

# Atmosphärischer Eintrag von Spurenelementen

Statusbericht des elfjährigen Monitorings an den bayerischen Waldklimastationen

Judith Pielert, Friederike Lang, Christoph Schulz und Stephan Raspe

**Spurenelemente kommen in den kleinsten Mengen von Natur aus in der Umwelt vor. Zu ihnen gehören lebenswichtige Elemente, aber auch toxisch wirkende Schwermetalle. Setzt sie der Mensch frei, können sie über die Atmosphäre in Ökosysteme eingetragen werden, sich dort anreichern und negative Auswirkungen erzielen, auch wenn die Eintragsraten oft sehr gering sind. Von vielen Spurenelementen sind bisher jedoch weder Eintragsraten noch Umweltwirkungen im Detail bekannt. Die Umweltmessungen an den bayerischen Waldklimastationen erfassen neben dem Routinemessprogramm seit Ende der 1990er Jahre auch Spurenelementdepositionen im Niederschlag.**

Wie viele Schwermetalle in die Wälder langfristig eingetragen und angereichert werden, wurde bisher nur selten untersucht. Dabei sind gerade Wälder auf Grund ihrer Filterwirkung als Senken für atmosphärische Schadstoffe von besonderer Bedeutung. Deshalb werden an elf bayerischen Waldklimastationen (WKS) die Spurenelementeinträge im Niederschlag seit 1998 im Freiland und seit 2005 auch im Bestand erfasst (siehe Kasten). Für die zwölf in Tabelle 1 aufgeführten Elemente haben wir die jährlichen Elementfrachten berechnet. Diese Ergebnisse sind deshalb besonders wertvoll, da es nur sehr wenige Studien zum Spurenelementeintrag gibt, die ein solch breites Element- und Standortspektrum und einen vergleichbar langen Zeitraum abdecken. Insbesondere der Eintrag in Waldökosysteme ist, abgesehen von häufig analysierten Schwermetallen wie Blei, Cadmium, Arsen etc. oder Hauptnährelementen, nur selten erforscht worden.

## Einordnung und Bewertung der Spurenelementfrachten

Die Schwermetalleinträge an den WKS sind insgesamt nicht besorgniserregend. Bis auf die Bestandsfracht von Mangan reicht keine der ermittelten Elementfrachten an die Obergrenze der in der Literatur beschriebenen Referenzwerte heran. Allerdings liegen fünf Elemente über den für Bayern geltenden Orientierungswerten der maximalen Hintergrundbelastung, sind also hinsichtlich der ländlichen Hintergrundbelastung gemäß Definition des Landesamts für Umwelt (LfU) oberhalb des Normalbereichs. Dies betrifft Arsen, Mangan und Blei sowie Zink und Kupfer in der Bestandesdeposition, Bismut und Vanadium liegen nur knapp unterhalb der Orientierungswerte.

Tabelle 1: Jährliche Elementfrachten [g/ha\*a] an den WKS im Vergleich zu Mitteleuropa sowie zu Werten des LfU

| Element        | Mittelwerte WKS<br>1998–2008 | Referenzwerte<br>1980–2007<br>Mitteleuropa | Mittelwerte WKS<br>2005–2007 | Referenzwerte<br>1980–1995<br>Mitteleuropa | Orientierungswerte<br>max. Hintergrundbelas-<br>tung des LfU 2006–2008 |
|----------------|------------------------------|--|------------------------------|--|--|
|                | Freiland                     |  | Bestand                      |  |  |
| Aluminium (Al) | 174–295                      | 80–900                                     | 245–1.063                    | 170–3.600                                  | 1.245  |
| Arsen (As)     | 0,8–1,5                      | 0,5–1,5                                    | 0,5–1,8                      | –  | 1,2  |
| Bismut (Bi)    | 0,15–0,33                    | –  | 0,12–0,31                    | –  | 0,32   |
| Chrom (Cr)     | 1,6–2,5                      | 0,6–15                                     | 1,5–3,4                      | 6,1–23                                     | –  |
| Kupfer (Cu)    | 10,2–19,7                    | 4–350                                      | 11–33,4                      | 26–230                                     | 21,5   |
| Mangan (Mn)    | 33–114                       | 83–720                                     | 351–11.046                   | 320–7.150                                  | 88   |
| Molybdän (Mo)  | 0,5–0,8                      | –  | 0,4–0,8                      | –  | 1,2  |
| Blei (Pb)      | 11–19                        | 4–250                                      | 10–81                        | 17–532                                     | 15   |
| Rubidium (Rb)  | 2,6–12,6                     | –  | 10–180,5                     | –  | –  |
| Strontium (Sr) | 7–14                         | –  | 12–61                        | 90–140                                     | –  |
| Vanadium (V)   | 1,9–3,4                      | 2,5–5                                      | 1,9–4,6                      | –  | 4,7  |
| Zink (Zn)      | 71–142 <sup>1)</sup>         | 35–1.900                                   | 165–295 <sup>1)</sup>        | 100–3.000                                  | 190  |

