0,56 - 1,68</b>	<b>0,76 - 1,46</b>	<b>0,55 - 1,56</b>
<b>Fe</b>	<b>0,43 - 1,96</b>	<b>0,76 - 3,26</b>	<b>0,41 - 1,84</b>
<b>Ni</b>	<b>0,20 - 1,92</b>	<b>0,82 - 2,14</b>	<b>0,72 - 2,55</b>
<b>Pb</b>	<b>0,54 - 1,20</b>	<b>0,87 - 1,47</b>	<b>0,46 - 1,80</b>
<b>Ti</b>	<b>0,18 - 2,08</b>	<b>0,30 - 4,39</b>	<b>0,48 - 2,41</b>
<b>V</b>	<b>0,31 - 1,73</b>	<b>0,76 - 1,49</b>	<b>0,42 - 1,71</b>
<b>Zn</b>	<b>0,78 - 2,91</b>	<b>0,82 - 2,00</b>	<b>0,86 - 1,73</b>

### 3.1.3 Regressionsanalysen zum Artenvergleich

Die Verwendung der linearen oder exponentiellen Regressionsgleichungen zur Umrechnung und Anpassung aller *Scleropodium* -, *Hypnum* oder *-Hylocomium*-Werte ist mit dem vorliegendem Datenmaterial vorerst nur mit Vorbehalten zu betrachten (Abbildungen 13-42, Anhang C). Generell besteht hinsichtlich der Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Moosarten weiterer Forschungsbedarf.

Aufgrund vieler nicht vollständig gesicherter Vorhersagen und Einschränkungen bei den Regressionsanalysen werden im Folgenden die Schwermetallgehalte der jeweilig beprobten Moosart ohne Umrechnung in den Karten und Tabellen dargestellt (vergleiche 4.6).

## 3.2 Elementkonzentrationen in den Moosproben

### 3.2.1 Arsen (As)

- **Eigenschaften**

Das als Halbmetall geltende Arsen (Ordnungszahl 33, rel. Atommasse 74,9) kommt elementar bei Zimmertemperatur als sogenanntes "graues" und "gelbes" Arsen vor. Die stabile Form ist das metallisch grau-glänzende Arsen mit einer Dichte von 5,73 g/cm<sup>3</sup> bei 28 °C. Die Modifikation des gelben Arsens hat eine Dichte von 2,03 g/cm<sup>3</sup> bei 18 °C und ist instabil. Die technisch und toxikologisch besonders wichtigen Arsenverbindungen sind Arsentrioxid (Arsenik, As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) und Arsenwasserstoff (Arsin, AsH<sub>3</sub>). Allgemein sind 5-wertige As-Verbindungen geringer toxisch als 3-wertige. Arsen ist für manche Organismen essentiell (STREIT 1991; NEUMÖLLER 1979).

- **Vorkommen, Produktion, Emission**

Gediegen kommt Arsen als Scherbenkobalt (Fliegenstein) vor und ist Bestandteil von mindestens 245 Mineralien meist in Form von Sulfiden und hier oft assoziiert mit Ag, Co, Cu, Fe, Pb, Ni und Sb. Das wichtigste Mineral ist Arsenkies (FeAsS) (ZIEMACKI et al. 1989; FOWLER 1983). In der Erdkruste finden sich durchschnittlich 3 µg/g Arsen (LEONARD 1991). Böden über Sulfidlagerstätten können dagegen mehrere Hundert µg/g aufweisen. In kontaminierten Gebieten wurden bis zu 2500 µg/g nachgewiesen (KABATA-PENDIAS & PENDIAS 1984; ZIEMACKI et al. 1989). Nach MARKERT (1992) wird der mittlere Gehalt in Pflanzen auf 0,02 µg/g - 1,5 µg/g geschätzt.

