

Themenbereich A: Grundlagen  
Themenblock 1: Ausgewählte Umweltwirkungsbereiche

# A1.2

## **VERSAUERUNG VON ÖKOSYSTEMEN**

Ökopol – Institut für Ökologie und Politik GmbH

Autorinnen und Autoren:

Dirk Jepsen (Ökopol), Evelyn Schönheit (FÖP), Susanne Volz (Ökopol),  
Dr. Olaf Wirth (Ökopol) und Till Zimmermann (Ökopol)

# VERSAUERUNG VON ÖKOSYSTEMEN

## Inhalt

- 1 Einleitung
  - 2 Hintergrund und Wirkmechanismen
    - 2.1 pH-Wert und Puffersysteme
    - 2.2 Versauerung von Böden
    - 2.3 Waldschäden
    - 2.4 Versauerung von Gewässern
  - 3 Emissionsquellen und Depositionswege
    - 3.1 Emissionsquellen
    - 3.2 Verbreitung und Deposition
  - 4 Fazit und Ausblick
- Literatur

## 1 EINLEITUNG

Versauerung bedeutet, dass der pH-Wert eines Systems (z. B. Boden oder Gewässer) abnimmt. Dies wird durch sogenannte versauernde Substanzen verursacht.

Ca. seit den 1970er Jahren fiel eine Verschiebung des pH-Wertes der Niederschläge auf. D. h. die Niederschläge wurden immer saurer („saurer Regen“). Damit verbunden sind v.a. drei wesentliche Umweltprobleme:

- Versauerung von Gewässern,
- neuartige Waldschäden („Waldsterben“) und
- Versauerung von Böden.

Süßwasserseen können sich unter Einwirkung von sauren Niederschlägen zu Behältnissen mit verdünnten Säuren verwandeln. Dies wurde insbesondere in den skandinavischen Seen in den 1990er Jahren sehr offensichtlich. Der veränderte Säuregehalt der Gewässer führte dort zu massiver Beeinträchtigung der Ökosysteme (z. B. Fischsterben). Als Ursache für den sauren Regen in Skandinavien konnten aus England transportierte Luftschadstoffe identifiziert werden.

Der zweite Umweltbereich, der mit der Versauerung in Verbindung steht, sind die „neuartigen Waldschäden“. Dass hohe Konzentrationen von Schwefelgasen zu Vegetationsschäden führen, ist schon lange bekannt (direkte akut-phytotoxische Effekte). In den 1970er Jahren zeigten sich aber zusätzlich Langzeitfolgen: Die Wälder schienen massiv von saurem Regen geschädigt zu werden („Waldsterben“). Intensive politische und gesellschaftliche Diskussionen folgten.

Versauerung hat für den Boden eine herausragende Bedeutung. Der Boden ist ein komplexes Gefüge aus verschiedenen mineralischen und organischen Materialien und Lebewesen. Er stellt nicht nur die Lebensgrundlage der natürlichen Vegetation dar, sondern ist das

Fundament unserer Landwirtschaft und Ernährung. Er steht zudem in engem Austausch mit den anderen Umweltmedien, insbesondere mit den Gewässern. Die beobachtete zunehmende Versauerung des Bodens hat somit nicht nur Auswirkungen auf den Lebensraum Boden, sondern führt über die Freisetzung von Schadstoffen zu Verunreinigungen des Grundwassers und anderer Wasserkörper.

Auch wenn die Medien der Versauerung weniger Aufmerksamkeit schenken als in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts, ist „saurer Regen“ und andere Versauerungen sicherlich kein „Schnee von gestern“. Zwar haben sich einige Faktoren geändert, die Problematik ist aber weiterhin aktuell und die Einträge an versauernden Stoffen liegen weiterhin deutlich zu hoch. So ist noch immer fast die Hälfte der Ökosysteme in Deutschland nicht vor Versauerungsschäden geschützt.<sup>1</sup>

Die folgenden Kapitel zeigen Zusammenhänge auf und geben die aktuelle Situation wieder.

<sup>1</sup> Critical Loads für Versauerung. Umweltbundesamt. [www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do](http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do)

# A1.2

## 2 HINTERGRUND UND WIRKMECHANISMEN

### 2.1 PH-WERT UND PUFFERSYSTEME

Von Luftschadstoffen unbeeinflusster Niederschlag hat einen pH-Wert von ca. 5,7. Die Abweichung vom Neutralpunkt (pH 7) hängt mit dem Gleichgewicht des in der Luft enthaltenen  $\text{CO}_2$  mit den im Niederschlag gelösten Carbonaten zusammen.

