

Schwermetallbelastung der Wälder

Nils König, Heike Fortmann, Uwe Klinck, Birte Scheler und Markus Wagner

Im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings werden neben den Säure- und Stickstoffeinträgen seit den 1980er Jahren auch die Belastungen der Waldökosysteme mit Schwermetallen erfasst.

Ursprung der Schwermetallbelastung

Ungeachtet ihres Risikopotenzials wurden durch Verbrennungsprozesse und im Rahmen der Güterproduktion in der Vergangenheit große Mengen an Schwermetallen wie Blei, Cadmium, Kupfer, Quecksilber, Chrom, Kobalt, Nickel oder Zink in die Atmosphäre freigesetzt. Durch den atmosphärischen Ferntransport kam es auch in Wäldern, die weit entfernt von den Emissionsquellen liegen, zu einer Anreicherung von Schwermetallen.

Zu den hinsichtlich ihrer Toxizität relevantesten Schwermetallen gehört das Blei. Es wurde früher als Antiklopfmittel dem Benzin zugesetzt. Außerdem ist es ein wichtiger Bestandteil von Legierungen und wird in Bleiakkumulatoren verwendet. Bleipigmente werden auch in großem Maßstab für rostschützende Grundierungen und Farben benötigt.

Ein weiteres bedeutsames Schwermetall ist Cadmium, das in verschiedenen Legierungen, in Batterien, in einigen Leuchtfarben und in Düngemitteln enthalten ist und als Stabilisator in Kunststoffen sowie als Korrosionsschutz verwendet wird. Trotz seiner Toxizität ist Cadmium in den Produkten des Alltags nahezu allgegenwärtig.

Andere Schwermetalle wie Kupfer, Zink oder Kobalt stellen wichtige Mikronährstoffe dar und sind erst in höheren Konzentrationen giftig.

Schwermetalle in der Umwelt

Schwermetalle können als Stäube durch die Atmosphäre weit verteilt werden und gelangen so in Gewässer und Böden. In Gewässern werden sie schnell verdünnt und fallen teilweise als schwerlösliche Carbonate, Sulfate oder Sulfide aus, die sich zunächst in den Gewässerböden anreichern. Wenn die Anlagerungskapazität der Sedimente erschöpft ist, steigt die Konzentration der Schwermetallionen im Wasser an.

Höhere Schwermetallgehalte in Waldböden stellen in erster Linie eine Gefahr für die Organismen der Zersetzerkette im Boden dar. Moose, krautige Pflanzen und Bäume werden erst bei höheren Belastungen geschädigt. Die Löslichkeit und damit auch die Toxizität von Schwermetallen im Boden hängt in starkem Maße vom Säuregrad (pH-Wert) sowie vom Ton- und Humusgehalt des Bodens ab, da hohe pH-Werte sowie hohe Ton- und Humusgehalte zur Immobilisierung der Metalle beitragen. Eine Bewertung des Gefahrenpotenzials von Schwermetallen lässt sich somit nur unter Berücksichtigung weiterer bodenchemischer Kenngrößen durchführen. In besonders sauren sowie ton- und humusarmen Böden können Beeinträchtigungen der physiologischen Aktivität der Mikroorganismen bereits bei geringen Schwermetallgehalten auftreten. Da Waldböden nicht wie landwirtschaftliche Böden umgepflügt werden, kann es zu besonders hohen Anreicherungen der Schwermetalle im Humus und dem oberen Mineralboden kommen.

Waldböden enthalten je nach Ausgangsgestein natürlicherweise gewisse Mengen an Schwermetallen. Dies ist der sogenannte geogene Anteil. Bei der Bewertung der Toxizität muss dies berücksichtigt werden. Zusätzliche, anthropogen (vom Menschen verursacht) eingetragene Schwermetalle werden zunächst von den Huminstoffen im Boden gebunden oder an mineralischen Oberflächen angelagert. Sie sind leichter für Pflanzen und Mikroorganismen verfügbar und damit gefährlicher. Durch unterschiedliche Aufschluss- und Extraktionsmethoden können die anthropogenen und geogenen Anteile der Schwermetalle analytisch getrennt bestimmt werden.