Steinkohle enthält mittlere Konzentrationen von 17,7 (0,5 - 93) µg/g, Braunkohle bis zu 1500 µg/g. Die Durchschnittsgehalte von Erdöl betragen 0,26 mg/l, von Benzin 0,0015 mg/l (FOWLER 1983; LEONARD 1991). Nach DARBINJAN (1988) ergeben sich für Braunkohlen ostelbischer Lagerstätten Schätzwerte von 14,5 (0,2-22) µg/g. Es ist bekannt, daß Braunkohlen aus nordtschechischen Lagerstätten sehr viel mehr Arsen enthalten können. Arsen wird vor allem als Nebenprodukt der Kupfer,- Blei,- Gold,- und Nickelschmelze gewonnen.

An Emissionen tragen neben natürlichen Prozessen (vulkanische Aktivitäten) die Verarbeitung sulfidischer Erze (Buntmetallindustrie), die industrielle Verwendung von Arsenverbindungen bzw. deren direkte Ausbringung als Pestizide und die Kohleverbrennung (besonders qualitativ geringwertige Braunkohle) erheblich bei (NRIAGU & PACYNA 1988;

ZIEMACKI et al. 1989). Insbesondere in Flugaschen von Kohlekraftwerken reichert sich Arsen bis zu 440 µg/g an (FOWLER 1983). In der Luft kommt Arsen vor allem als Arsentrioxid (As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) vor, mit Konzentrationen von 1-10 ng/m<sup>3</sup> in ländlichen Gegenden und 20 ng/m<sup>3</sup> in urbanen Gebieten. In der Nähe von Metallhütten und Kohlekraftwerken können die Konzentrationen 1000 ng/m<sup>3</sup> und mehr erreichen (LEONARD 1991). SIEWERS & ROOSTAI (1990) ermittelten im Harz von November 1987 - Dezember 1989 Gesamtdepositionen (naß und trocken) für Arsen von 11,4 µg/m<sup>2</sup> \* d im Fichtenaltbestand und von 2,8 µg/m<sup>2</sup> \* d im benachbarten Freiland.

- **Ergebnisbeschreibung**

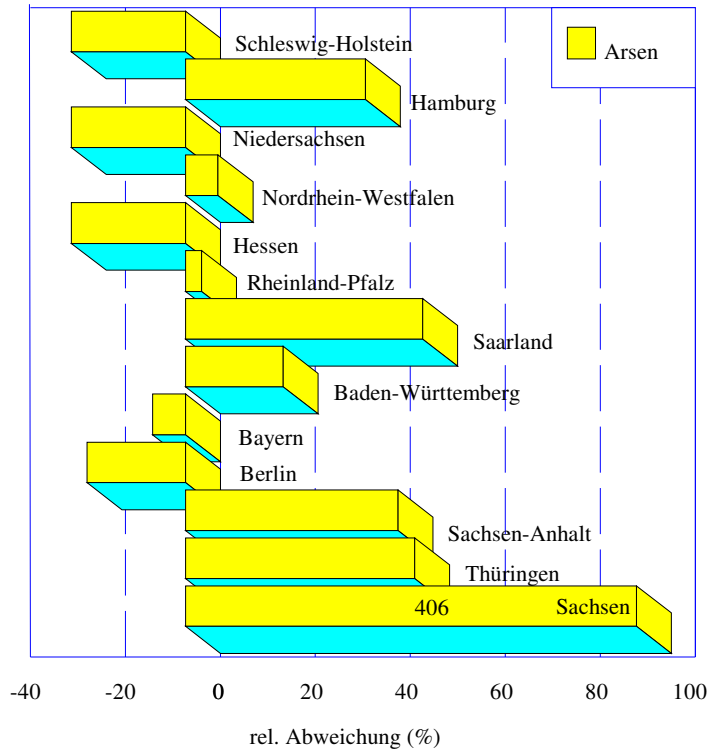
Die höchsten Arsenwerte wurden im Süden Ostdeutschlands im Bereich der tschechisch-deutschen Grenze festgestellt. In diesem Gebiet ist beiderseits der Grenze eine hohe Anzahl an Braunkohlekraftwerken, metallverarbeitender und chemischer Industrie ohne entsprechende Filtertechniken lokalisiert. Einen weiteren Emissionsfaktor stellt die private Verwendung von Braunkohle als Heizmaterial dar. Die hohen Arsenwerte im Bereich von Freiberg und Aue sind durch industriebedingte Immissionen der hier ansässigen Nickelhütten und Buntmetallindustrie erklärbar. (Umweltbericht für den Freistaat Sachsen 1991). Der Maximalwert von 15,7 µg/g ist nach Prüfung vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie (schriftl. Mitteilung Herr Andre) einem Gebiet mit hoher Dichte an metallverarbeitender Industrie und Kraftwerken zuzuordnen und gilt als Problemgebiet für As, Ni und Cr. Eine größenordnungsmäßig ähnlich hohe Konzentration (über 1 µg/g) wurde im Braunkohletagebauegebiet des Ruhrgebiets (Landkreis Bergheim-Erfthkreis) festgestellt. Der vergleichsweise hohe Arsenwert von 5,37 µg/g in Baden-Württemberg (Schönau) wird von der Landesanstalt für Umweltschutz (schriftl. Mitteilung Frau Dr. Murmann-Kristen) in erster Linie als nicht plausibel eingestuft, könnte jedoch auf Rodentizidausbringung zurückzuführen sein. Erhöhte Werte im westlichen Deutschland, aber im Vergleich zum Südosten Deutschlands bedeutend geringer, wurden in dicht besiedelten und hoch industrialisierten Bereichen des Ruhrgebiets, des Rhein-Main/Rhein-Neckar Gebiets und im Norden der Bundesrepublik Deutschland ermittelt.



