



UmweltWissen – Schadstoffe

Luftschadstoffe – Wirkung in Ökosystemen



Der saure Regen gab den Anstoß für bayernweite Messprogramme. Heute haben sich die Wälder auch in den Kammlagen der Mittelgebirge großteils erholt. Mittlerweile stehen daher neue Schadstoffe und Untersuchungen rund um ausgewählte Anlagen im Fokus.

Bereits in den 1970er-Jahren wurde – unter dem Eindruck des Waldsterbens – mit Untersuchungen begonnen, die sich mit der Wirkung des sauren Regens auf Ökosysteme befassten. Durch flächendeckende Messungen konnte im Lauf der Jahre sogar die Wirkung von Luftreinhaltemaßnahmen dokumentiert werden.

Heute sind vor allem Untersuchungen in der Nähe ausgewählter Anlagen wichtig, um frühzeitig Schadstoffanreicherungen nachzuweisen. Interessant kann dabei zum Beispiel ein Schredderbetrieb, eine Zementfabrik oder auch ein Flughafen sein. Doch wann sind die Werte um eine Anlage tatsächlich erhöht? Nur ein Vergleich mit dem unbelasteten Hintergrund ermöglicht diese Einschätzung. Solche Hintergrundwerte zu ermitteln, steht daher ebenfalls im Fokus. Nicht zuletzt wird das Messprogramm weiter entwickelt, um auch neue Aspekte des Umweltschutzes zu berücksichtigen: Jüngstes Beispiel sind die sogenannten Gewürzmetalle, also Seltene Erden oder kritische Metalle die unter anderem in Produkten der Kommunikationstechnik, Medizintechnik oder Elektromobilität nur einen geringen Anteil haben, aber unerlässlich sind. Wie viele andere Metalle können sie feinst verteilt über die Luft in Ökosysteme eingetragen werden.

Einen knappen Überblick zu ausgewählten Luftschadstoffen, ihren möglichen Wirkungen und zu Messmethoden finden Sie in dieser Publikation.

1 Eintrag von Schadstoffen in Ökosysteme

Der Transport von Spurenstoffen in der Atmosphäre kann sehr weiträumig sein und während dieses Transportes finden einige Umwandlungsprozesse statt. Wo die Spurenstoffe abgelagert werden, hängt von meteorologischen Faktoren, aber auch von physikalisch-chemischen Eigenschaften der Substanzen sowie vom Bewuchs und den Geländeeigenschaften ab.

Von **trockener Deposition** spricht man, wenn Stoffe ohne den Einfluss von Regen und Schnee abgelagert werden. Nahe bei Emittenten werden eher Grobpartikel abgelagert, während fernab zunehmend feine Partikel, Aerosole oder gasförmige Stoffe dominieren.

In Waldgebieten und Städten ist die trockene Deposition besonders hoch, da die Schadstoffe hier geradezu „ausgekämmt“ werden. Generell gilt: je „rauer“ die Oberfläche, desto höher die trockene Deposition. So kann sich der Eintrag in Waldgebiete im Vergleich zu einer offenen Wiesenfläche um den Faktor drei erhöhen. Die trockene Deposition ist in vielen Ökosystemen der wichtigste Eintragspfad.

Bei der **nassen Deposition** werden die Spurenstoffe mit dem Niederschlagswasser aus der Atmosphäre ausgewaschen, unabhängig von der Vegetation und vom Gelände. Dies ist vor allem in regenreichen Gebieten ein wichtiger Eintragspfad.

Feuchte Deposition nennt man den Eintrag von Substanzen, die im Nebel gelöst sind. Da die feinstverteilten Nebeltröpfchen eine sehr große Oberfläche haben, können sie eine Schadstofflast tragen, die sehr viel höher ist als bei der nassen Deposition.

Dieser Eintragspfad ist in den nebelreichen Kammlagen der Mittelgebirge von Bedeutung und hat wesentlich zum sogenannten Waldsterben dort beigetragen. Insgesamt „kämmt“ Nadelbäume viel mehr Schadstoffe aus dem Nebel als Laubbäume, da sie eine größere Oberfläche haben und während des ganzen Jahres die Nadeln behalten.