Schwermetallmonitoring

Im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings der Länder Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein werden auf 20 Versuchsflächen seit über 30 Jahren Schwermetallein- und -austräge untersucht. Die Untersuchungsflächen wurden zum Teil im Rahmen der Waldschadensforschung in den 1970er und 1980er Jahren angelegt. Im Rahmen der Bodenschutz- und Waldmonitoringprogramme der Länder sowie des europäischen Level II-Programms wurden die damals begonnenen Untersuchungen fortgeführt.



Frühere Schwermetallquelle für Bleibelastung: Verkehr

Foto: J. Weymar

Schwermetallbelastung der Wälder

Ziel dieser Untersuchungen ist es, die zeitliche Entwicklung der Schwermetalleinträge zu quantifizieren, ihre Anreicherung im Boden zu ermitteln und die Auswirkungen auf das Ökosystem zu bestimmen. Zu diesen Auswirkungen gehören die Fixierung der abgelagerten Schwermetalle auf Pflanzen- und Bodenoberflächen sowie die Tiefenverlagerung der Schwermetalle im Boden. Einhergehend mit diesen Prozessen kann es zu einer Aufnahme durch die Bodenmikroorganismen sowie die Wurzeln der Bäume und der sonstigen Bodenvegetation kommen. Auch in der Biosphäre des Waldökosystems ist demnach eine Anreicherung der Schwermetalle möglich, die bei der Überschreitung tolerierbarer Gehalte toxische Wirkungen haben kann.

Schwermetalleinträge in Waldökosysteme

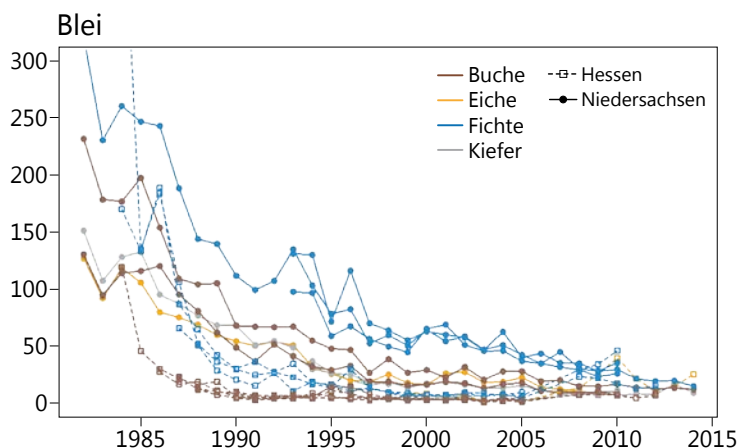
Seit mehr als zwei Jahrzehnten nehmen die Emissionen vor allem in Mitteleuropa und Nordamerika ab, was auf veränderte Produktionstechniken und gesetzliche Vorgaben der jüngsten Vergangenheit zurückzuführen ist. Besonders die dabei angewandten Staubminderungsmaßnahmen und die Stilllegung veralteter Produktionsstätten sowie die Einführung von bleifreiem Benzin führten zu einer erheblichen Verringerung der Schwermetallemissionen.