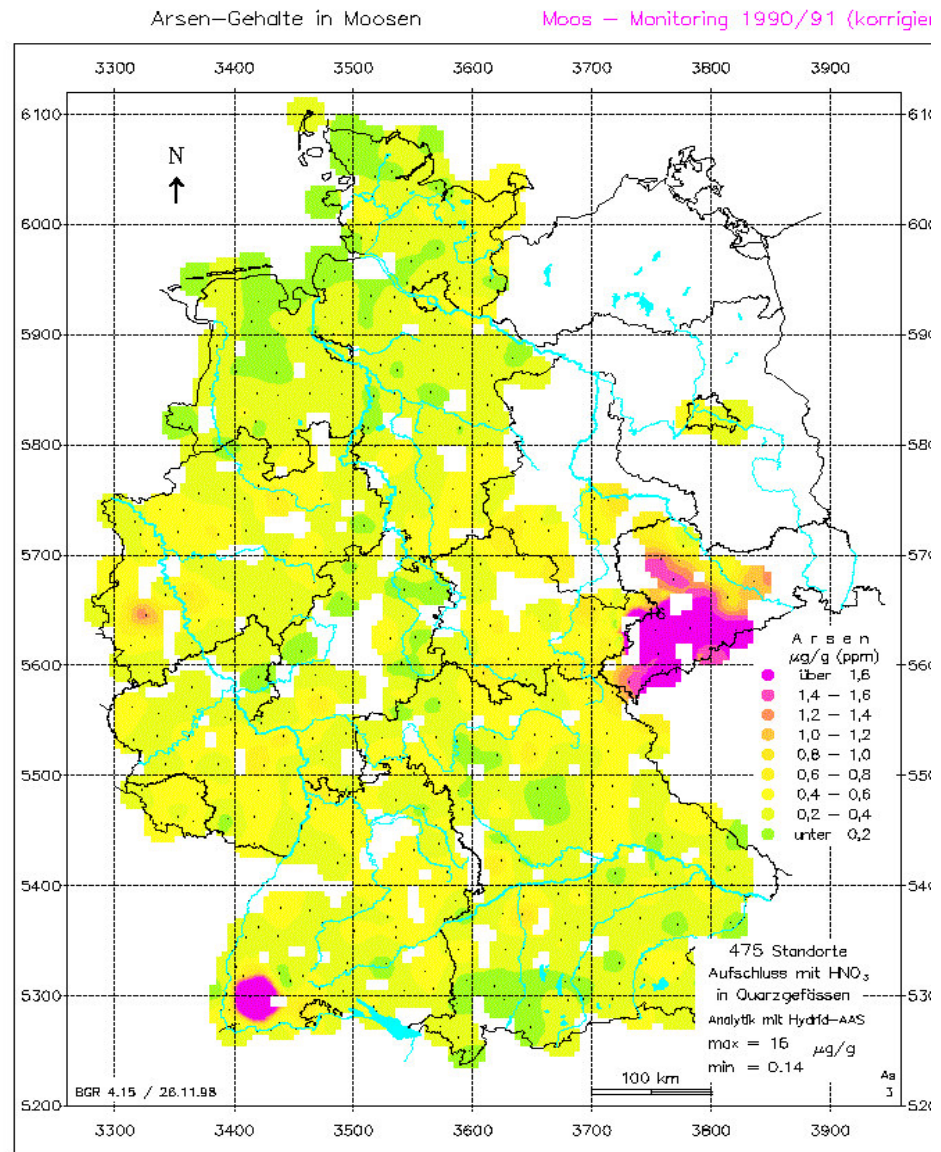
Wie aus Abb. 2 zu erkennen ist, zeigen die mittleren relativen Abweichungen vom Median für Arsenkonzentrationen in Moosen in der Bundesrepublik Deutschland, daß in Ländern mit bekanntermaßen hoher Dichte an Industrieansiedlungen und Kohlekraftwerken die Arsenmediane höher liegen. Insbesondere das Land Sachsen zeigt die höchste relative Abweichung (406%) gegenüber dem Median für Arsenkonzentrationen in der Bundesrepublik Deutschland. Generell reichen die Werte des unkorrigierten Datensatzes von insgesamt 0,08 µg/g - 15,7 µg/g mit einem Median von 0,29 µg/g.