<sup>1)</sup> Daten ab 2001

**Waldklimastationen mit Spurenelementanalysen**

Seit 1998 werden an elf bayerischen Waldklimastationen die Spurenelementeinträge im Niederschlag ermittelt. Im zweiwöchentlichen Rhythmus werden auf der Freilandstation in unmittelbarer Nähe zu den Waldbeständen in offenen Niederschlagssammlern die Schwermetallmengen erfasst, die von oben in die Wälder eingetragen werden. Da die Baumkronen jedoch auch Schadstoffe aus der Luft ausfiltern können und diese dann mit dem Regenwasser auf den Waldboden gelangen, wird seit 2005 auch in den WKS-Waldbeständen die Kronentraufe auf Schwermetalleinträge analysiert.

| Waldklimastationen  | Höhe [m ü.NN] | Waldbestand |
|---------------------|---------------|-------------|
| Altdorf (ALT)       | 406           | Kiefer      |
| Berchtesgaden (BER) | 1500          | Lärche      |
| Ebersberg (EBE)     | 540           | Fichte      |
| Flossenbürg (FLO)   | 840           | Fichte      |
| Freising (FRE)      | 508           | Buche/Eiche |
| Goldkronach (GOL)   | 800           | Fichte      |
| Mitterfels (MIT)    | 1025          | Buche       |
| Pegnitz (PEG)       | 440           | Kiefer      |
| Rothenkirchen (ROK) | 670           | Fichte      |
| Rothenbuch (ROT)    | 470           | Eiche       |
| Würzburg (WUE)      | 330           | Eiche       |

zur Lage der Waldklimastationen siehe Karte Seite 40

**Standort- und elementspezifische Unterschiede der Deposition**

Die Waldklimastationen Mitterfels (MIT) und Ebersberg (EBE) zeigen für viele der analysierten Spurenelemente (Aluminium, Arsen, Chrom, Kupfer, Mangan, Blei, Rubidium, Zink) die höchsten *Freilandeinträge* auf. Demgegenüber weisen die Standorte Würzburg (WUE), Flossenbürg (FLO) und Rothenbuch (ROT) für viele Elemente (Aluminium, Arsen, Chrom, Kupfer, Mangan, Molybdän, Blei, Rubidium, Strontium) die bayernweit höchsten *Bestandeseinträge* auf. Generell am geringsten belastet sind die tiefer gelegenen Standorte Altdorf (ALT) und Pegnitz (PEG). Die Standortsunterschiede in der Reihenfolge der Belastung mit Freiland- und Bestandeseinträgen könnten auf unterschiedliche Belastungstypen hindeuten. Spitzenwerte im Bestand bei durchschnittlichen Werten im Freiland deuten beispielsweise darauf hin, dass an dem jeweiligen Standort das nachgewiesene Element bevorzugt als Partikel oder über Nebel eingetragen wird.

In Abbildung 1 sind die jährlichen Mittelwerte der Frachten beispielhaft für das Element Blei dargestellt. Die höchste Bleifracht im Bestand weist die WKS Flossenbürg (FLO) auf. Neben der Grenznähe zu Tschechien ist dies möglicherweise auch auf eine direkt in Flossenbürg angesiedelte Metallgießerei zurückzuführen sowie auf den Auskämmeffekt der vergrößerten Oberflächenrauigkeit der immergrünen Fichtenbestände mit anschließender Auswaschung (FLO und GOL), die für Blei besonders relevant sind. Über alle Standorte hinweg wurde zudem ein hoch signifikanter Zusammenhang zwischen den Depositionsfrachten von Sulfat und Blei nachgewiesen. Möglicherweise werden beide Elemente aus den gleichen Quellen freigesetzt, z. B. aus Kohlekraftwerken. Bei anderen Elementen unterscheiden sich die Einträge standortspezifisch nicht so stark.