In den Abbildungen unten ist die Entwicklung der Blei- und Cadmiumeinträge über die Kronentraufe auf 20 Monitoringflächen in Niedersachsen und Hessen in den letzten

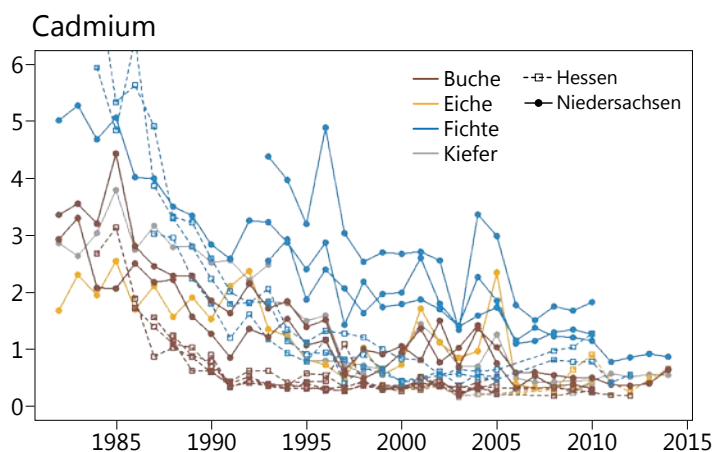
32 Jahren dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Einträge auf allen Flächen seit den 1980er Jahren teilweise um den Faktor 10 verringert haben. Hauptgründe für diese Reduktion sind die in den 1980er Jahren verordnete Abgasreinigung der großen Kohlekraftwerke und das damals beschlossene Benzin-Blei-Gesetz.

Während z. B. in den 1970er Jahren die Bleiemissionen in Westdeutschland allein aus dem Kfz-Verkehr rd. 7000-8000 Tonnen pro Jahr betrugen, ging die Emission bis 1995 auf wenige hundert Tonnen zurück. Im gleichen Zeitraum sank der Bleigehalt im Schwebstaub der Luft an den Messstationen des Umweltbundesamtes um 95 %. Mittlerweile rückt durch die Verwendung von bleifreiem Treibstoff die Bedeutung der Bleiemissionen durch das Verkehrswesen immer weiter in den Hintergrund. Mittlerweile wird Blei vor allem noch bei Verhüttungsprozessen emittiert.

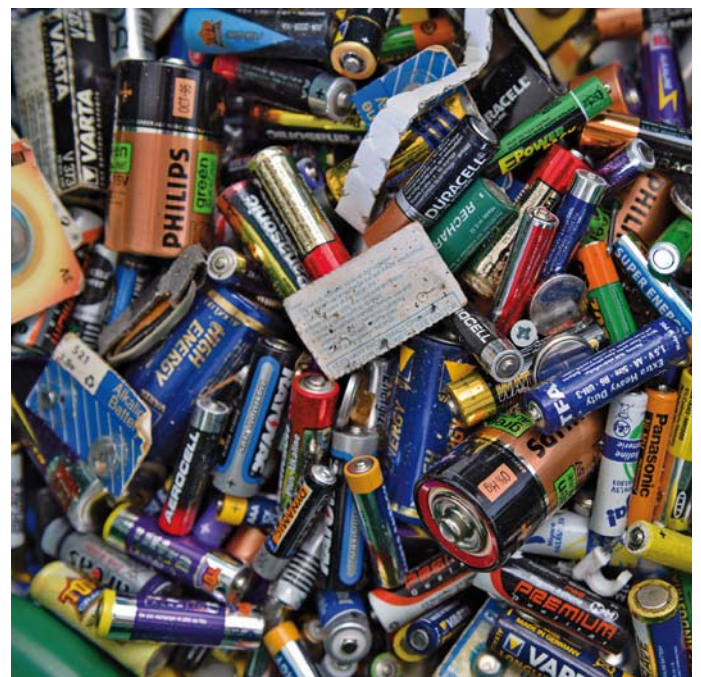
Die Einträge bei den Nadelbaumflächen sind deutlich höher als bei den Laubbaumflächen (Abbildungen links). Dies liegt an der größeren Auskämmwirkung der ganzjährig begreenen Nadelbäume gegenüber den winterkahlen Laubbäumen. Die scheinbar niedrigeren Einträge auf den hessischen Flächen (gestrichelte Linien) sind auf eine andere Messtechnik auf diesen Versuchsflächen zurückzuführen. In Hessen wurden für die Schwermetallbestimmung die Niederschlagsproben aus den Sammlern für die Erfassung der Säure- und Staubeinträge verwendet. In Niedersachsen hingegen wurden von Anfang an spezielle Schwermetallsammler verwendet, bei denen auch die an den Gefäßwänden angelagerten Anteile der Schwermetalle erfasst werden. Laborversuche haben ergeben, dass die Vernachlässigung dieser Fraktion die Einträge je nach Element um das 2 bis 5fache unterschätzt. Ab 2007 wurden dann auch in Hessen spezielle Schwermetallsammler verwendet. Seit diesem Zeitpunkt liegen die erfassten Eintragsmengen in einer ähnlichen Größenordnung. Der Rückgang der Schwermetalleinträge gilt auch für alle anderen untersuchten Schwermetalle wie Kupfer, Zink, Kobalt, Nickel oder Chrom, was den Erfolg der zahlreichen Umweltgesetze aus den 1980er und 1990er Jahren nochmals unterstreicht.