Zu diesen Ergebnissen kommentiert die BGR-Außenstelle Berlin (schriftliche Mitteilung, Dr. Birke):

"Die anomalen As-Konzentrationen in den Moosen des Erzgebirges verhalten sich deckungsgleich zu den Ergebnissen der Boden- und Bachsedimentgeochemie. Sie indizieren die an die Granite gebundenen Mineralisationen der Ost- und Westergebirgischen Teilplutone sowie die anthropogene Überprägung durch den alten und rezenten Bergbau (Pb-Zn, Sn, U). Im Ergebnis der regionalen geochemischen Bachsedimentgeochemie wird das Erzgebirge durch flächenhaft erhöhte Untergrundgehalte > 30 µg/g abgebildet, denen lokale Maxima >300 µg/g z.B. im Freiburger Raum (Mulden Hütte, Arsenhütte) infolge des hohen atmosphärischen Eintrages aufgelagert sind. Die Arsen-Verteilung in den Moosen zeigt, daß sich die Arsenkontaminationen nicht nur auf die Aufbereitungsstandorte sowie Ablagerungen und Transportwege von Erzen und Abgängen beschränken, sondern eine großflächige anthropogene Beeinflussung des exogenen geochemischen Feldes im Gebirge vorliegt. Die anomalen As-Gehalte im Erzgebirge haben neben einer geogenen vor allem mit der metallurgischen Verarbeitung dieser Erze über Jahrhunderte eine hohe anthropogene Belastung des Bodens in diesem Gebiet verursacht. Der überwiegende Teil liegt als Arsen (5+) gebunden vor."