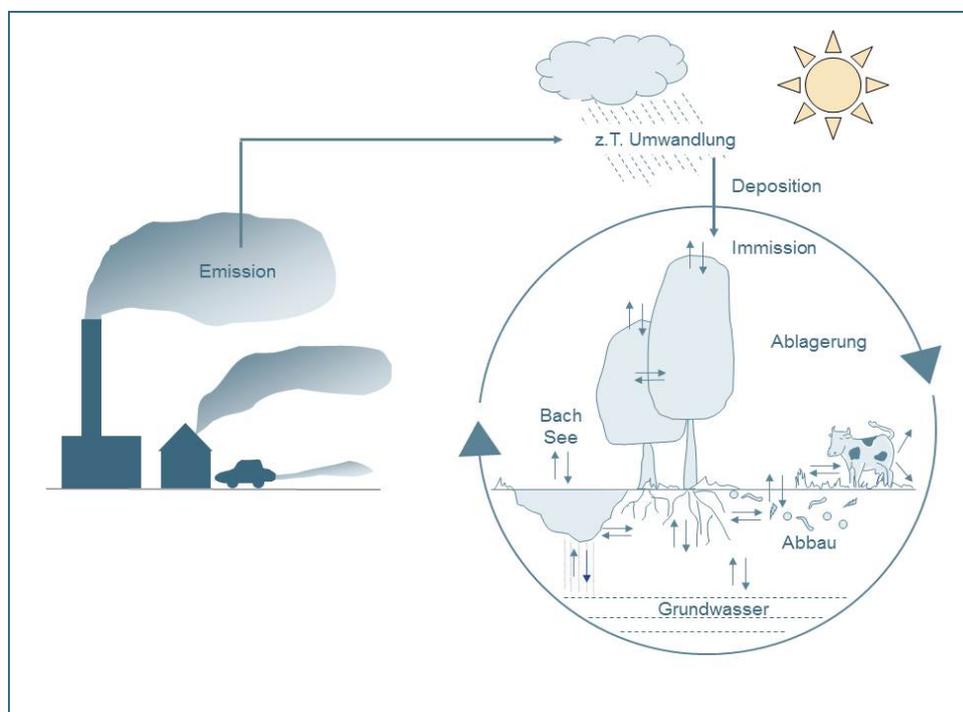


Abb. 1: Schadstoffe werden zum Teil über weite Strecken verfrachtet. Einmal abgelagert, können sie Lebewesen schädigen oder die Stoffflüsse verändern, so dass auch angrenzende Ökosysteme betroffen sind. Die Anreicherung von Schadstoffen ist daher als erstes Vorwarn-Signal für komplexe und oft nicht voraussagbare Veränderungen zu verstehen.

Weitere Informationen: LANDESAMT FÜR UMWELT

- ▶ [Ammoniak und Ammonium](#)
- ▶ [Umweltmedium Luft](#)

2 Wirkung von Stoffen in Ökosystemen

Die Wirkungen von Stoffen sind oft sehr komplex und nur langfristig zu erkennen. So kann zum Beispiel ein Boden durch Säureeinträge seine Puffer- und Filterfunktion verlieren, wodurch angestammte Arten dort nicht mehr überleben können. Über Nahrungs- oder Futterpflanzen können Schadstoffe in die Nahrungskette gelangen und auch die menschliche Gesundheit belasten.

Als erste Stufe einer Wirkung auf Organismen – und damit als erstes Vorwarnsignal – gilt bereits die **Anreicherung** bestimmter Stoffe. Die **Veränderungen** in Organismen oder gar Ökosystemen sind kaum vorherzusagen, da die physiologischen Abläufe und die vielfältigen Wechselbeziehungen innerhalb von Ökosystemen sehr komplex sind. Sie können einzelne Individuen, die Artenzusammensetzung der Pflanzengemeinschaft oder sogar das ganze Ökosystem beeinflussen. Einige Beispiele für Wirkungen von Schadstoffeinträgen auf Pflanzen sind:

- **Stoffwechsel:** Verschiedene Arten reagieren meist sehr unterschiedlich. So können manche Pflanzenarten auf sehr salzigen Böden überleben, wo sie kaum Konkurrenz durch empfindlichere Arten haben.
- **Lebensraum:** Reichern sich Schadstoffe langfristig im Boden an, verändern sich die Wachstumsbedingungen für Pflanzen und Tieren. Zum Beispiel wird in viele naturnahe Ökosysteme zu viel Stickstoff eingetragen, der stark düngend wirkt. Viele Arten der Roten Liste sind jedoch auf nährstoffarme Standorte angewiesen, da sie nur dort mit Pflanzen konkurrieren können, die bei hohem Stickstoffangebot sehr rasch wachsen.

Weitere Informationen

LANDESAMT FÜR UMWELT: ► [Ammoniak und Ammonium](#)



Abb. 2: Säureeinträge in skandinavische Gewässer lenkten erstmals das Augenmerk auf den Ferntransport von Schadstoffen: Die Abgase kamen aus dem englischen Industriegürtel.



Abb. 3: Nadelbäume käumen Schadstoffe aus dem Nebel. Säurebildner schädigen die Nadeln und führen zu Nährstoffauswaschung aus dem Boden: Ursachen des Waldsterbens.



Abb. 4: Schütterere Heiden beherbergen viele seltene, lichthungrige Arten...



Abb. 5: ... wie die kleinwüchsige Küchenschelle.



Abb. 6: Viele Luftschadstoffe wirken düngend, so dass immer mehr hochwüchsige Allerweltsarten wachsen.

3 Stickstoff- und Schwefelverbindungen

Stickstoffverbindungen fördern das Pflanzenwachstum und tragen mit den Schwefelverbindungen zur Versauerung von Böden und Gewässern bei. Sie werden daher hier gemeinsam behandelt. Quellen von Stickstoff- und Schwefelverbindungen sind Industrie, Straßenverkehr und Landwirtschaft.

Nährstoffanreicherung (Eutrophierung): Jährlich werden über die Luft etwa 25 Kilogramm Stickstoff pro Hektar eingetragen. Noch immer sind fast 75 Prozent der natürlichen oder naturnahen Ökosysteme davon betroffen und eine Trendänderung ist nicht in Sicht. Stickstoff wirkt als Düngung, der starke Wachstumsschub macht die Pflanzen jedoch empfindlicher gegen Trockenheit, Windbruch oder Schädlinge. Manche Arten, die weniger Stickstoff brauchen, werden regelrecht überwuchert, die Artenzusammensetzung verschiebt sich. Gleichzeitig verändern sich viele Prozesse im Boden, es entstehen Nährstoffungleichgewichte, der Boden versauert, Lachgas-Emissionen steigen und wirken als starkes Treibhausgas. Zuletzt steigt auch die Nitratbelastung im Grundwasser.