Jährliche Blei-Einträge (g je Hektar) mit der Kronentraufe für 20 Flächen des Intensiven Waldmonitorings in Hessen und Niedersachsen von 1982-2014



Jährliche Cadmium-Einträge (g je Hektar) mit der Kronentraufe für 20 Flächen des Intensiven Waldmonitorings in Hessen und Niedersachsen von 1982-2014



Schwermetallquelle: verbrauchte Batterien

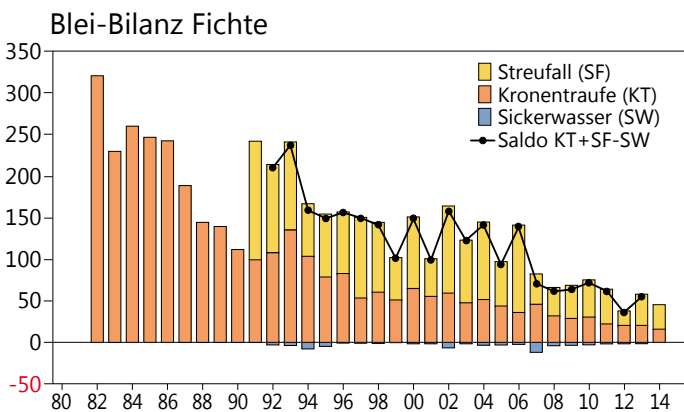
Foto: J. Evers

Schwermetallbelastung der Wälder

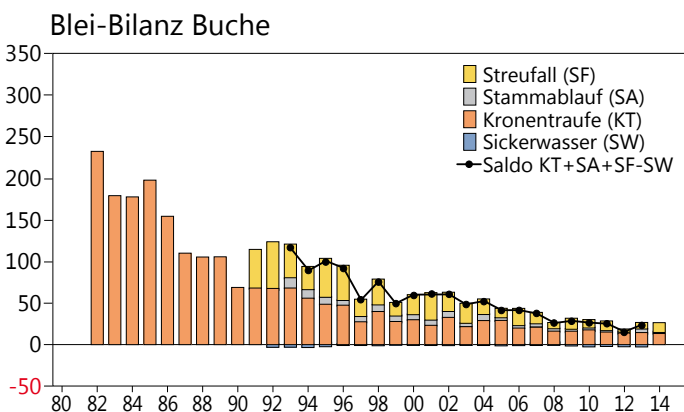
Schwermetallbilanzen

Neben den Einträgen mit der Kronentraufe sind hinsichtlich der Menge noch die Einträge mit der Nadel- oder Blattstreu und – besonders bei Buchenbeständen – die mit dem Stammablauf von Bedeutung. Der Vergleich der Summe der Einträge mit den Austrägen im Sickerwasser unterhalb des Wurzelraums ergibt die Schwermetallbilanz. Diese Bilanz lässt erkennen, ob die Metalle im Waldboden gespeichert werden oder ob sie das System verlassen und damit eine Gefahr für das Grundwasser werden können.

