

Originalarbeiten

Schwerpunktthema: Ökologische Situation der Region Leipzig-Halle

Teil I: Immissionsmuster luftgetragener Schwermetalle und Bioelemente

L. WEIßFLOG, K. WIENHOLD, K.-D. WENZEL, G. SCHÜÜRMAN

Teil II: Modellierung der Partikelgröße der Flugstäube

L. WEIßFLOG, W. ROLLE, K.-D. WENZEL, R. KÜHNE, G. SCHÜÜRMAN

Teil III: Ökotoxikologische Charakterisierung der Schwermetall-Immissionsmuster

G. SCHÜÜRMAN, K.-D. WENZEL, L. WEIßFLOG, K. WIENHOLD, E. MÜLLER

Ökologische Situation der Region Leipzig-Halle

I. Immissionsmuster luftgetragener Schwermetalle und Bioelemente

Ludwig Weißflog, Klaus Wienhold, Klaus-Dieter Wenzel, Gerrit Schüürmann

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle, Sektion Chemische Ökotoxikologie, Postfach 2, D-04301 Leipzig

Korrespondenzautor: Dr. L. Weißflog

Zusammenfassung. Die Luftbelastung der Region Leipzig-Halle wurde mit zweijährigen Kiefernadeln (*Pinus sylvestris* L.) an 39 Standorten eines etwa 7 500 km² umfassenden Biomonitoringnetzes untersucht. Die Konzentrationswerte für Al, Ca, Cu, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Pb und V charakterisieren die entsprechenden Immissionsmuster für den Zeitraum 1990/91, während die Methode für Cu, Ni und Zn wegen des Transferpfades Boden-Kiefer sowie für Cd wegen des zu geringen Gesamtgehaltes weniger geeignet ist. Insgesamt sind erhebliche räumliche und elementspezifische Unterschiede zu erkennen, welche eine differenzierte Bewertung der Belastungssituation erforderlich machen. Für Pb, Cr, Fe und V ist die Stadt Leipzig selbst ein wichtiger Emittent. Vorwiegend im Zentrum der Region werden bei Pb sogar die Werte stark belasteter Referenzstandorte überschritten. Das Bioindikationssystem ist auch für vergleichbare Regionen Osteuropas mit der Kiefer als regional dominierender Koniferenart anwendbar. Immissionstrends lassen sich über ökologisch relevante Zeiträume verfolgen.

Abstract.

Ecological Situation of the Region Leipzig-Halle I. Immission Patterns of Heavy Metals and Bioelements

Air pollution in the region Leipzig-Halle was investigated using two-year-old pine needles (*Pinus sylvestris* L.) at 39 sites of a biomonitoring net covering an area of ca. 7 500 km². The concentration values of Al, Ca, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Pb and V characterize the immission patterns of the period 1990/91. The method is less suited for Cu, Ni and Zn due to the transfer route soil-pine, and for Cd due to the small total content. There are significant spatial and element-specific variations which require distinct evaluation of the pollution situation. The city of Leipzig itself is a significant source for Pb, Cr, Fe and V emission. Mainly as far as the centre of the region is concerned, the Pb concentration values are beyond those

of heavily contaminated reference sites. The bioindication system is also applicable for comparable regions in Eastern Europe where the pine is the dominating conifer type. Immission trends can be monitored over ecologically relevant periods of time.

1 Einleitung

Die für diese Arbeit verwendeten Kiefernadeln als passive Bioindikatoren erlauben die Erfassung luftgetragener Chemikalien in Form von Zweijahreswerten. Auf diese Weise lassen sich mit vertretbarem Aufwand räumliche und zeitliche Trends der Fremdstoffimmission über Landschaftsausschnitte von 1 000 bis 10 000 km² untersuchen. Es werden relative Angaben über Belastungsunterschiede, potentielle Hauptemittenten und qualitative Vergleiche mit ähnlich belasteten Gebieten erhalten. Die Gemeine Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) ist bereits von mehreren Arbeitsgruppen zur qualitativen Analyse und Bewertung der Schadstoffgehalte in der Luft verwendet worden [1, 2], wobei auch erste Untersuchungen über die mögliche Eignung der Kiefer als Bioindikator luftgetragener Schwermetalle durchgeführt wurden [2, 3].

Die Ergebnisse stellen zugleich Referenzwerte für den Zeitraum 1990/91 dar und liefern damit die Grundlage für eine spätere Analyse zeitlicher Trends in flächendeckender Form. Dabei wird erwartet, daß mit dem hier vorgestellten Bioin-

dikationsmeßnetz insbesondere die Auswirkungen der derzeitigen Änderungen der Immissionsituation infolge des wirtschaftlichen und technologischen Umbruchs erstmalig für die Gesamtregion erfaßt und bewertet werden können.

2 Material und Methoden

Das Bioindikationsmeßnetz mit 39 Standorten über etwa 7 500 km² Ausdehnung wurde im Zeitraum April 1991 bis Januar 1992 eingerichtet. Sein Mittelpunkt liegt im Autobahnkreuz A9/A14 (Schkeuditzer Kreuz), und es hat einen theoretischen Radius von 50 km. Der Mindestabstand der Meßstandorte zu stärker befahrenen Verkehrsstraßen und Eisenbahnlinien beträgt 0,5 km. Von sieben- bis zwölfjährigen Standortkiefern wurden jeweils fünf Bäume ausgewählt und im ersten Quartal 1992 beprobt. Zum Vergleich wurden Referenzstandorte in die Untersuchung mit einbezogen; es waren dies Serrahn b. Neustrelitz (Mecklenburg-Vorpommern) und Centralno-lesnoj (Rußland) als Repräsentanten unbelasteter Gebiete sowie Freiberg (Sachsen) und Vajskova (Slowakische Republik) in unmittelbarer Nähe ehemaliger Bleihütten als Vertreter belasteter Standorte.