**Abb. 2:** Mittlere relative Abweichung (%) der Mediane für Arsenkonzentrationen in Moosen in den Ländern gegenüber dem Median für Arsenkonzentrationen ( $0,29 \mu\text{g/g TS}$ ) in Moosen in der Bundesrepublik Deutschland.



**Tab. 14:** Arsenkonzentrationen 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.).

Land	Moosarten	n	Minimum ( $\mu\text{g/g}$ )	Maximum ( $\mu\text{g/g}$ )	Median ( $\mu\text{g/g}$ )	Mittelwert ( $\mu\text{g/g}$ )
Schleswig-Holstein	P.s.	19	0,10	0,51	0,20	0,21
	S.p.	10	0,10	0,57	0,22	0,28
	H.c.	12	0,10	0,49	0,29	0,31
	<b>Gesamt</b>	<b>41</b>			<b>0,22</b>	<b>0,26</b>
Hamburg	P.s.	4	0,20	0,45	0,40	0,36
	<b>Gesamt</b>	<b>4</b>			<b>0,40</b>	<b>0,36</b>
Niedersachsen	P.s.	72	0,09	0,61	0,22	0,22
	S.p.	6	0,11	0,35	0,25	0,24
	H.c.	4	0,24	0,46	0,34	0,34
	<b>Gesamt</b>	<b>82</b>			<b>0,22</b>	<b>0,23</b>
Nordrhein-Westfalen	P.s.	30	0,20	0,58	0,31	0,33
	S.p.	20	0,22	1,23	0,32	0,43
	H.c.	4	0,30	0,66	0,52	0,50
	H.s.	1	0,10	0,10	0,10	0,10
	<b>Gesamt</b>	<b>55</b>			<b>0,31</b>	<b>0,38</b>
Hessen	P.s.	11	0,10	0,71	0,27	0,29
	S.p.	12	0,09	0,41	0,10	0,18
	H.c.	2	0,23	0,45	0,34	0,34
	H.s.	1	0,27	0,27	0,27	0,27
	<b>Gesamt</b>	<b>26</b>			<b>0,22</b>	<b>0,26</b>
Rheinland-Pfalz	P.s.	26	0,10	0,67	0,30	0,33
	S.p.	6	0,10	0,66	0,34	0,36
	<b>Gesamt</b>	<b>32</b>			<b>0,30</b>	<b>0,33</b>
Saarland	P.s.	4	0,24	0,47	0,44	0,40
	S.p.	2	0,29	0,46	0,38	0,38
	<b>Gesamt</b>	<b>6</b>			<b>0,44</b>	<b>0,39</b>
Baden-Württemberg	P.s.	7	0,10	0,49	0,34	0,31
	S.p.	2	0,10	0,25	0,18	0,18
	H.c.	49	0,10	5,37	0,36	0,48
	H.s.	1	0,35	0,35	0,35	0,35
	<b>Gesamt</b>	<b>59</b>			<b>0,35</b>	<b>0,44</b>
Bayern	P.s.	98	0,09	0,68	0,26	0,27
	S.p.	17	0,08	0,90	0,35	0,37
	H.c.	2	0,10	0,48	0,29	0,29
	H.s.	1	0,29	0,29	0,29	0,29
	<b>Gesamt</b>	<b>118</b>			<b>0,27</b>	<b>0,29</b>
Berlin	P.s.	3	0,22	0,42	0,23	0,29
	<b>Gesamt</b>	<b>3</b>			<b>0,23</b>	<b>0,29</b>
Sachsen-Anhalt	P.s.	6	0,22	0,72	0,39	0,45
	S.p.	6	0,34	0,91	0,47	0,54
	<b>Gesamt</b>	<b>12</b>			<b>0,42</b>	<b>0,50</b>
Thüringen	P.s.	10	0,37	0,67	0,55	0,52
	S.p.	11	0,21	1,13	0,32	0,44
	H.c.	1	0,88	0,88	0,88	0,88
	<b>Gesamt</b>	<b>22</b>			<b>0,43</b>	<b>0,50</b>
Sachsen	P.s.	9	0,47	2,29	1,41	1,31
	S.p.	7	0,28	15,90	1,49	3,41
	<b>Gesamt</b>	<b>16</b>			<b>1,47</b>	<b>2,23</b>
nordöstl. DDR	P.s.	117		Keine	Arsen	Messung
	<b>Gesamt</b>	<b>117</b>				