Am Beispiel der ältesten Versuchsflächen im Solling werden die Bilanzen für Blei und Cadmium auf einer Fichten- und einer Buchenfläche vorgestellt (Abbildungen unten und rechts). Dabei ist zu beachten, dass sich Blei und Cadmium im Waldökosystem unterschiedlich verhalten. Blei wird stark an mineralischen Oberflächen angelagert und in Humuskomplexen gebunden; es wird praktisch nicht über die Wurzeln aufgenommen. Cadmium hingegen wird zum einen nur schwach angelagert und zum anderen leichter über die Wurzel aufgenommen. Während sich für Blei die Einträge als Summe aus Kronentraufe, Streufall und Stammablauf berechnen, liegen die Cadmumeinträge zwischen dieser Summe und der Summe von Kronentraufe und Stammablauf, da ein Teil des Streueintrags aus dem über die Wurzeln aufgenommenen Cadmium (interner Kreislauf) stammt und deshalb nicht als direkter Eintrag zu werten ist. Die resultierende Eintrags-Austragsbilanz ist bei Blei mit der schwarzen

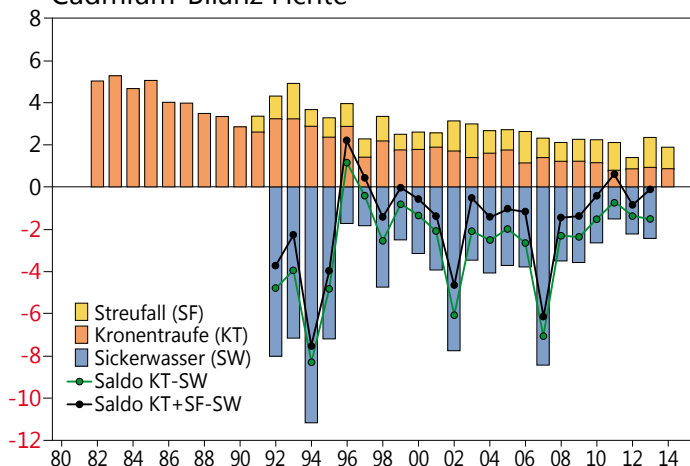


Jährliche Blei-Bilanz und -Salden aus Ein- und Austrägen (g je Hektar) für eine Fichtenfläche im Solling von 1982-2014. Die schwarze Linie entspricht dem Saldo aus Kronentraufe plus Streufall minus Austrag.



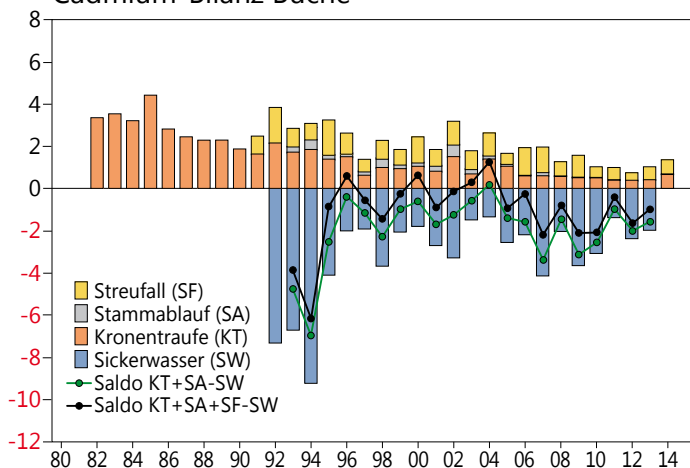
Jährliche Blei-Bilanz und -Salden aus Ein- und Austrägen (g je Hektar) für eine Buchenfläche im Solling von 1982-2014. Die schwarze Linie entspricht dem Saldo aus Kronentraufe plus Stammablauf plus Streufall minus Austrag.