Für die Probenahme werden die Kiefernnadeln von Zweigen des dritten Quirls mit einer Keramikscheere ca. 1 cm vom Ansatz abgeschnitten, um die Mitnahme harziger Teile weitgehend zu vermeiden. Nach Trocknung bei 85 °C und Mahlen in einer Achatkugelmühle wird ein Naßaufschluß mit konz. HNO₃ in einem Mikrowellengerät durchgeführt. Die anschließende Multielementanalyse erfolgt mit einem ICP-AE-Spektrometer, wobei als Referenzmaterial der NBS-Standard 1575 (pine needles) verwendet wird (vgl. [4]). Insgesamt wurden Gehaltsbestimmungen für die acht Schwermetalle Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V und Zn, das Leichtmetall Al und die vier Bioelemente Ca, Fe, K und Mg durchgeführt.

Die elementspezifischen Nachweisgrenzen liegen für Kalium bei 1 µg/g und für die anderen 12 Elemente kleiner oder gleich 0,18 µg/g [4]. Für die Auswertung der Meßergebnisse wurden Bewertungsgrenzen von 1,5 µg/g für Kalium und 0,3 µg/g für die anderen Elemente gewählt. Die im Ergebnis diskutierte räumlichen Variationen der Elementgehalte machen deutlich, daß diese Bewertungsgrenzen für die vorliegende Fragestellung ausreichen.

3 Ergebnisse

3.1 Bioindikationsmeßnetz und Transferpfad Boden-Kiefer

Die geographische Lage des Bioindikationsmeßnetzes in der Region Leipzig-Halle ist in **Abb. 1** dargestellt. Eine nähere Charakterisierung einzelner Standorte im Hinblick auf Art und Infrastruktur lokaler Hauptemittenten erfolgt in **Tabelle 1**. Man entnimmt der Tabelle, daß z.B. die Immissionsituation am Meßpunkt 25 hauptsächlich durch die nahe gelegene Stadt Halle bestimmt wird, wobei sowohl die Braunkohlefeuerung für Hausbrand und Industrie [5] als auch der Kraftfahrzeugverkehr Hauptquellen für luftgetragene Schad-

stoffe am Meßpunkt (im folgenden Mp genannt) sind. Entsprechendes gilt auch für die Mp 28 (Gordemitz), 27 (Bunitz), 7 (Taura) und 5 (Rosenfeld) in bezug auf Leipzig, welche den in [6] näher untersuchten Transekt im Lee der Hauptwindrichtung nordöstlich von Leipzig bilden.

Tabelle 1: Beeinflussung von Meßpunkten durch die Emittentenstruktur der Jahre 1990–1991

Meßpunkt	Hauptemittent	Emittentenstruktur
28, 27, 7, 5	Stadt Leipzig	Braunkohlenfeuerung (industriell und Hausbrand) Kraftverkehr Metallverarbeitende Industrie
30, 29	Böhlen/Espenhain Lippendorf Thierbach	Großkraftwerk Lippendorf Großkraftwerk Thierbach Industriekraftwerke mit Ölstützfeuerung Carbochemischer Standort Braunkohlenschwelung Chemische Grundstoffe auf petrochemischer Basis Pyrolysebenzinraffination Verbleiung von Benzin Ferrolegierungswerk Lippendorf Eisenveredelung
36, 37	Helbra, Hettstedt, Mansfelder Gebiet	NE-Hüttenbetriebe Kupferschrottverarbeitung Halden des Mansfelder Bergbaus
25	Stadt Halle	Braunkohlenfeuerung (industriell und Hausbrand) Kraftverkehr Metallverarbeitende Industrie
19, 20	Bernburg	Zementherstellung Kali-, Steinsalzbergbau und Verarbeitungsindustrie Industriekraftwerke auf Braunkohlenbasis
32, 38, 26	Buna/Leuna	Chemiestandort Erdölraffinerie Chemische Grundstoffe Industriekraftwerke

Bei dem verwendeten passiven Bioindikationsverfahren geben die Elementgehalte zunächst keinen Aufschluß über den jeweiligen Anteil der Fremdstoffaufnahme über die Wurzel. Diese Frage kann durch den Vergleich der Analysenwerte von Nadeln verschiedenen Alters am gleichen Standort untersucht werden, wie in **Tabelle 2** am Beispiel von 2-, 14- und 26monatigen Kiefernnadeln für einige Mp dargestellt ist. Bei Cu, Ni und Zn sind die Gehalte in den zweimonatigen Nadeln am höchsten, und die Abnahme der Konzentrationswerte mit zunehmendem Nadelalter weist auf die Auswaschung (Leaching) des über die Wurzel aufgenommenen biogenen Anteils hin. Die niedrigsten Eisengehalte treten in den zweimonatigen Nadeln der Mai-Austritte mit 30–70 ppm im Bereich unbelasteter Referenzstandorte auf und entsprechen damit in etwa dem biogenen Anteil. Für Blei erhält man