### 3.2.2 Cadmium (Cd)

- **Eigenschaften**

Cadmium (Ordnungszahl 48, rel. Atommasse 112,4) ist ein silberweißes, glänzendes und weiches Schwermetall mit einer Dichte von  $8,64 \text{ g/cm}^3$ . Aufgrund des hohen Dampfdruckes oxidiert es in der Luft schnell zu Cadmiumoxiden, welches sich bevorzugt an relativ kleinen Aerosolpartikeln von unter 2 mm Durchmesser anlagert.

- **Vorkommen, Produktion, Emission**

Cadmiumminerale (z.B. CdS) kommen sehr selten vor. Hauptsächlich findet es sich in Zinkmineralien wie Zinkblende (ZnS) mit Cadmiumgehalten von 0,1-2,0% und in Galmei ( $\text{ZnCO}_3$ ) mit Maximalwerten bis zu 5%. Phosphate weisen im Mittel einen Cadmiumgehalt von annähernd  $15 \text{ } \mu\text{g/g}$  auf (STOEPLER 1991). Die Cadmiumkonzentration in der Erdkruste wird auf durchschnittlich  $0,1 \text{ } \mu\text{g/g}$  geschätzt und kann in der Nähe metallverarbeitender Industrie einige  $100 \text{ } \mu\text{g/g}$  aufweisen (STREIT 1991). Die Cadmiumkonzentrationen in fossilem organischen Material differieren stark. Für Steinkohle und Braunkohle werden mittlere Konzentrationen bis  $2 \text{ } \mu\text{g/g}$  berichtet, während der Cadmiumkonzentration von Rohöl gering ( $<1 \text{ } \mu\text{g/g}$ ) ist (STOEPLER 1991). Nach MARKERT (1992) wird für Pflanzen eine mittlere Konzentration von 0,03-0,5  $\mu\text{g/g}$  angegeben. Die von MARKERT (1991) veröffentlichten Basisdaten für ein mittelbelastetes Moos (*Polytrichum commune*) in Zentraleuropa beschreiben eine mittlere Konzentration von  $0,2 \text{ } \mu\text{g/g Cd}$ .

Cadmium wird zu 95% aus cadmiumreichen Nebenprodukten der Zinkverhüttung produziert. STOEPLER (1991) gibt im Mittel annähernd 3 kg Cadmium pro produzierter Tonne Zink an.