Cadmium-Bilanz Fichte

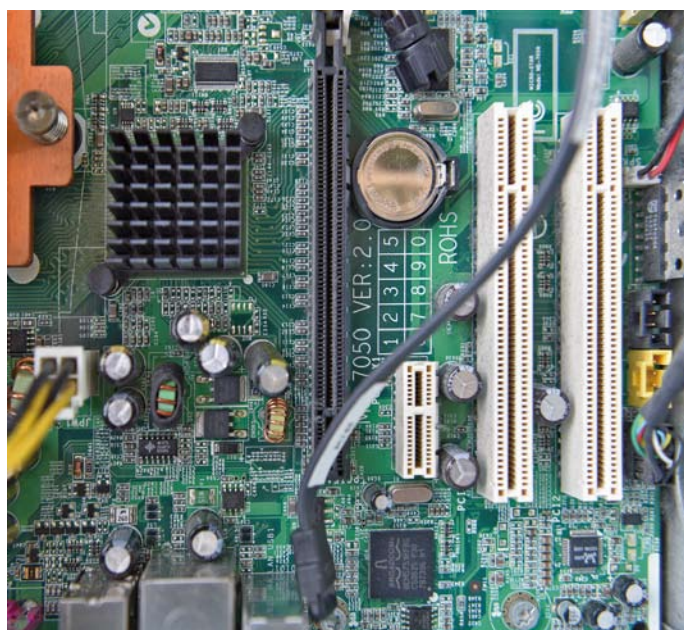


Jährliche Cadmium-Bilanz und -Salden aus Ein- und Austrägen (g je Hektar) für eine Fichtenfläche im Solling von 1982-2014. Die schwarze Linie entspricht dem Saldo aus Kronentraufe plus Streufall minus Austrag, die grüne Linie dem aus Kronentraufe minus Austrag.

Cadmium-Bilanz Buche



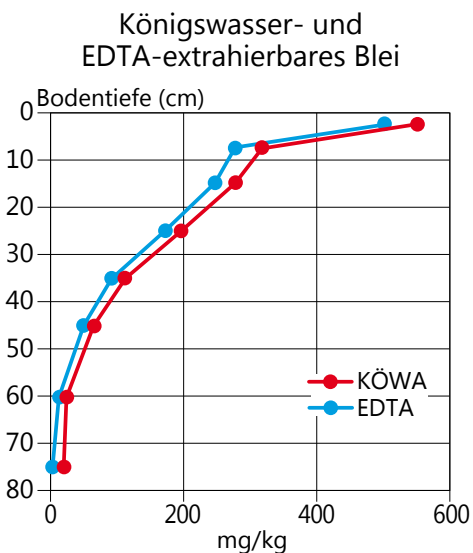
Jährliche Cadmium-Bilanz und -Salden aus Ein- und Austrägen (g je Hektar) für eine Buchenfläche im Solling von 1982-2014. Die schwarze Linie entspricht dem Saldo aus Kronentraufe plus Stammablauf plus Streufall minus Austrag, die grüne Linie dem aus Kronentraufe plus Stammablauf minus Austrag.