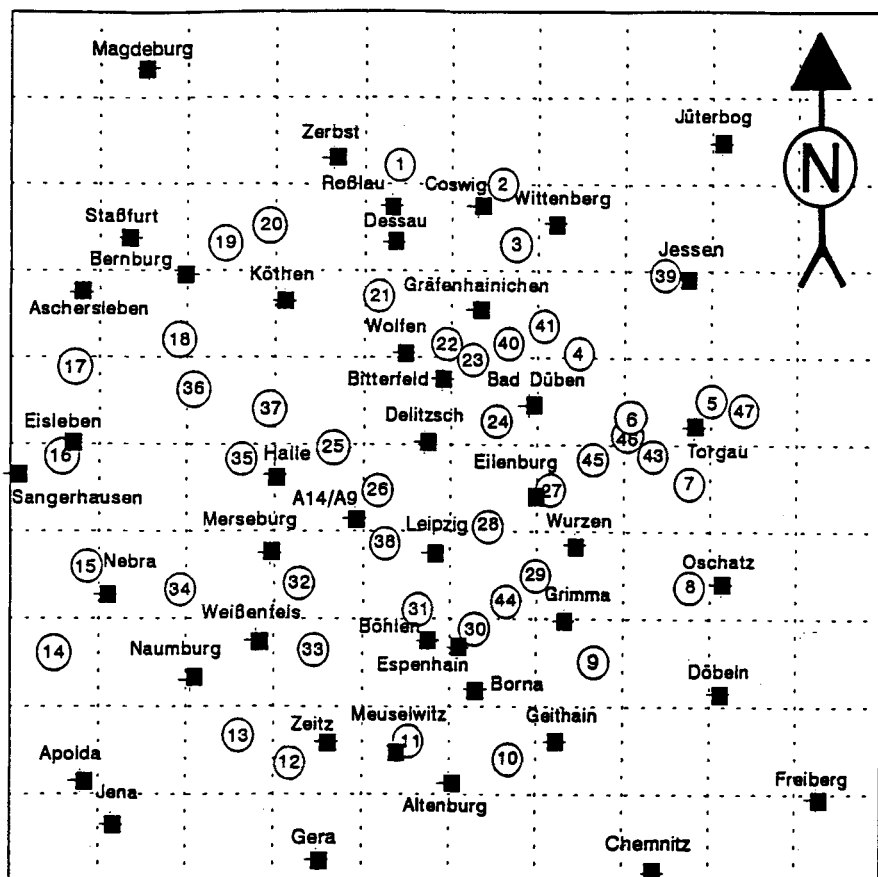


Abb. 1: Geographische Lage der Meßstandorte des Bioindikationsmeßnetzes Gemeine Kiefer (*Pinus sylvestris L.*) der Industrieregion Leipzig-Halle (Maßstab 1 : 500 000)

Tabelle 2: Schwermetallgehalte in 2-,14- und 26monatigen Kiefernnaedeln an ausgewählten Meßpunkten

Meßpunkte	Alter der Nadeln in Monaten	Pb	Cr	V	Fe	Cu	Ni	Zn	Mn	Al	Mg	Ca	K
5	2	0,4±0,1	n.n.	0,2±0,2	43±6	4,4±0,7	6,1±2,5	29,0±5	209±73	188±50	731±99	1601±385	6926±748
	14	1,0±0,5	0,1±0,2	0,8±0,3	123±31	2,2±0,3	1,1±0,6	26,4±5	707±259	303±151	595±107	3801±490	4476±611
	26	1,4±0,3	0,2±0,2	1,0±0,3	148±36	1,9±0,1	0,9±0,3	25,6±6	1047±512	431±90	468±102	6022±887	3947±671
7	2	0,4±0,4	n.n.	0,1±0,2	38±6	3,6±1,2	1,9±0,4	24,0±7	168±38	110±7	583±94	1133±185	4617±943
	14	1,2±0,8	0,1±0,2	0,6±0,1	95±6	1,7±0,4	0,5±0,1	29,0±6	341±65	196±20	548±72	2578±367	2793±717
	26	1,6±0,7	0,4±0,2	0,9±0,2	131±22	1,6±0,4	0,5±0,2	28,2±6	488±100	233±58	410±74	4034±487	1926±486
23	2	0,2±0,3	n.n.	0,3±0,3	31±4	3,0±0,6	2,0±0,3	23,9±2	38±9	159±42	512±88	929±213	4299±296
	14	0,6±0,8	n.n.	0,5±0,1	64±10	1,6±0,2	0,2±0,2	24,7±7	77±26	221±38	458±57	1999±580	3429±422
	26	0,6±0,2	n.n.	0,6±0,1	90±9	1,4±0,1	0,3±0,2	21,0±9	5±25	190±51	398±76	3176±998	2890±577
27	2	0,4±0,2	n.n.	0,3±0,2	65±20	3,3±0,7	1,9±0,4	32,8±8	382±153	178±18	823±134	1441±304	6718±821
	14	1,8±0,3	0,5±0,1	1,7±0,4	236±55	2,4±0,3	0,5±0,2	25,1±7	1070±447	354±46	823±199	2970±1649	5362±979
	26	3,0±0,6	0,6±0,4	2,0±0,5	290±79	2,0±0,3	0,5±0,1	23,6±9	1527±784	330±52	822±240	5921±1900	3732±821
28	2	0,5±0,2	n.n.	0,3±0,2	69±11	4,7±0,9	2,9±1,2	30,6±6	348±108	122±21	570±99	1221±394	8242±1991
	14	2,4±0,5	0,7±0,2	2,6±0,5	270±54	3,1±0,4	0,7±0,2	26,9±13	950±116	337±99	623±105	3054±1747	3923±667
	26	4,6±0,6	1,1±0,2	4,0±0,6	352±45	2,8±0,3	0,9±0,2	25,6±4	1196±247	37±87	691±96	5181±1514	2851±529
39	2	0,3±0,3	n.n.	0,3±0,3	30±5	2,9±0,5	1,3±0,5	21,4±3	221±39	154±39	555±32	1508±310	4993±379
	14	0,7±0,3	n.n.	0,7±0,1	67±11	1,4±0,2	0,2±0,2	31,3±6	451±118	302±90	483±77	3018±251	2626±610
	26	1,0±0,2	0,1±0,2	1,0±0,3	104±13	1,4±0,2	0,3±0,1	51,3±13	840±271	343±80	466±82	5413±602	2436±502
41	2	n.n.	n.n.	0,4±0,2	34±9	2,8±0,3	3,1±0,8	26,9±6	179±66	143±34	650±133	1363±258	4019±797
	14	0,4±0,2	n.n.	0,6±0,1	63±8	1,7±0,3	0,6±0,2	23,7±6	332±90	293±55	578±75	2428±470	2883±844
	26	1,0±0,1	n.n.	0,8±0,2	90±11	1,5±0,2	0,7±0,2	29,8±11	509±164	325±75	611±141	4248±279	2367±399
43	2	0,5±0,3	n.n.	0,1±0,2	51±7	3,4±0,4	2,0±0,5	27,9±4	165±69	131±26	666±83	1414±508	6173±995
	14	1,0±0,2	0,2±0,2	0,7±0,2	113±15	2,4±0,4	0,5±0,2	27,3±10	390±197	257±59	592±120	2902±729	4170±817
	26	1,5±0,5	0,3±0,2	0,9±0,2	130±33	2,2±0,5	0,6±0,2	31,2±10	384±188	230±42	573±143	4025±1568	3489±823
Serrahn	2	0,2±0,2	n.n.	0,2±0,2	33±4	4,0±0,7	2,0±0,9	21,4±5	261±261	161±41	795±115	1507±273	5470±727
	14	0,5±0,1	n.n.	0,7±0,0	56±7	2,4±0,2	0,3±0,3	25,1±9	1158±259	249±137	460±85	3916±776	3142±611
	26	0,8±0,1	n.n.	1,2±0,3	77±13	2,1±0,2	0,4±0,3	33,8±19	2120±579	414±96	378±85	7045±2265	2952±600