Versauerung: Der Säureeintrag beeinträchtigt vor allem den Boden und die Gewässer. Die Veränderungen im Boden bleiben lange unbemerkt, bis die Pufferkapazität erschöpft ist. Dann sinkt der pH-Wert plötzlich und stark – mit weitreichenden Folgen: Zum Beispiel werden Schwermetalle mobilisiert und Nährstoffe ausgewaschen, die Bodenstruktur verschlechtert sich und Bodenlebewesen werden geschädigt, was sich auch negativ auf die Artenvielfalt der Pflanzen auswirkt.

Stichwort „Waldsterben“: Das Waldsterben wurde lange Zeit vor allem mit Schwefeldioxid in Verbindung gebracht. Diese Emissionen haben jedoch nach der Rauchgas-Entschwefelung bei Großfeuerungsanlagen stark abgenommen. Auch die Wirkung auf Pflanzen ist erkennbar zurückgegangen. Deutliche **Schäden** zeigen sich nur bei hohen Schwefeldioxid-Konzentrationen, insbesondere wenn gleichzeitig Stickoxide einwirken. In geringen Mengen ist Schwefel sogar ein wichtiger Pflanzennährstoff.

Stichwort „Saurer Regen“: Der sogenannte saure Regen enthält mehrere Komponenten: Schwefeldioxid löst sich im Niederschlagswasser zu Sulfat, Stickstoffoxide und Ammoniak werden im Regen zu Nitrat und Ammonium. Diese Fraktionen tragen gemeinsam zur Säure in Niederschlägen bei. Die Rauchgasentschwefelung hat auch an dieser Stelle Besserung gebracht: Durch den Rückgang der Schwefelemissionen gingen die Säureeinträge seit den 1980er-Jahren deutlich zurück. Heute sind vor allem die Stickstoffverbindungen verantwortlich für die Versauerung von Ökosystemen. Um auch empfindliche Ökosysteme schützen zu können, müssen daher die Emissionen aus dem Verkehr und der Landwirtschaft weiter vermindert werden.



Abb. 7: Mit dem Regen wird immer weniger Säure in die Ökosysteme eingetragen. Dies zeigen langjährige Messreihen. Heute sind die Stickstoffverbindungen (Ammonium und Nitrat) die wichtigste Komponente.

Weitere Informationen: LANDESAMT FÜR UMWELT

- ▶ [Ammoniak und Ammonium](#)
- ▶ [Umweltmedium Boden](#)
- ▶ [Ergebnisse – Eutrophierung und Versauerung](#)

4 Schwermetalle

Schwermetalle kommen überall in der Umwelt vor: Sie werden durch Verwitterung aus Gesteinen freigesetzt oder gelangen durch Vulkanausbrüche in die Umwelt. Technische Quellen sind vor allem:

- **Industrieprozesse:** Bedeutende Quellen sind zum Beispiel Betriebe der Metallbranche.
- **Kfz-Verkehr:** Durch Brems-, Kupplungs- und Reifenabrieb entstehen fein verteilte Stäube, die zum Beispiel Antimon, Bismut, Kupfer, Molybdän oder Zinn enthalten.
- **Landwirtschaft:** Düngemittel und Pestizide können zu einer lokal bedeutsamen Anreicherung zum Beispiel von Kupfer oder Cadmium führen.

Einige Metalle sind **essentielle Nährstoffe** für Mensch und Tier, das heißt, die Zufuhr bestimmter Mengen ist lebensnotwendig. Beispiele sind Mangan, Kobalt, Kupfer, Selen oder Zink. Erst in höheren Konzentrationen wirken diese Metalle toxisch, wobei verschiedene Organismen unterschiedlich empfindlich reagieren. Nicht essentiell sind dagegen Arsen, Blei, Cadmium, Quecksilber oder Thallium.

Viele Schwermetalle schädigen **Bodenorganismen** und wirken so auch indirekt auf die Pflanzen: Bodenorganismen bauen Pflanzenreste in die organische Substanz des Bodens ein. Sind sie weniger aktiv, entsteht kein humoser gut durchlüfteter Boden mehr, der gute Wachstumsbedingungen bietet.

Mobilität und Toxizität der Schwermetalle im Boden sind stark vom pH-Wert abhängig: Bei neutraler Bodenreaktion (pH 7) sind die Schwermetalle vor allem an die Bodenpartikel gebunden. Je stärker die Versauerung, desto mehr Schwermetalle gehen in Lösung. Dann sind sie im Bodenwasser nachweisbar und damit für Pflanzen und Bodenorganismen verfügbar. Außerdem können sie mit der Bodenlösung ins Grundwasser oder in andere Ökosysteme ausgewaschen werden.

Langfristig ist die **Anreicherung** von Schwermetallen problematisch, da sie nicht abgebaut werden können. Besonders Arten am Ende der Nahrungskette können erheblich belastet werden und letzten Endes kann auch der Mensch davon betroffen sein.

Beispiel Blei: Der Erfolg umweltpolitischer Maßnahmen zeigt sich bei den Auswirkungen auf Organismen oft erst nach mehreren Jahrzehnten. So wurde bleifreies Normalbenzin 1988 und bleifreies Superbenzin 1997 eingeführt. In Moosen war Blei jedoch noch jahrelang deutlich nachweisbar. Erst seit 2001 hat sich der Bleigehalt in Moosen auf niedrigem Niveau stabilisiert.