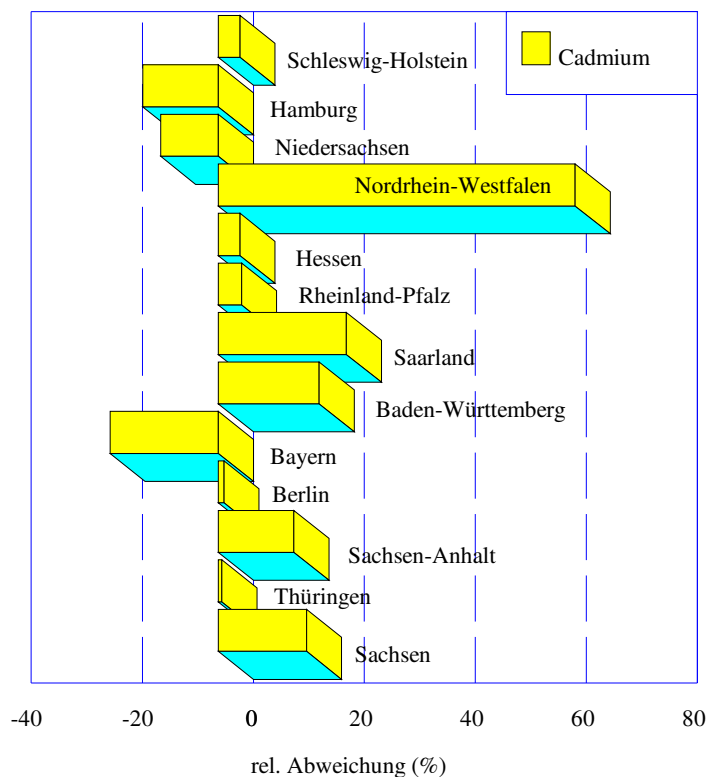
Cadmium-Emissionen sind vor allem auf Buntmetallproduktion und -verarbeitung, Verbrennung fossiler Brennstoffe und Müll sowie Eisen- und Stahlerzeugung zurückzuführen. (NRIAGU & PACYNA 1988; STOEPLER 1991; ZIEMACKI et al. 1989).

In der Naßdeposition variieren die Gehalte in Abhängigkeit von ländlichen zu hoch industrialisierten Gebieten von  $<0,05 \text{ mg/l}$  bis  $5 \text{ mg/l}$ . JOST (1984) berichtet von mittleren Cadmiumgehalten in der Trockendeposition der Bundesrepublik Deutschland. Danach werden für ländliche Gebiete Depositionsraten von  $0,5 \text{ } \mu\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$ , für gering belastete Gebiete  $2,0 \text{ } \mu\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$  und für stark belastete Areale  $6,0 \text{ } \mu\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$  geschätzt. SIEWERS & ROOSTAI (1990) ermittelten im Harz von November 1987 - Dezember 1989 Gesamtdepositionen (naß und trocken) für Cadmium von  $2,5 \text{ } \mu\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$  im Fichtenaltbestand und von  $0,7 \text{ } \mu\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$  im benachbarten Freiland.

## • Ergebnisbeschreibung

Großräumig erhöhte Cadmiumkonzentrationen wurden vorwiegend im Ruhrgebiet mit einer Vielzahl an Zink-, Kupfer- und Eisenhütten, Ö raffinerien und chemischen Industriezweigen festgestellt. Ferner zeigen die urbanen und hoch industrialisierten Umgebungsbereiche von Stuttgart, die historische Erzabbauregion des Harzes und die Einflußgebiete von Freiberg/Aue mit industriebedingten Cadmiumemissionen der hier ansässigen Buntmetallindustrie hohe Konzentrationen. Aufgrund der Tatsache, daß Cadmium als Nebenprodukt bei der Zinkverhüttung anfällt, finden sich in vielen Fällen gute Übereinstimmungen der Ansiedlung von Zinkverhüttung mit hohen Zinkkonzentrationen. Generell geringere Hintergrundbelastungen konnten in Bayern und Niedersachsen gemessen werden.

Wie in Abb. 4 erkennbar ist, zeigt besonders das Land Nordrhein-Westfalen gegenüber dem Median für Cadmiumkonzentrationen in der Bundesrepublik Deutschland eine mittlere relative Abweichung von über 60% und deutet damit auf die o.g. hochindustrialisierte Wirtschaftsstruktur hin. Allgemein reichen die Werte des unkorrigierten Datensatz von 0,13 µg/g bis 0,87 µg/g mit einem Median von 0,31 µg/g.