Elementgehalte in µg/g Trockensubstanz

- Meßpunkte 41 (Oppin) und 43 (Melpitz): zusätzlich beprobte Meßpunkte innerhalb ausgewählter Transekte

- Serrahn, unbelasteter Referenzstandort in einem Reingebiet

Tabelle 3: Elementgehalte in zweijährigen Kiefernadeln der Industrieregion Leipzig – Halle (Vegetationszeitraum 1990/1991)

Meßpunkte	Pb	Cr	V	Fe	Cu	Ni
1	1,5 ± 0,4	0,5 ± 0,1	1,3 ± 0,3	201 ± 46	2,35 ± 0,24	0,86 ± 0,26
2	1,8 ± 0,5	0,7 ± 0,3	2,1 ± 0,6	177 ± 40	1,78 ± 0,17	0,51 ± 0,16
3	1,0 ± 0,1	n.n.	1,0 ± 0,1	118 ± 19	2,06 ± 0,36	0,98 ± 0,65
4	0,8 ± 0,3	n.n.	1,1 ± 0,2	94 ± 19	1,70 ± 0,13	1,36 ± 0,33
5	1,5 ± 0,4	n.n.	0,4 ± 0,3	98 ± 11	1,91 ± 0,25	0,64 ± 0,17
6	1,1 ± 0,4	0,4 ± 0,0	0,8 ± 0,1	78 ± 13	1,87 ± 0,35	n.n.
7	1,7 ± 0,3	n.n.	1,2 ± 0,8	133 ± 19	3,01 ± 2,38	0,69 ± 0,16
8	1,1 ± 0,2	n.n.	0,9 ± 0,2	103 ± 21	2,47 ± 0,34	0,84 ± 0,34
9	1,0 ± 0,2	n.n.	1,5 ± 0,1	150 ± 22	1,94 ± 0,30	0,86 ± 0,25
10	1,3 ± 0,2	0,4 ± 0,0	n.n.	127 ± 18	2,32 ± 0,23	1,15 ± 0,16
11	1,0 ± 0,1	0,6 ± 0,1	1,2 ± 0,1	199 ± 18	2,32 ± 0,17	0,94 ± 0,42
12	1,3 ± 0,4	0,8 ± 0,2	0,6 ± 0,2	114 ± 17	1,62 ± 0,19	0,89 ± 0,25
13	1,6 ± 0,4	0,5 ± 0,1	1,0 ± 0,3	193 ± 46	1,94 ± 0,19	0,81 ± 0,29
14	0,9 ± 0,1	n.n.	1,0 ± 0,1	91 ± 14	1,63 ± 0,27	0,48 ± 0,08
15	1,3 ± 0,3	n.n.	0,9 ± 0,1	108 ± 26	2,02 ± 0,23	0,67 ± 0,11
16	1,8 ± 0,7	0,4 ± 0,1	1,1 ± 0,5	187 ± 64	2,27 ± 0,43	1,60 ± 0,56
17	2,0 ± 0,4	n.n.	1,3 ± 0,2	119 ± 19	2,24 ± 0,30	1,57 ± 0,37
18	2,0 ± 0,3	0,4 ± 0,1	0,8 ± 0,2	184 ± 38	1,65 ± 0,18	0,39 ± 0,04
19	2,3 ± 1,0	0,7 ± 0,2	1,1 ± 0,5	208 ± 62	1,94 ± 0,36	0,40 ± 0,13
20	1,4 ± 0,2	0,4 ± 0,0	0,7 ± 0,2	130 ± 10	2,16 ± 0,17	0,89 ± 0,32
21	0,7 ± 0,2	0,3 ± 0,0	0,7 ± 0,1	106 ± 24	2,06 ± 0,13	0,63 ± 0,11
22	1,4 ± 0,1	0,5 ± 0,0	1,1 ± 0,5	176 ± 19	1,56 ± 0,15	0,39 ± 0,04
23	1,4 ± 0,5	0,4 ± 0,1	1,1 ± 0,1	172 ± 23	2,22 ± 0,24	0,90 ± 0,65
24	1,0 ± 0,3	0,4 ± 0,1	1,0 ± 0,1	145 ± 28	1,64 ± 0,37	1,65 ± 1,15
25	2,9 ± 0,6	0,9 ± 0,1	2,6 ± 0,5	394 ± 43	2,65 ± 0,18	1,07 ± 0,20
26	2,5 ± 0,3	0,7 ± 0,2	2,3 ± 0,6	242 ± 55	2,38 ± 0,20	0,95 ± 0,21
27	2,2 ± 0,4	0,6 ± 0,3	2,5 ± 0,5	256 ± 25	2,24 ± 0,13	0,67 ± 0,06