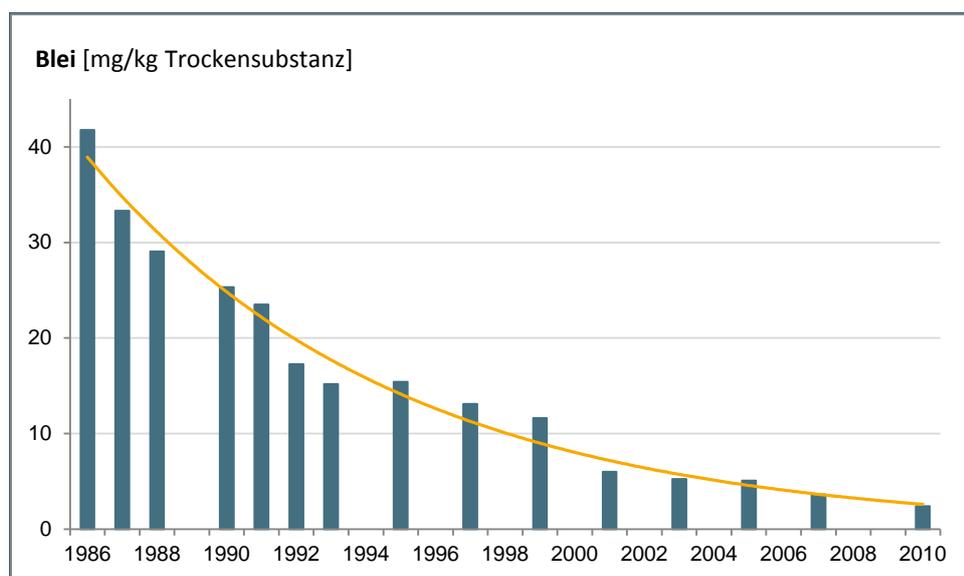


Abb. 8:
Auch die Einführung des bleifreien Benzins war ein Erfolg: Mit etwas Verzögerung ging der mittlere Bleigehalt in Moosen drastisch zurück und ist bis heute auf einem geringen Niveau geblieben.

Beispiel Seltene Metalle in Elektro- und Elektronikprodukten: 2005 und 2006 untersuchte das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) den Eintrag und die Anreicherung von Metallen im Umfeld von Schredderanlagen. Im Fokus stand insbesondere Antimon, das für Legierungen, Halbleiter oder als Flammhemmer in Kunststoffen eingesetzt wird. So wurde auf dem Gelände einer Schredderanlage in Gräsern bis zu 150 mal mehr Antimon gefunden als an unbelasteten Standorten. Abseits der Hauptwindrichtung oder weiter entfernt lagen die Messwerte wesentlich niedriger. Die Anlage wurde in den Folgejahren modernisiert und zum großen Teil eingehaust.

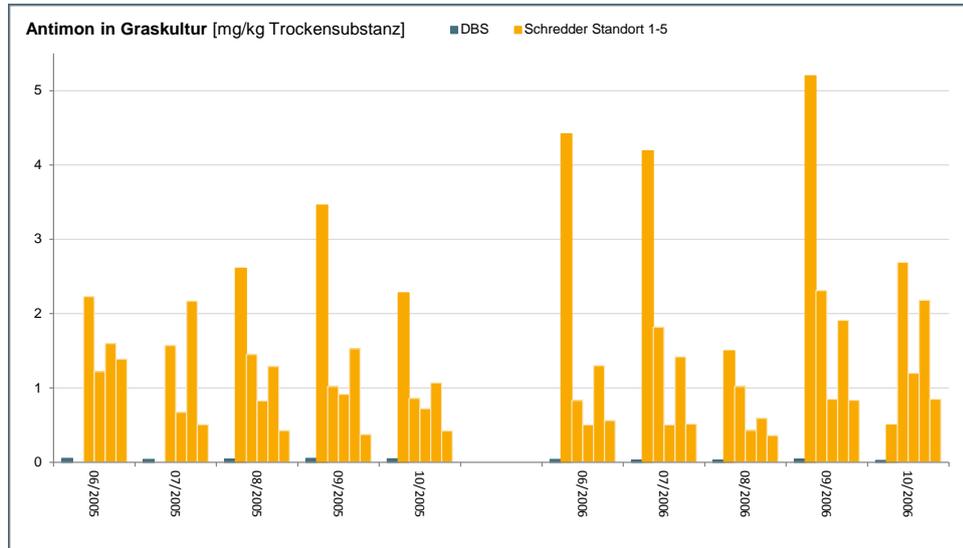


Abb. 9: Nahe bei Schredderanlagen kann deutlich mehr die Antimon gefunden werden als an unbelasteten Standorten: Bis zu 150-fach erhöht waren die Werte gegenüber den Dauerbeobachtungsstationen (DBS) des LfU. Untersucht wurden standardisierte Graskulturen.

Beispiel Bremsbeläge: In Städten ist der Staubeintrag generell höher als in ländlichen Gegenden. Auch die Inhaltsstoffe des Staubes unterscheiden sich sehr deutlich. Dabei spielt der Verkehr eine dominante Rolle: Antimon, Barium, Bismut, Kupfer, Molybdän und Zinn werden vor allem durch den Abrieb von Bremsbelägen freigesetzt. Den „Cocktail Bremsabrieb“ findet man daher vor allem an stark befahrenen Straßen. Allerdings ändert sich seine Zusammensetzung mit der technischen Entwicklung: Im Vergleich zum Anfang der 2000er-Jahre wird heute in München sehr viel weniger Antimon im Staub gefunden. Allerdings nimmt der Staubeintrag seit 2013 insgesamt zu, ebenso andere typische Elemente aus dem Bremsabrieb wie Barium oder Kupfer: Antimon wurde in modernen Bremsbelägen offenbar durch andere Komponenten ersetzt.