Tabelle 2: Quotienten der jährlichen Mittelwerte aus Bestandes- und Freilandeintrag als Indikator für Kronenraumprozesse

| Element   | Quotient |
|-----------|----------|
| Aluminium | 2        |
| Arsen     | 1        |
| Bismut    | 1        |
| Chrom     | 1        |
| Kupfer    | 2        |
| Mangan    | 41       |
| Molybdän  | 1        |
| Blei      | 1        |
| Rubidium  | 12       |
| Strontium | 4        |
| Vanadium  | 1        |
| Zink      | 2        |

Prozesse im Kronenraum (Filterung, Aufnahme bzw. Freisetzung von Elementen) steuern die Deposition in den Waldböden maßgeblich. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass diese Prozesse elementspezifisch sind. Der Quotient (der jährlichen Mittelwerte) aus Bestandeseintrag und Freilandeintrag (Tabelle 2) ist ein Indikator dafür, wie relevant Prozesse im Kronenraum für die Elementdeposition sind. Je näher dieser Wert an 1 liegt, umso unbedeutender sind Kronenraumprozesse. Die Quotienten von Mangan, Rubidium und Strontium liegen (in absteigender Reihenfolge) deutlich über denen von Aluminium, Kupfer und Zink. Ursache für den hohen Quotienten für Mangan könnte die Auswaschung aus den Blättern oder Nadeln der Bäume sein. Die hohen Werte für Rubidium und Strontium wurden im Rahmen dieser Studie erstmals entdeckt. Gründe dafür sind noch unbekannt. Die im Rahmen des Waldmonitorings erhobenen Daten zeigen daher, welches hohes Potential in diesen Werten steckt, wenn es darum geht, elementspezifische Unterschiede der Kronenraumprozesse zu identifizieren und die Ursachen dafür abzuleiten.

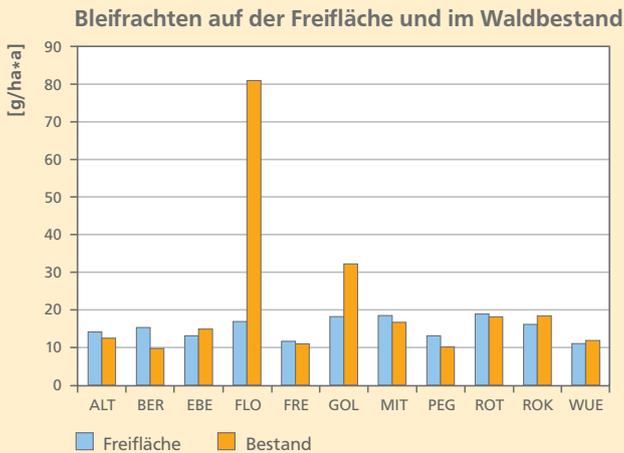


Abbildung 1: Mittelwerte der jährlichen Bleifrachten von 1998 bis 2008 im standörtlichen Vergleich

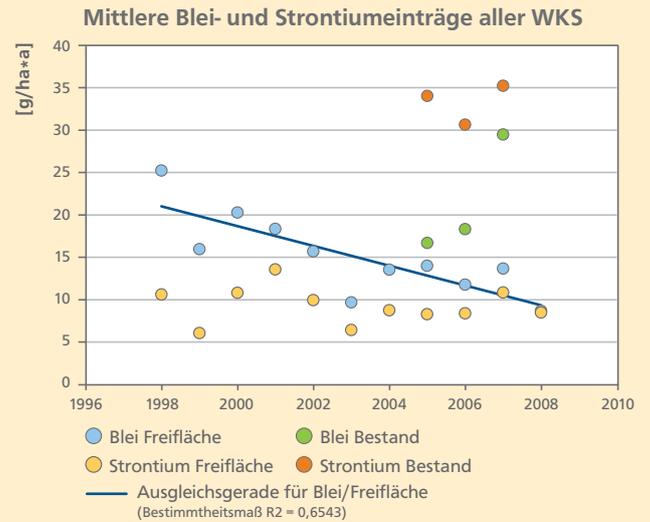


Abbildung 2: Entwicklung der mittleren Blei- und Strontiumeinträge an den Waldklimastationen auf den Freiland- und auf den Bestandesmessflächen von 1998 bis 2008