**Abb. 3:** 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.

**Tab. 15:** Cadmiumkonzentrationen 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.).

Land	Moosarten	n	Minimum ( $\mu\text{g/g}$ )	Maximum ( $\mu\text{g/g}$ )	Median ( $\mu\text{g/g}$ )	Mittelwert ( $\mu\text{g/g}$ )
Schleswig-Holstein	P.s.	19	0,13	0,55	0,26	0,23
	S.p.	10	0,26	0,41	0,32	0,33
	H.c.	12	0,18	0,73	0,41	0,42
	<b>Gesamt</b>	<b>41</b>			<b>0,32</b>	<b>0,34</b>
Hamburg	P.s.	4	0,23	0,45	0,27	0,30
	<b>Gesamt</b>	<b>4</b>			<b>0,27</b>	<b>0,30</b>
Niedersachsen	P.s.	72	0,16	0,49	0,27	0,27
	S.p.	6	0,19	0,47	0,32	0,32
	H.c.	4	0,25	0,45	0,33	0,34
	<b>Gesamt</b>	<b>82</b>	-	-	<b>0,28</b>	<b>0,28</b>
Nordrhein-Westfalen	P.s.	30	0,26	0,75	0,52	0,50
	S.p.	20	0,26	0,87	0,50	0,53
	H.c.	4	0,45	0,75	0,54	0,57
	H.s.	1	0,36	0,36	0,36	0,36
	<b>Gesamt</b>	<b>55</b>			<b>0,51</b>	<b>0,51</b>
Hessen	P.s.	11	0,16	0,58	0,32	0,32
	S.p.	12	0,20	0,45	0,33	0,32
	H.c.	2	0,29	0,32	0,30	0,30
	H.s.	1	0,26	0,26	0,26	0,26
	<b>Gesamt</b>	<b>27</b>			<b>0,32</b>	<b>0,33</b>
Rheinland-Pfalz	P.s.	26	0,20	0,45	0,32	0,32
	S.p.	6	0,18	0,52	0,39	0,37
	<b>Gesamt</b>	<b>32</b>	-		<b>0,32</b>	<b>0,33</b>
Saarland	P.s.	4	0,29	0,47	0,38	0,38
	S.p.	2	0,33	0,54	0,44	0,44
	<b>Gesamt</b>	<b>6</b>			<b>0,38</b>	<b>0,40</b>
Baden-Württemberg	P.s.	7	0,23	0,43	0,31	0,32
	S.p.	2	0,27	0,29	0,29	0,28
	H.c.	49	0,21	0,68	0,38	0,40
	H.s.	1	0,28	0,28	0,28	0,28
	<b>Gesamt</b>	<b>59</b>			<b>0,36</b>	<b>0,39</b>
Bayern	P.s.	98	0,13	0,49	0,24	0,25
	S.p.	17	0,14	0,68	0,27	0,31
	H.c.	2	0,30	0,42	0,36	0,36
	H.s.	1	0,45	0,45	0,45	0,45
	<b>Gesamt</b>	<b>118</b>			<b>0,25</b>	<b>0,26</b>
Berlin	P.s.	3	0,27	0,35	0,31	0,31
	<b>Gesamt</b>	<b>3</b>			<b>0,31</b>	<b>0,31</b>
Sachsen-Anhalt	P.s.	6	0,29	0,51	0,37	0,38
	S.p.	6	0,21	0,73	0,33	0,42
	<b>Gesamt</b>	<b>12</b>			<b>0,35</b>	<b>0,40</b>
Thüringen	P.s.	10	0,21	0,49	0,32	0,34
	S.p.	11	0,17	0,49	0,25	0,32
	H.c.	1	0,41	0,41	0,41	0,41
	<b>Gesamt</b>	<b>22</b>	-		<b>0,31</b>	<b>0,32</b>
Sachsen	P.s.	9	0,31	0,78	0,35	0,44
	S.p.	7	0,24	0,69	0,37	0,40
	<b>Gesamt</b>	<b>16</b>			<b>0,36</b>	<b>0,42</b>
nordöstl. DDR	P.s.	117		Keine	Cadmium	Messung
	<b>Gesamt</b>	<b>117</b>				