28	3,4 ± 0,8	1,1 ± 0,3	3,2 ± 0,9	360 ± 53	2,57 ± 0,34	1,06 ± 0,16
29	1,2 ± 0,2	n.n.	1,2 ± 0,4	148 ± 25	1,99 ± 0,35	0,87 ± 0,27
30	3,2 ± 0,4	1,7 ± 0,2	3,8 ± 0,4	446 ± 56	3,19 ± 0,26	1,07 ± 0,30
31	1,1 ± 0,3	0,5 ± 0,0	1,1 ± 0,2	116 ± 29	1,47 ± 0,12	1,07 ± 0,43
32	2,2 ± 0,4	0,7 ± 0,1	2,0 ± 0,4	263 ± 46	2,32 ± 0,41	0,57 ± 0,04
33	2,6 ± 0,4	1,2 ± 0,3	2,3 ± 0,7	496 ± 64	2,51 ± 0,35	0,82 ± 0,13
34	1,5 ± 0,5	0,8 ± 0,2	0,8 ± 0,2	145 ± 30	2,22 ± 0,29	n.n.
35	1,2 ± 0,3	0,4 ± 0,0	0,8 ± 0,2	146 ± 21	2,14 ± 0,17	0,48 ± 0,08
36	3,0 ± 0,8	0,6 ± 0,0	1,6 ± 0,2	225 ± 16	2,73 ± 0,12	0,70 ± 0,10
37	2,8 ± 0,8	0,6 ± 0,1	1,2 ± 0,2	231 ± 32	2,51 ± 0,40	0,98 ± 0,52
38	3,7 ± 0,4	1,2 ± 0,1	2,7 ± 0,5	335 ± 22	3,20 ± 0,20	1,16 ± 0,25
39	0,9 ± 0,1	n.n.	0,9 ± 0,1	111 ± 18	2,21 ± 0,44	0,57 ± 0,08
Serrahn ^a	1,1 ± 0,3	n.n.	0,8 ± 0,2	58 ± 5	2,25 ± 0,17	0,60 ± 0,28
Centr.-les. ^a	0,7 ± 0,3	n.n.	n.n.	41 ± 4	3,09 ± 0,27	2,59 ± 0,38
Freiberg ^b	2,0 ± 0,5	-	-	-	-	-
Vajskova ^b	2,1 ± 0,0	-	-	-	-	-

Elementgehalte in µg/g Trockensubstanz
n.n. – nicht nachweisbar

für die Jungnadeln Mittelwerte im Bereich von 0,3 ppm, welche über 0,5 – 2,4 ppm in einjährigen Kiefernadeln bis zum Bereich 0,8 – 3,7 ppm in zweijährigen Kiefernadeln ansteigen. Insgesamt läßt eine Bewertung des zeitlichen Gangs von Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V und Zn den Schluß zu, daß außer bei Cu, Ni und Zn der biogene Anteil für die räumliche Variation keine wesentliche Rolle spielt und damit die Stoffgehalte tatsächlich das jeweilige Immissionsmuster im zugehörigen Vegetationszeitraum charakterisieren [7].

3.2 Elementgehalte in den Kiefernadeln

Die Konzentrationswerte der Schwermetalle und Bioelemente in den Kiefernadeln der 39 Mp sind in Tabelle 3 zusammengefaßt. Die Cd-Gehalte liegen an allen Mp im Bereich

von ≤ 0,3 ppm und sind deshalb tabellarisch nicht erfaßt. Für die übrigen Elemente ist die Standortstreuung – außer bei Ca und Ni – deutlich kleiner als die regionale Streuung, was eine signifikante räumliche Variation für die betreffenden Elemente bedeutet.