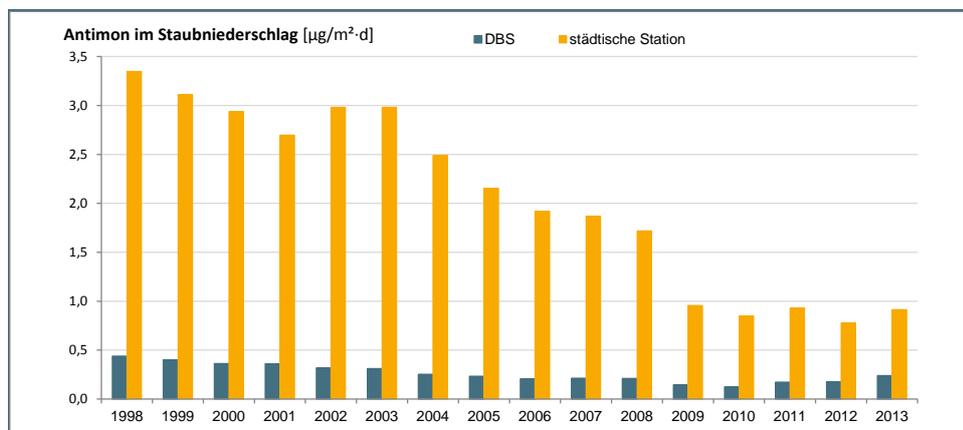


Abb. 10: An städtischen Messstationen bestimmt oft der Verkehr das Spektrum der gefundenen Metalle. Das beim Bremsen freigesetzte Antimon ist hier typisch. An der Station München wurden bis zu zehnmal höhere Gehalte gemessen als an ländlichen Dauerbeobachtungsstationen (DBS).

Weitere Informationen

LANDESAMT FÜR UMWELT: ► [Ergebnisse – langjährige Zeitreihen von Blei und Antimon](#)

5 Persistente Organische Verbindungen

Persistente organische Verbindungen (**persistent organic pollutants**, POP) kommen von Natur aus kaum in der Umwelt vor und sind schwer abbaubar (persistent). Sie wirken in geringsten Konzentrationen toxisch, einige gelten sogar als krebserregend.

Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F): PCDD/F sind eine Gruppe von Verbindungen, die als unvermeidliche Nebenprodukte bei der Verbrennung von chlorhaltigen Stoffen entstehen. Quellen sind also zum Beispiel Holzfeuerungsanlagen und industrielle thermische Produktionsprozesse der Metallindustrie. Der Einbau von Filtern oder das Nachverbrennen von Abgasen kann den Ausstoß von PCDD/F erheblich reduzieren. Da sie sehr stabil sind, werden sie in der Atmosphäre unverändert über weite Strecken transportiert und sind damit auch fernab von ihren Entstehungsorten nachweisbar. PCDD/F werden von Pflanzen aus der Luft aufgenommen. Im Boden sind sie wegen ihrer äußerst geringen Wasserlöslichkeit überwiegend an Partikel gebunden und daher über die Wurzeln kaum verfügbar. Sie gelangen über die Nahrungskette bis zum Menschen. Da sie gut fettlöslich sind, werden sie vor allem über Fisch, Fleisch, Eier und Milchprodukte aufgenommen. Sie reichern sich im Fettgewebe an und wurden unter anderem auch in Muttermilch nachgewiesen.

Um die Toxizität (Giftigkeit) der Stoffgemische einzuordnen, werden die Einzelstoffe rechnerisch gewichtet. Dazu erhält jede Verbindung einen Gewichtungsfaktor: TCDD, der giftigste Einzelstoff der PCDD/F erhält den Faktor 1. Im Vergleich dazu werden alle übrigen Verbindungen je nach ihrer Toxizität eingestuft (Toxizitätsäquivalente TEQ). So erhalten Stoffgemische anhand ihrer jeweiligen Einzelkonzentrationen einen TEQ-Wert, der ihr toxisches Potential bewertet. Dieses System wird auf alle PCDD/F und auf einige dioxinähnliche PCB (Polychlorierte Biphenyle) angewandt. Für die Zulassung von Pflanzen und tierischen Produkten als Futter- und Lebensmittel hat die WHO TEQ-Werte vorgeschrieben, die nicht überschritten werden dürfen.

Polychlorierte Biphenyle (PCB): PCB sind organische Verbindungen, die bewusst hergestellt werden. Man findet sie zum Beispiel als Weichmacher in Fugendichtungen, Kunststoffen und Lacken, als Hydraulikflüssigkeiten oder zu Kühlzwecken in Großtransformatoren oder Kondensatoren. Produktion und Verwendung dieser Stoffe sind seit 1983 in Deutschland und seit 2001 weltweit verboten, da sie hochgiftig und krebserregend sind. Sie verdunsten jedoch immer noch aus Gebäuden, Böden und Altlasten.

PCB gehören zu den Verbindungen, die überall in der Umwelt nachzuweisen sind. In Boden, Luft und Wasser sind die Konzentrationen allerdings nur sehr gering. Da PCB sehr langlebig sind, reichern sie sich jedoch in der Nahrungskette stark an. Daher sind sie besonders in Endgliedern der Nahrungskette zu finden – zum Beispiel im Fettgewebe höherer Tiere oder auch im Menschen. Die Belastung mit PCB ist in städtisch geprägten Bereichen zum Teil höher als in ländlichen Regionen. Auch in den Sommermonaten findet man höhere PCB-Belastungen, da PCB in der warmen Jahreszeit stärker verdunsten.