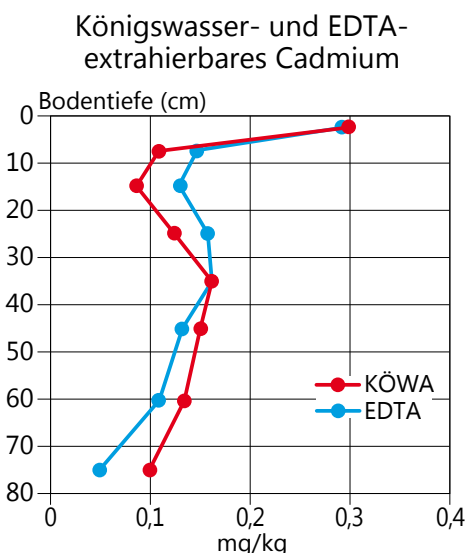
Schwermetallquelle: Computerplatine

Foto: J. Evers

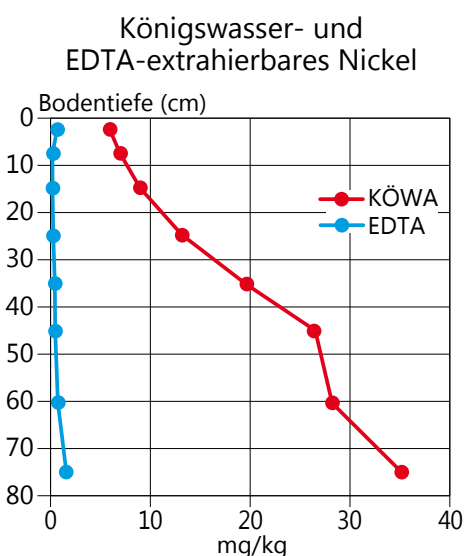
Schwermetallbelastung der Wälder



Tiefenprofil der Blei-Gehalte [mg/kg] im Harz (Lange Bramke Kamm) nach unterschiedlichen Extraktionsverfahren



Tiefenprofil der Cadmium-Gehalte [mg/kg] im Harz (Lange Bramke Kamm) nach unterschiedlichen Extraktionsverfahren



Tiefenprofil der Nickel-Gehalte [mg/kg] im Harz (Lange Bramke Kamm) nach unterschiedlichen Extraktionsverfahren

Linie beschrieben. Bei Cadmium liegt sie zwischen der schwarzen und der grünen Linie. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Bilanz bei Blei (schwarze Linie) auf beiden Flächen positiv ist, das eingetragene Blei also nahezu komplett im Boden gespeichert wird. Bei Cadmium fällt die Bilanz in fast allen Jahren negativ aus, was bedeutet, dass mehr Cadmium das Ökosystem unterhalb der Wurzelzone verlässt als eingetragen wird. Diese für den Solling dargestellten Sachverhalte gelten beim Blei auch für alle anderen untersuchten Flächen in ähnlicher Weise. Für Cadmium sind die Bilanzen auf den unterschiedlichen Versuchsflächen je nach Bodenart und Versauerungsgrad durchaus unterschiedlich; es gibt auch Flächen mit einer positiven Bilanz.

Unterscheidung geogener und anthropogener Schwermetallanteile

Um Aussagen über den Verbleib der eingetragenen Schwermetalle im Boden machen zu können, wurden auf allen Versuchsflächen sowohl die Gesamtgehalte der Metalle (Königswasser-extrahierbar; dies entspricht für die meisten Metalle den Gesamtgehalten) in der Humusauflage und den verschiedenen Bodentiefen untersucht als auch der über die Luftverschmutzung eingetragene Anteil (EDTA-extrahierbar; EDTA ist ein Komplexbildner, der in erster Linie die Metallionen, die an der Bodenoberfläche angelagert oder in Humuskomplexen gebunden sind, bindet und extrahiert). Dadurch ist erkennbar, ob die Schwermetallbelastung eines Bodens geogenen (dem Ausgangsgestein zuzusprechenden) oder anthropogenen Ursprungs ist (Abbildungen links). Die Bleigehalte im Boden nehmen für die Beispielfläche im Harz (Lange Bramke) mit der Tiefe deutlich ab und sind fast ausschließlich anthropogenen Ursprungs (Abbildung links oben). Das eingetragene Blei wird vornehmlich in der Humusauflage und im oberen Mineralboden gespeichert und angereichert. Auch Cadmium ist nahezu vollständig durch Luftverschmutzung in den Waldboden gelangt (Abbildung links Mitte; die EDTA-extrahierbaren Anteile sind im Oberboden nur scheinbar höher als die Königswasser-extrahierbaren, die Streuung der Daten für beide Methoden liegt bei 20 bis 40 %, sodass kein signifikanter Unterschied festzustellen ist). Es ist im Vergleich zum Blei schon