Etwa 90 % der gemessenen Ca- und Mg-Werte sowie 50 % der Al-Werte liegen oberhalb derer von unbelasteten Referenzstandorten und weisen somit auf die allgemeine Belastung der Region durch basische Flugstäube hin. Auf Grund der großen räumlichen Schwankung der Mn-Werte und der mittleren Streuung am jeweiligen Meßpunkt, wobei sich die minimalen und maximalen Meßpunktwerte um den Faktor 147 unterscheiden, ist mit dem Einfluß verschiedenartiger natürlicher bzw. anthropogener Prozesse auf den Mn-Gehalt zu rechnen. Ein Vergleich der Cu- und Ni-Gehalte mit Refe-

Tabelle 3: Elementgehalte in zweijährigen Kiefernadeln der Industrieregion Leipzig – Halle (Vegetationszeitraum 1990/1991)

Meßpunkt	Zn	Mn	Al	Mg	Ca	K
1	31,74 ± 9,3	1 132 ± 213	537 ± 193	569 ± 132	5 474 ± 701	4 771 ± 243
2	35,06 ± 11,8	291 ± 103	625 ± 221	842 ± 164	3 876 ± 959	4 167 ± 517
3	43,33 ± 9,6	388 ± 74	500 ± 39	900 ± 98	5 455 ± 1 165	5 214 ± 995
4	37,70 ± 5,9	1 169 ± 395	447 ± 196	826 ± 133	3 618 ± 793	4 710 ± 777
5	51,70 ± 17,1	1 101 ± 439	531 ± 88	424 ± 119	4 108 ± 868	3 941 ± 750
6	31,02 ± 10,4	431 ± 218	331 ± 81	485 ± 183	4 147 ± 785	4 227 ± 776
7	44,80 ± 13,4	620 ± 210	383 ± 74	425 ± 143	4 526 ± 1 109	3 007 ± 511
8	32,40 ± 4,8	981 ± 166	163 ± 38	476 ± 112	5 342 ± 1 403	4 308 ± 746
9	44,50 ± 14,9	1 850 ± 191	459 ± 76	599 ± 134	5 810 ± 1 384	4 995 ± 796
10	36,06 ± 6,3	1 346 ± 727	730 ± 191	577 ± 153	4 551 ± 2 083	4 943 ± 444
11	33,95 ± 10,8	417 ± 139	402 ± 90	954 ± 281	7 467 ± 1 651	5 623 ± 631
12	34,95 ± 6,5	352 ± 75	153 ± 32	725 ± 222	3 635 ± 443	3 987 ± 552
13	18,56 ± 3,7	322 ± 170	196 ± 20	714 ± 168	4 515 ± 1 177	4 385 ± 1 025
14	37,81 ± 6,1	624 ± 128	365 ± 86	535 ± 137	4 867 ± 1 553	4 093 ± 790
15	29,76 ± 3,4	866 ± 224	268 ± 108	659 ± 115	4 106 ± 662	3 709 ± 488
16	56,77 ± 15,7	1 906 ± 479	236 ± 36	315 ± 104	3 720 ± 712	2 560 ± 561
17	69,79 ± 20,6	1 694 ± 758	392 ± 43	411 ± 93	4 809 ± 912	3 119 ± 314
18	16,48 ± 5,0	13,2 ± 5	117 ± 28	981 ± 238	4 651 ± 1 077	3 289 ± 611
19	11,91 ± 1,0	29,9 ± 13	152 ± 37	810 ± 208	5 586 ± 1 372	3 761 ± 483
20	36,57 ± 8,8	246 ± 90	293 ± 61	595 ± 140	4 390 ± 718	3 962 ± 359
21	40,11 ± 13,2	701 ± 221	388 ± 61	587 ± 205	3 844 ± 644	3 851 ± 226
22	41,56 ± 7,0	271 ± 124	308 ± 100	670 ± 127	5 641 ± 905	3 556 ± 258
23	31,92 ± 8,4	339 ± 102	271 ± 91	487 ± 86	1 765 ± 266	5 800 ± 649
24	37,71 ± 6,8	853 ± 250	627 ± 223	721 ± 237	4 088 ± 597	4 009 ± 586
25	42,10 ± 8,8	342 ± 103	511 ± 214	844 ± 274	5 578 ± 1 799	3 981 ± 2 030
26	21,80 ± 3,9	338 ± 152	231 ± 43	818 ± 179	5 487 ± 464	5 069 ± 908
27	29,91 ± 6,0	930 ± 402	396 ± 152	861 ± 249	4 478 ± 1 123	4 028 ± 698
28	30,37 ± 11,6	1 156 ± 206	459 ± 140	581 ± 159	4 495 ± 1 715	3 696 ± 663
29	37,24 ± 8,8	745 ± 67	426 ± 45	639 ± 226	4 891 ± 776	4 541 ± 601
30	34,77 ± 7,0	725 ± 199	475 ± 78	834 ± 217	5 639 ± 1 423	4 270 ± 855
31	45,31 ± 8,3	331 ± 302	221 ± 109	1 082 ± 213	7 248 ± 1 327	4 932 ± 613
32	22,17 ± 6,5	43 ± 40	212 ± 47	1 144 ± 137	6 007 ± 1 400	4 001 ± 1 117
33	23,08 ± 5,8	438 ± 148	391 ± 30	924 ± 280	4 697 ± 1 469	5 562 ± 1 565
34	27,96 ± 9,7	13 ± 10	121 ± 20	691 ± 206	3 657 ± 890	3 720 ± 525
35	56,13 ± 13,5	116 ± 36	227 ± 43	875 ± 125	4 858 ± 1 012	4 220 ± 991
36	34,44 ± 5,8	1 169 ± 450	279 ± 54	731 ± 145	5 574 ± 1 587	3 537 ± 234
37	42,44 ± 17,2	662 ± 345	254 ± 71	702 ± 158	5 749 ± 1 643	3 286 ± 279
38	29,21 ± 12,5	408 ± 217	364 ± 47	791 ± 280	4 479 ± 2 014	5 512 ± 1 596
39	74,34 ± 19,2	800 ± 192	315 ± 47	643 ± 206	5 698 ± 794	3 446 ± 478
Serrahn ^a	22,62 ± 2,2	1 241 ± 203	333 ± 188	438 ± 116	3 652 ± 617	3 809 ± 432
Centr.-les. ^a	40,04 ± 4,8	619 ± 97	279 ± 40	672 ± 90	2 148 ± 228	4 695 ± 300