---

Der pH-Wert gibt auf einer Skala von 0 - 14 den sauren oder basischen Charakter einer wässrigen Lösung an, wobei 7 den Punkt der neutralen wässrigen Lösung, also des reinen Wassers angibt. Als Säuren (pH-Wert  $0 < \text{pH} < 7$ ) werden solche chemischen Verbindungen bezeichnet, die in der Lage sind, Protonen an einen Reaktionspartner (in wässrigen Lösungen an das Wasser) zu übertragen (sog. Protonendonatoren). Basen (pH-Wert  $\text{pH} > 7 - 14$ ) hingegen sind chemische Verbindungen, die Protonen aufnehmen können.

---

Natürliche Systeme können je nach ihrer (chemischen) Zusammensetzung den Zusatz von Säuren und Basen mehr oder weniger gut ausgleichen. Die im Boden vorhandenen Stoffe, die Zugabe von Säuren und Basen ausgleichen, nennen sich Puffer. Allerdings verbrauchen sich diese bei Zusatz von Säuren (oder Basen), weshalb es bei über die Pufferkapazität hinausgehender weiterer Zugabe zu einer deutlichen Änderung des pH-Wertes kommt.

### 2.2 VERSAUERUNG VON BÖDEN

Versauerung eines Bodens tritt ein, wenn in den Boden eingetragene Protonen vom Boden nicht mehr neutralisiert werden können, und der pH-Wert des Bodens dadurch absinkt.

Böden haben die Fähigkeit, Säureeinträge in gewissem Umfang abzufangen. Diese Fähigkeit ist abhängig von der Art und Menge an Mineralien und Humus im Boden. Der Zusatz von Säuren wird durch mehrere Puffersysteme aufgefangen:

- Bei der Einwirkung von Säuren auf den Boden reagiert zunächst Carbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), z.B. durch Auflösung von fein verteiltem Kalk (Carbonat-Pufferbereich).
- Im Austausch-Pufferbereich puffern die im Boden enthaltenen Tonmineralien weitere Protonenzugabe ab. Dabei lösen die Protonen Nährstoffkationen wie  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  oder  $\text{Mg}^{2+}$  von den Tonmineralien ab. Letztere gelangen so in das Bodenwasser, was zu Auswaschungen

führt.

- Bei weiterer Zugabe von Protonen reagieren bestimmte Aluminium-Verbindungen (Hydroxokomplexe des Aluminiums). Dabei wird Aluminium als Ionen herausgelöst (Aluminium-Pufferbereich).
- Bei sehr niedrigen – in der Natur nur selten vorkommenden – pH-Werten können Eisenverbindungen als Puffer fungieren (Eisen-Pufferbereich).