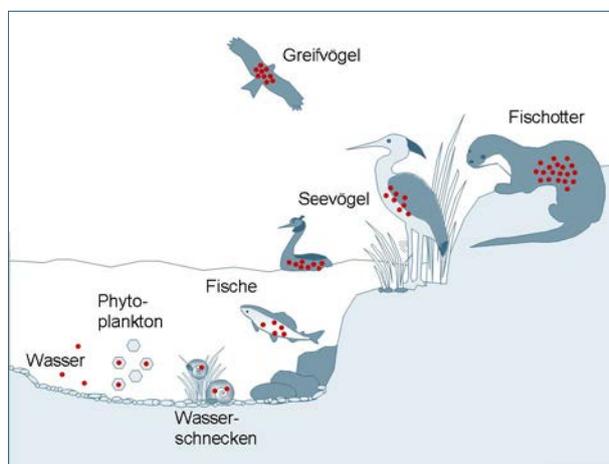


Abb. 11:
Polychlorierte Biphenyle
(PCB) und andere langlebige
Verbindungen reichern sich in
der Nahrungskette an.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK): PAK werden hauptsächlich durch Tätigkeiten des Menschen in die Umwelt gebracht. Sie entstehen als Nebenprodukte unvollständiger Verbrennung von organischen Materialien, insbesondere beim Kfz-Verkehr und dem Einsatz von Holz in Kleinfeuerungsanlagen zum Beispiel für die Hausheizung.

PAK-Moleküle binden sich an Ruß und Staubpartikel und werden mit diesen verfrachtet. Sie sind langlebig und reichern sich in der Nahrungskette an. Einige Verbindungen gelten als stark krebserregend. Humantoxikologisch besonders relevant sind Benzo(a)pyren und Dibenz(a,h)anthracen. PAK in der Luft und in Lebensmitteln werden über Höchstgehalte mit EU-Verordnungen geregelt.

In ländlichen Gebieten ist die PAK-Belastung relativ gering. Dennoch kann man spezielle Belastungsspitzen zum Beispiel durch Hausheizungen nachweisen: Die Anreicherung im Herbst, wenn die Heizperiode beginnt, ist doppelt so hoch wie im Frühjahr oder im Sommer. Dies lässt sich – auf höherem Niveau – auch in städtischen Ballungsräumen beobachten.

Weitere Informationen

LANDESAMT FÜR UMWELT: ► [Anreicherung von organischen Schadstoffen](#)

6 Messung von Stoffeinträgen und –wirkungen

Schadstoffe können einerseits technisch im **Niederschlagswasser** oder im **Staub** gemessen werden. Andererseits sind einige Stoffe im Wasser, in der Luft und im Boden technisch nicht oder nur schwer zu analysieren. Viel leichter lassen sie sich dagegen in Tieren und Pflanzen nachweisen, weil sie in den Organismen angereichert werden oder weil Reaktionen oder Schädigungen zu beobachten sind. Daher ergänzt man die technischen Messungen häufig mit den sogenannten **Bioindikatoren**: Organismen, die stellvertretend die Wirkung von Umweltfaktoren anzeigen.

Beim Biomonitoring gibt es zwei Verfahren:

Beim **aktiven Biomonitoring** werden die Pflanzen im Gewächshaus angebaut und anschließend im Freiland aufgestellt. So werden gezielte Messungen in der Nähe von Anlagen leicht möglich. Häufig werden dabei Weidelgras oder Grünkohl verwendet. Sie stehen für landwirtschaftliche Kulturen und lassen Schlussfolgerungen auf Futter- und Lebensmittel zu. Beide Arten nehmen Schwermetalle und organische Schadstoffe sehr gut auf, ohne selbst Schaden zu nehmen. Die standardisierte Handhabung ermöglicht den direkten Vergleich verschiedener Messungen.

Beim **passiven Biomonitoring** werden zum Beispiel Fichtennadeln und Moose in der freien Natur entnommen und im Labor analysiert. Um einen Vergleich zu ermöglichen, werden Arten beprobt, die überall in Bayern wachsen. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die natürliche Vegetation vor Ort.



Abb. 12: Weidelgras wirkt wie eine Bürste, an der Schadstoffe hängen bleiben.



Abb. 13: Grünkohl nimmt noch im November Schadstoffe auf, zeigt also die Heizperiode.



Abb. 14: Für die Beprobung von Fichtennadeln steigt ein Baumkletterer bis in die Krone.

Tab. 1: Beispiele für Schadstoffe und ihre Wirkung auf Bioindikatoren

Schadstoff	Bioindikator	Welche Wirkung wird angezeigt?
POP (PCB, PCDD/F, PAK)	Weidelgras, Grünkohl, Standortfichten	Anreicherung
Schwermetalle	Weidelgras, Moos	Anreicherung
Gewürzmetalle (Ce, La, Mo, Nb, Sb)	Weidelgras, Moos	Anreicherung
SO ₂	Standortfichten	Anreicherung
Ozon	Tabak	Reaktion: Blattschäden
Fluor	Gladiolen	Reaktion: Blattschäden
SO ₂ , NO ₂ , NH ₃ , Staub, Schwermetalle	Flechten	Reaktion: Artenverschiebung, Anreicherung von Schwermetallen

Biomonitoring wird häufig auch verwendet, um gezielt den **Einfluss einer einzelnen Quelle** zu untersuchen. Dazu vergleicht man standardisierte Kulturen an mehreren Standorten:

- **Hintergrund:** Zur Ermittlung der Belastung ohne besondere Schadstoffquellen in der Nähe dienen Untersuchungen von Bioindikatoren an emittentfernen Standorten in naturnaher Umgebung. Auch in der Nähe von landwirtschaftlicher Nutzung werden regelmäßig Proben genommen. Dabei werden langfristige Trends erkennbar, denn die bayerischen Dauerbeobachtungsstationen werden seit 1993 kontinuierlich untersucht.
- **Quelle:** Der Einfluss einer einzelnen Anlage lässt sich erfassen, indem gezielt Pflanzen in der Nähe untersucht werden. Als Vergleich dienen die Hintergrundwerte.