**Mittelfristige Tendenzen**

Unabhängig von den unterschiedlichen Standorten und der Höhe der Frachten lässt sich generell eine eher abnehmende bis gleich bleibende Tendenz der Schwermetalleinträge im Freiland im Zeitraum von 1998 bis 2008 erkennen. Dies deckt sich auch mit Ergebnissen anderer Dauerbeobachtungsflächen. Dennoch sind standortsunabhängig elementspezifische Unterschiede der Tendenzen zu erkennen. Trotz leichter jährlicher Schwankungen liegen die Elemente Kupfer, Mangan, Rubidium und Zink im Freiland im Untersuchungszeitraum auf relativ gleich bleibend hohem Niveau, für die Elemente Arsen, Aluminium und Strontium lässt sich eine leichte und für Bismut, Chrom, Molybdän, Vanadium und Blei eine deutliche Abnahme feststellen. Die Entwicklung der mittleren Blei- und Strontiumeinträge für die Freiland- und für die Bestandes-situation zeigt Abbildung 2. Zurückzuführen ist der Rückgang bei Blei wahrscheinlich auf das Verbot bleihaltiger Kraftstoffe, die in der Vergangenheit Hauptquelle des atmosphärischen Eintrags waren, oder auch auf die Installation von Filteranlagen in den Kohlekraftwerken. Insgesamt lässt sich die mittelfristige Entwicklung im Bestand wegen des dort bisher nur drei Jahre umfassenden Zeitraums nicht prognostizieren.

**Monitoringprogramm mit Seltenheitswert, aber großem Forschungsbedarf**

Auch wenn die Entwicklung der Schwermetalleinträge insgesamt eher rückläufig ist, sollte eine Fortführung des Monitorings angestrebt werden, um Eintragsentwicklungen auch langfristig erfassen zu können. Neben den relativ lückenlos erhobenen Freilanddaten ist es wichtig, vor allem auch die Bestandesdeposition weiter zu verfolgen, um auch hier die mittelfristigen Eintrags-tendenzen ermitteln und den Effekten im

Kronenraum weiter nachgehen zu können. Das Elementspektrum ist besonders breit und umfasst auch bisher in noch geringem Umfang analysierte Elemente (wie z. B. Rubidium, Strontium, Chrom), für deren Verhalten in der Umwelt generell noch Forschungsbedarf besteht. Eine weiterführende, systematische Auswertung der Daten birgt die Möglichkeit, Eintragsmuster und Kronenraumprozesse für die verschiedenen Elemente aufzuklären. Die Auswertung der begleitenden Blattanalysen an den Waldklimastationen wird die Erforschung dieser Effekte unterstützen. Derartige Forschungen könnten dann zur dringend erforderlichen Ableitung kritischer Eintragsgrenzwerte für Schwermetalle beitragen.

**Literatur**

Auf Anfrage bei den Verfassern und unter: [www.lwf.bayern.de](http://www.lwf.bayern.de)

Judith Pielert war als wissenschaftliche Hilfskraft an der LWF beschäftigt. [judith.pielert@googlemail.com](mailto:judith.pielert@googlemail.com)  
 PD Dr. habil. Friederike Lang ist Heisenberg-Stipendiatin der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und derzeit am Fachgebiet Bodenkunde der Technischen Universität Berlin in Forschung und Lehre tätig. [fritzi.lang@tu-berlin.de](mailto:fritzi.lang@tu-berlin.de)  
 Christoph Schulz leitet das Sachgebiet »Klima und Wasserschutz« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Dr. Stephan Raspe ist Mitarbeiter in diesem Sachgebiet. [Christoph.Schulz@lwf.bayern.de](mailto:Christoph.Schulz@lwf.bayern.de)