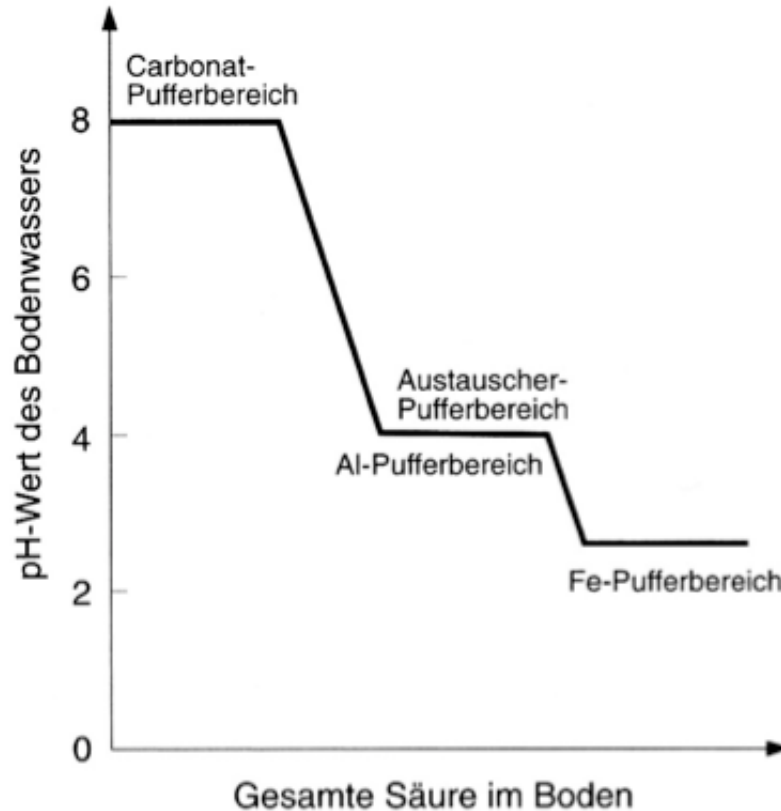


Abbildung 1: pH-Wert-Veränderung in der Bodenlösung bei fortgesetztem Eintrag von Säure (schematische Darstellung)  
Quelle: Bliefert (2002) Umweltchemie.

Die Versauerung von Böden ist ein natürlicher Prozess. Hier spielt u.a. die Nährstoffaufnahme der Pflanzenwurzel eine wesentliche Rolle (Kationen werden durch Protonen ersetzt). Landwirtschaftlich genutzte Böden sind daher in besonderem Maße anfällig für Versauerung, da durch das intensive Wachstum und die Ernte der Kulturpflanzen dem Boden puffernd wirkende Kationen besonders schnell entzogen werden.

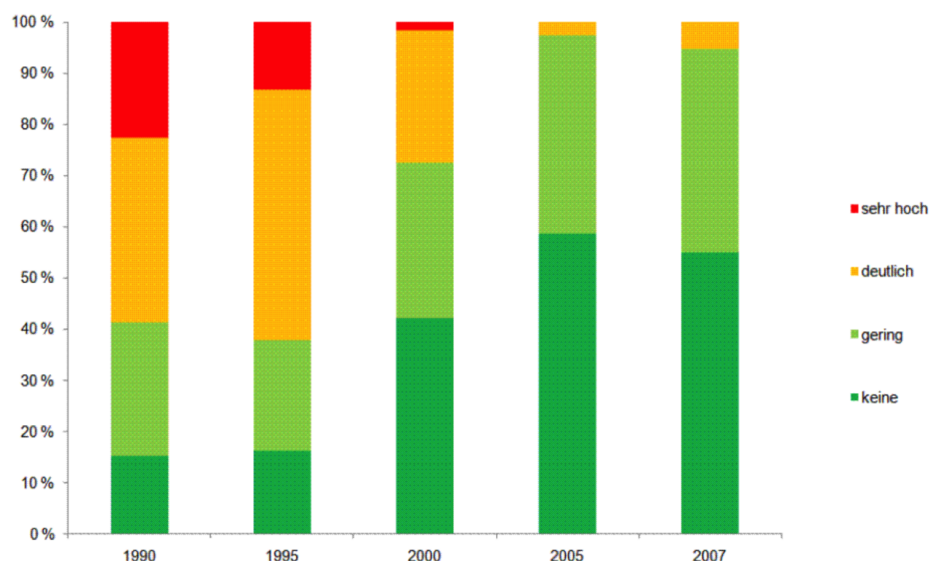
Durch Verwitterung von Gestein können Kationen zwar nachgeliefert werden, dies ist jedoch ein zeitintensiver Prozess, der nur selten mit dem Voranschreiten der Versauerung von Böden mithält.

Die andauernde Belastung von Böden durch zusätzliche anthropogene Einträge (s.u.) hat in vielen Regionen die Pufferkapazität der Böden stark vermindert. In Abbildung 2 ist das Fortschreiten der Bodenversauerung in Deutschland abzulesen. Diese hat verschiedene nachteilige Effekte:

- *Auswaschung von Nährstoffen:*  
Kationen, die im Austauscher-Pufferbereich von Protonen herausgelöst wurden, werden aus dem Boden ausgewaschen. Dadurch werden sie dem Boden entzogen und können auch den Pflanzen nicht mehr als Nährstoffe dienen. Die veränderte Ionen-Zusammensetzung des Bodens beeinflusst somit die Wachstumsbedingungen für die Vegetation.