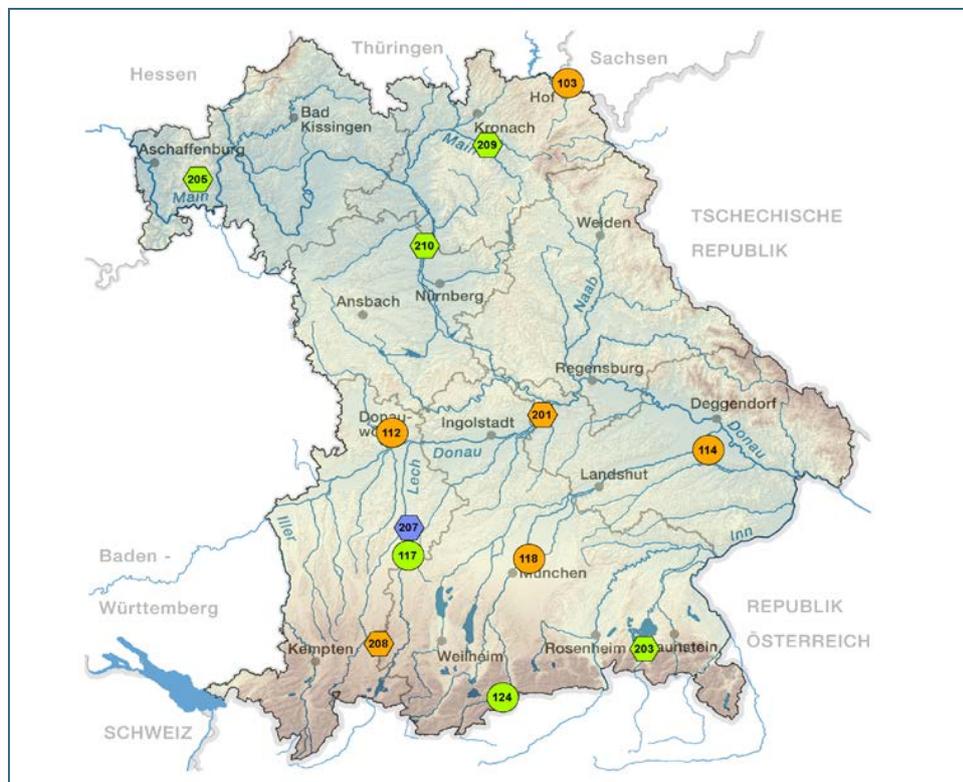


Abb. 15: Das Immissionsökologische Messnetz des LfU untersucht seit über 30 Jahren bayernweit Stoffeinträge und Wirkungen auf Bioindikatoren. An 13 Standorten werden Stoffeinträge technisch gemessen (Kreise), an sieben werden zusätzlich die Wirkungen auf Bioindikatoren erfasst (Waben).

Farblich gekennzeichnet sind naturnahe Standorte (grün), landwirtschaftsnahe Standorte (orange), städtische Standorte (blau).

7 Bewertung

Aufgrund der Vielzahl an Schadstoffen und der möglichen Wirkungen sind auch die Bewertungsgrundlagen je nach Fragestellung sehr vielfältig. Einige Beispiele sind:

- Um die Belastung empfindlicher Ökosysteme durch Stickstoff- und Säureeinträge zu bewerten, bedient man sich des Konzepts der kritischen Belastungsraten und der kritischen Konzentrationen (Critical Load und Critical Level).
- Daneben gibt es Konzepte zum Schutz spezieller Schutzgüter, zum Beispiel Futter- oder Lebensmittel. Damit soll auch der Eintrag in die menschliche Nahrungskette berücksichtigt werden.
- Der Vergleich mit Hintergrundwerten unbelasteter Räume ermöglicht ebenfalls eine Einordnung der Messwerte.

Die umfassendsten Grundlagen für die Bewertung von Schadstoffimmissionen liefern die Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (insbesondere VDI 3957) sowie die Technische Anleitung Luft und auch Verordnungen wie die Futtermittelverordnung oder die Trinkwasserverordnung. Neuere Erkenntnisse aus der Ökosystemforschung führen zu einer ständigen Weiterentwicklung der Bewertungsgrundlagen.

8 Ausblick

Kaum ein anderes Arbeitsfeld zeigt so deutlich die Entwicklung des Umweltschutzes wie die Beobachtung von Stoffeinträgen und Wirkungen in der Umwelt. Zum einen zeigt sich, wie drastisch sich die Umweltschutztechnik in den letzten Jahrzehnten verbessert hat: Dadurch sank auch die Freisetzung zum Beispiel von Arsen, Quecksilber oder Cadmium aus Kohlekraftwerken oder Müllverbrennungsanlagen.