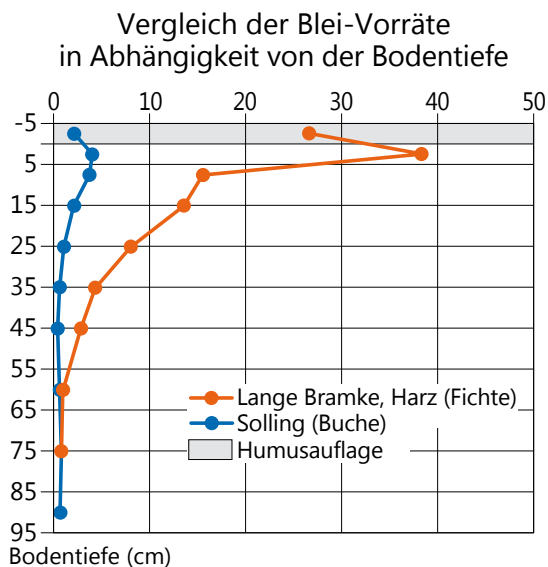


Schwermetallquelle: Kohlekraftwerke

Foto: M. Spielmann

Schwermetallbelastung der Wälder

in größere Tiefen eingesickert und verteilt sich deshalb gleichmäßiger im Bodenprofil. Nahezu rein geogenen Ursprungs ist hingegen Nickel; hier ist der zusätzliche Eintrag durch den Menschen vernachlässigbar. Der Gesamtgehalt nimmt mit der Tiefe deutlich zu, was gleichfalls auf die Herkunft aus dem Ausgangsgestein hinweist (Abbildung Seite 29 unten). Diese für eine Fichtenfläche im Harz getroffenen Aussagen gelten auch für die meisten anderen Versuchsflächen. Bei Kupfer und Zink stammt nur ein geringer Teil aus anthropogenen Quellen. Kobalt, Nickel und Chrom sind nahezu ausschließlich geogenen Ursprungs.



Tiefenprofil der Blei-Vorräte (kg je Hektar und cm) in der Langen Bramke, Harz (Fichte) und im Solling (Buche)



Entnahme eines Schwermetall-Sammelgefäßes
Foto: NW-FVA



Depositions-Messfläche mit Schwermetallsammlern (Nr. 5 und Nr. 2) Foto: NW-FVA

Die von allen untersuchten Flächen am höchsten belastete ist der Standort Lange Bramke im Harz. Hier wurden aufgrund der langen, schon im Mittelalter begonnenen Erzbergbau-Tätigkeiten über Jahrhunderte große Mengen an schwermetallhaltigen Stäuben in die Waldökosysteme eingetragen. Die Gehalte im Boden z. B. für Blei sind hier um den Faktor 5 bis 10 höher als im Solling (Abbildung links). Dennoch wird das gesamte Blei im Boden gespeichert; es ist aber schon bis in eine Tiefe von etwa 50 cm vorgedrungen.

Fazit

Das Schwermetall-Monitoring belegt eindeutig die großen Erfolge der Luftreinhaltepolitik der 1980er und 1990er Jahre. Die Einträge von Schwermetallen haben drastisch abgenommen und sind nun in den industriefernen Waldgebieten auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Die meisten der eingetragenen Schwermetalle werden in der Humusauflage und im oberen Mineralboden gespeichert und können dort hohe Konzentrationen erreichen. Lediglich das sehr mobile Cadmium ist bereits in tiefere Bodenschichten eingedrungen und wird kontinuierlich in die Zone unterhalb des Wurzelraums ausgewaschen. Eine Fortsetzung des Monitorings erlaubt es, das weitere Verhalten und Eindringen der bislang ausgewählten Schwermetalle beobachten und gleichzeitig neue Belastungen frühzeitig erkennen zu können.