Elementgehalte in µg/g Trockensubstanz

^a unbelastete Referenzstandorte:

- Serrahn, Nationalpark Müritz / Mecklenburg-Vorpommern
- Centralno-lesnoj / Rußland (350 km NO von Moskau)

^b belastete Pb-Referenzstandorte:

- Freiberg / Sachsen
- Vajskove / Slovakia

renzstandorten läßt den Schluß zu, daß es im Untersuchungszeitraum zu keinen ökotoxikologisch relevanten Schadstoffeinträgen dieser Elemente gekommen ist. Bei Zn und K liegen nur ca. 10 – 15 % der Meßwerte geringfügig oberhalb der an unbelasteten Referenzstandorten gemessenen Gehalte, wobei eine direkte Emittentenzuordnung nicht vorgenommen werden kann. Für die vier Elemente Cr, Fe, Pb und V liegen die Höchstwerte überwiegend im Zentrum des Untersuchungsgebietes und übertreffen beispielsweise bei Pb die Werte belasteter Referenzstandorte. Eine ausführliche Charakterisierung der Immissionsmuster dieser vier Elemente und ihres ökotoxikologischen Potentials erfolgt in [8].

4 Diskussion

Während für Untersuchungen zum biogenen Anteil der Elementgehalte aufgrund des Transferpfades Boden-Pflanze bei Fichten (*Picea abies* L.) mit ihrem tellerförmigen Flachwurzelsystem Bodenprobenahmen nur in entsprechend geringen Bodentiefen erforderlich sind, sind diese beim Einsatz von Kiefern (*Pinus sylvestris* L.) mit ihren bis zu vier Metern langen Pfahlwurzeln nicht ohne weiteres zu realisieren. Durch die zusätzliche Bestimmung des Elementgehaltes zweimonatiger Kiefernadeln an Kiefernstandorten mit unterschiedlicher Bodenkontamination konnte für jedes Element der pflanzentypische Transferpfad mit seinem entsprechenden Anteil am Gesamtelementgehalt besser eingeschätzt werden.

Dabei ging man davon aus, daß eine zweimonatige Expositionszeit nur einen relativ geringen Anteil an der Gesamtdeposition an bzw. auf einer zweijährigen Nadel aufweist. Die Ergebnisse für Pb, Cr und V bestätigen dies; die Elementgehalte in zweimonatigen Kiefernadeln geben Auskunft über die Bioverfügbarkeit an den unterschiedlichen Mp und über die Translokation von Bio- und Spurenelementen innerhalb der verschiedenen Nadelaltersgruppen eines Kiefernzweiges.

Die Auswertung der Meßwerte für Cr, Fe, Pb und V im Hinblick auf die Lage der Standorte zeigt, daß – ausgehend von den Industriestädten Leipzig und Halle entlang von Transekten in Hauptwindrichtung – jeweils eine systematische Abnahme der Elementgehalte in den Kiefernadeln mit zunehmender Entfernung von der Stadt vorliegt. Somit ist für diese vier Elemente eine Zuordnung der Schadstoffimmission zu einem jeweils urbanen Hauptemittenten möglich. Als Beispiel hierfür sind die entsprechenden Schwermetallgehalte der Mp 28, 27, 7 und 5 im Transekt Leipzig-Torgau zu werten. Dagegen gibt der südlich von Leipzig gelegene Mp 30 mit seinen hohen Gehalten an Cr, Fe, Pb und V Hinweise auf wichtige industrielle Emittenten. Der hohe Pb-Gehalt in den Kiefernadeln kann auf die Herstellung verbleiten Benzins am Chemiestandort Böhlen, der hohe Cr- und V-Gehalt hingegen mit Emissionen des Ferrolegierungswerkes Lippendorf zusammenhängen. Ölgestützte Feuerungsanlagen der Großkraftwerke Lippendorf und Thierbach emittieren ebenfalls V, während Fe möglicherweise auf Grund eisenhaltiger Flugstäube der Industriekraftwerke Espenhain und Böhlen wie auch der Großkraftwerke Lippendorf und Thierbach in höheren Konzentrationen in der Kiefernadel gemessen wurde. Die hohen Pb-Gehalte bei gleichzeitig niedrigen Cr-, Fe- und V-Gehalten an den Mp 36 und 37 weisen auf einen andersartigen Emittenten hin. Verantwortlich hierfür können insbesondere die Nichteisenhüttenbetriebe Helbra, Eisleben und Sangerhausen mit ihrer Verarbeitung von sulfidischen Erzen und Kupferschrott sein. Flugaschen und Belastungen durch KFZ-Verkehr wie in der Nähe der Großstädte spielen dabei eine untergeordnete Rolle. Die extrem niedrigen Mn-Werte der Kiefernadeln der Standorte 18, 19 und 34 sind geogenen Faktoren zuzuschreiben. Die Standorte befinden sich in einem Muschelkalkgebiet mit einem relativ hohen Boden-pH-Wert, was eine verringerte Bioverfügbarkeit zur Folge hat. Die K-, Ca-, Mg- und Zn-Gehalte der Kiefernadeln aller Meßstandorte lassen erkennen, daß keine Mangelerscheinungen auf Grund zu niedriger Bioelement-Werte zu erwarten sind.