Zum anderen haben sich die Quellen der Schadstoffe geändert: Waren früher Müllverbrennungsanlagen die Hauptquelle für Dioxin, so leistet heute der Hausbrand einen nachweisbaren Anteil. PCB gelangen trotz Anwendungsverbots immer noch in die Umwelt, zum Beispiel dampfen sie aus alten Baumaterialien aus oder entweichen bei der Verwertung von Altmaterialien in Schredderanlagen.

Nicht zuletzt kommen immer wieder neue Technologien auf den Markt, zum Beispiel in der Telekommunikation, der Computertechnik oder bei Weiterentwicklungen der Automobiltechnik. Dabei kommen immer auch neue Elemente zum Einsatz. In jüngster Zeit sind vor allem die Gewürzmetalle wie Indium, Molybdän, Antimon oder Elemente der Platingruppe in den Fokus gerückt.

Diesen Wandel zu begleiten, ist Aufgabe eines vorsorgenden Monitorings, zu dem nicht nur technische Messungen, sondern auch die Erfassung der Wirkung von Stoffeinträgen gehört.

9 Literatur und Links

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT:

(2009a): [30 Jahre Immissionsökologie am Bayerischen Landesamt für Umwelt](#). PDF, 67 S.

(2009b): [Schredderanlagen und Abfalldeponien – relevante Sekundärquellen für dioxinähnliche PCB und verwandte persistente Schadstoffe](#). PDF, 117 S.

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ:

(2001) Immissionsökologischer Jahresbericht 1998/99

(2003) [Immissionsökologischer Bericht 2000-2001](#). PDF, 278 S.

GUDERIAN R.: Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie. Berlin

(2000): Bd. 1A: Atmosphäre, Anthropogene und biogene Emissionen

(2000): Bd. 1B: Aerosol/Multiphasenchemie

(2001): Bd. 2A: Terrestrische Ökosysteme, Immissionsökologische Grundlagen

KÖHLER J., PEICHL L. (2014): Immissionsökologische Untersuchungen im Umfeld einer Elektroschrott- und Kabelrecyclinganlage. Immissionsschutz 19. Jahrgang, Heft Nr. 2

MÖLLER D. (2003): Luft – Chemie – Physik – Biologie – Reinhaltung – Recht. Berlin

NAGEL H.-D., GREGOR H.-D. (1999): Ökologische Belastungsgrenzen. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltungspolitik. Springer-Verlag Berlin

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT BONN (2014*): [Ozonbelastung gefährdet Reisanbau in Asien](#). Pressemitteilung vom 5.11.2014

* Zitate von online-Angeboten vom 31.08.2015

9.1 Gesetzliche Regelungen und technische Richtlinien

Richtlinie 2002/32/EG vom 07. Mai 2002 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung, ABl. L 140

Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln, ABl. L 364/5

Verordnung (EU) Nr. 277/2012 vom 28. März 2012 zur Änderung der Anhänge I und II der Richtlinie 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Höchstgehalte und Aktionsgrenzwerte für Dioxine und polychlorierte Biphenyle ABl. L 91/1

Futtermittelverordnung (FutMV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. Juli 2013 BGBl. I S. 2242 zuletzt geändert durch Art. 2 V v. 19.5.2015 I 756

Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung-TVO) vom 28.05.2001. BGBl. I 2001 S. 959

Verordnung zur Verminderung von Sommersmog, Versauerung und Nährstoffeinträgen (33. BImSchV) vom 13.07.2004, BGBl. I 2004 S. 1612

Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 24.07.2002 (TA Luft), GMBI. I S.511

VDI (1989): VDI-Richtlinie 2310/6, Maximale Immissionskonzentration für Ozon

VDI (2002): VDI-Richtlinie 2310/6, Maximale Immissions-Werte zum Schutz der Vegetation – Maximale Immissionskonzentrationen für Ozon

VDI (2003): VDI-Richtlinie 3957/2, Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation), Verfahren der standardisierten Graskultur

VDI (2008): VDI-Richtlinie 3957/3, Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation), Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl

VDI (2004): VDI-Richtlinie 3957/10, Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation), Emittentenbezogener Einsatz pflanzlicher Bioindikatoren

10 Weiterführende Informationen

UmweltWissen-Publikationen:

- ▶ [Ammoniak und Ammonium](#)
- ▶ [Bodennahes Ozon und Sommersmog](#)
- ▶ [Umweltmedium Luft](#)

Umweltschutz im Alltag: ▶ [Ansprechpartner](#) und ▶ [weitere Publikationen](#)

Impressum:

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg

Telefon: 0821 9071-0

Telefax: 0821 9071-5556

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: <http://www.lfu.bayern.de>

Bearbeitung:

Ref. 12 / Dr. Katharina Stroh

Ref. 16 / Dr. Ludwig Peichl, Margit Krapp, Dr. Jutta Köhler

Bildnachweis:

© Andrey Armyagov – Fotolia.com: Abb. 3; © ferkelraggae – Fotolia.com: Titelbild; LfU: Abb. 1, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15; © Christian Pedant – Fotolia.com: Abb. 6; © pixomatose – Fotolia.com: Abb. 2; Andreas Zehm – LfU: Abb. 4; Andreas Zehm – Piclease Naturbildagentur: Abb. 5

Postanschrift:

Bayerisches Landesamt für Umwelt
86177 Augsburg

Stand:

Neufassung: September 2004

Überarbeitung: August 2015

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – wird um Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars gebeten.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt.

Diese Broschüre wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden.

Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.