Beim gegenwärtigen Stand der Datenauswertung ist hier eine Zuordnung unterschiedlicher Elementgehalte zu dominanten Emittenten nicht möglich.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, daß die Kiefernadel als Bioindikationssystem zur Erfassung der über längere Zeiträume gemittelten Immissionsmuster der Schwermetalle Pb, Cr, Fe und V geeignet ist, während bei Cu und Ni die biogene Aufnahme und Auswaschungsphänomene eine Rolle spielen. Die Bioelemente Ca, K, Mg, Mn und Zn als pflanzenphysiologische Referenzwerte und das Leichtmetall Al dienen in erster Linie als Basiswerte für mögliche spätere Trenduntersuchungen in diesem Gebiet. Signifikante Unterschiede zu den in Referenzgebieten ermittelten Elementgehalten bestehen bei diesen Bioelementen nicht.

5 Schlußfolgerungen

Da die Kiefer auch im osteuropäischen Raum die dominierende Koniferenart darstellt, können die hier gewonnenen Erfahrungen für immissionsökologische Untersuchungen in vergleichbaren Regionen Osteuropas genutzt werden. Gerade bei größeren Landschaftsausschnitten ist es mit diesem passiven Bioindikationssystem möglich, räumlich und zeitlich differenzierte Angaben zur Fremdstoffimmission mit vertretbarem Aufwand zu erhalten.

Mit den hier vorgelegten Immissionsmustern können Teilgebiete mit besonders hoher oder besonders niedriger Belastung identifiziert werden.

Die Konzentrationsgradienten im Lee von Leipzig bestätigen, daß die Großstädte selbst wichtige Emittenten für eine Reihe von partikelgebundenen Schwermetallen darstellen. Dies hat eine unmittelbare Bedeutung für Gebiete nordöstlich der jeweiligen Städte und muß bei entsprechenden Infrastrukturmaßnahmen berücksichtigt werden. Schließlich liefern die vorliegenden Ergebnisse Referenzwerte, auf deren Basis bei späteren Untersuchungen Aussagen über die zeitliche Entwicklung der Immissionssituation in räumlich differenzierter Form getroffen werden können.

Danksagung

Die dieser Publikation zugrundeliegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie (Förderungskennzeichen 339419F und 39419K) gefördert. Dank gilt weiterhin der Bundesforstverwaltung und den Landesforstverwaltungen Sachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Thüringen und dem Präsidenten des Nationalparkamtes Müritz/Mecklenburg-Vorpommern für die Unterstützung bei der Auswahl geeigneter Meßflächen sowie dem Präsidenten des Regierungsbezirkes Leipzig für seine Förderung in den Jahren 1990 und 1991. Schließlich möchten wir Frau A. PFENNIGSDORFF, Frau Y. DENNERLEIN und Herrn K.-U. SEYFARTH für ihre Mitarbeit bei der Durchführung der Untersuchungen danken.

6 Literatur

- [1] G. MEYER: Monitoringprogramm Naturhaushalt Berlin und Umland. VDI-Bericht Nr. 901 (1991) 789 – 800
- [2] H. BAU: Der Einsatz pflanzlicher Bioindikatoren in der Bundesrepublik Deutschland. VDI-Bericht Nr. 901 (1991) 37 – 60
- [3] B. MANKOVSKA: Accumulation of As, Sb, S and Pb in soil and pine forest. *Ecologia (CSSR)* 5 (1986) 71 – 79
- [4] A. PFENNIGSDORFF; K. WIENHOLD; L. WEIßFLOG; G. SCHÜRMANN: Multielementanalyse von Kiefernadeln als Bioindikationssystem – Ergebnisse für Vanadium und Eisen im Raum Leipzig-Halle. In: K. DITTRICH und B. WELZ (Hrsg.): CANAS '93 – Colloquium Analytische Atomspektroskopie. Universität Leipzig und UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle, Leipzig 1993, S. 787 – 792
- [5] R. E. LEE; D. J. von LEHMEN: Trace Metal Pollution in the Environment. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 23 (1973) 853 – 1857
- [6] L. WEIßFLOG; W. ROLLE; K.-D. WENZEL; R. KÜHNE; G. SCHÜRMANN: Ökologische Situation der Region Leipzig-Halle. II. Modellierung der Partikelgröße der Flugstäube. *UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox.*, akzeptiert zur Publikation 6 (3) 1994
- [7] H. J. FIEDLER; H. J. RÖSLER (Hrsg.): Spurenelemente in der Umwelt. Gustav Fischer Verlag, 2. Auflage, Jena 1993, S. 132
- [8] G. SCHÜRMANN; K.-D. WENZEL; L. WEIßFLOG; K. WIENHOLD; E. MÜLLER: Ökologische Situation der Region Leipzig-Halle. III. Ökotoxikologische Charakterisierung der Schwermetall-Immissionsmuster. *UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox.*, akzeptiert zur Publikation 6 (4) 1994

Eingegangen: 10. August 1993

Akzeptiert: 18. Oktober 1993