- **Mobilisierung von Schwermetallen:**  
Schwermetalle können bei annähernd neutralem pH-Wert immobilisiert sein, d.h. die Schwermetalle befinden sich zwar im Boden oder im Wasser, entfalten dort jedoch kaum schädigende Wirkung, da sie nicht von Organismen aufgenommen werden. Bei einer zunehmenden Versauerung (der konkrete pH-Wert ist abhängig vom jeweiligen Schwermetall) können sie jedoch wieder in Lösung gehen. Dadurch sind sie verfügbar und können ihre toxische Wirkung entfalten. Eine Remobilisierung von Schwermetallen ist bedenklich, da sie nicht abgebaut werden können. Schwermetalle können (abhängig von der Konzentration) alle Arten von Pflanzen schädigen. Besonders bedenklich ist in diesem Zusammenhang jedoch die Versauerung von ackerbaulich genutzten Landflächen. Durch Versauerung remobilisierte (und dadurch bioverfügbare) Schwermetalle können durch die Pflanze aufgenommen und angereichert werden. Auf diesem Weg gelangen sie besonders einfach in den Nahrungskreislauf. Auf dieselbe Weise können Schwermetalle auch in naturnahen Ökosystemen in die Nahrungskette gelangen und so Pflanzen und Tiere schädigen. Die Landwirtschaft ist sowohl Verursacherin als auch Leidtragende der Versauerung.
- **Freisetzung von Aluminium-Ionen:**  
Bei niedrigen pH-Werten werden die im Boden enthaltenen Aluminium-Verbindungen in Lösung gebracht. Dadurch liegen sie in bioverfügbarer Form vor und entfalten ihre giftige Wirkung (z.B. auf Regenwürmer).
- **Belastung von Gewässern:**  
Die ausgewaschenen Stoffe beeinflussen nicht nur den Boden selbst, sondern gelangen auch in die Gewässer – entweder durch direkte Auswaschungen in Oberflächengewässer oder über das Grundwasser. Letztlich wirkt sich die Versauerung so auch auf die Wasserqualität aus.
- **Verlust an Biodiversität:**  
Die andauernde Versauerung führte zu einer weiträumigen Nivellierung der Bodenverhältnisse. Einige im sauren Milieu konkurrenzstarke Pflanzen können so auf neutrale Bodenverhältnisse angewiesenen Arten verdrängen. So trägt die Versauerung zu einer Verminderung der pflanzlichen und indirekt auch tierischen Biodiversität bei.
- **Schädigung der Wurzelschicht:**  
Saure Einträge im Boden schädigen die Pflanzenwurzeln und die Mykorrhiza (symbiotisches Pilzgeflecht um die feinen Wurzeln von Bäumen), so dass sie Wasser und notwendige (noch vorhandene) Nährstoffe nicht in optimaler Weise aufnehmen können.

**Überschreitung der Critical Loads für Versauerung durch Säureinträge auf den kartierten empfindlichen Ökosystemflächen**



Quelle: ÖKO-DATA, Modelling of Air Pollutants and Ecosystem Impact (MAPEI), UBA-FKZ 3707 64 200.

Abbildung 2: Belastung von Landökosystemen durch Versauerung in Deutschland  
Quelle: [www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do](http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do).

# A1.2

## 2 HINTERGRUND UND WIRKMECHANISMEN (FORTSETZUNG)

### 2.3 WALDSCHÄDEN

Seit den 1990er Jahren zeigten sich deutliche Schädigungen des Waldes. Seither erfasst ein Monitoring in regelmäßigen Abständen den Zustand der Bäume (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4). Die letzte Erhebung zeigte einen hohen Grad der Schädigung: Nur 39% der Bäume zeigte keine Kronenverlichtung, bei der Eiche sind es sogar nur 17%<sup>2</sup>.

Für die Waldschäden machten Wissenschaftler in den 1990er Jahren den sauren Regen verantwortlich. Heute weiß man, dass der Waldzustand noch von verschiedenen weiteren Faktoren beeinflusst wird. Die Einwirkung von Luftschadstoffen und die damit einhergehende Versauerung des Bodenspielen weiterhin eine wesentliche Rolle.

Konsequenterweise ist der Waldboden daher auch Gegenstand von wissenschaftlichen Untersuchungen. Eine umfassende Bodenzustandserhebung im Wald deutet u.a. auf Bodenversauerung und Basenverarmung in den Böden hin. Damit einher gehen Risiken für Grund- und Quellwasser, Engpässe in der Baumernährung sowie Nährstoffungleichgewichte infolge erhöhter Stickstoffeinträge.<sup>3</sup>

Die beobachtete Bodenversauerung führt zudem über folgende Kausalkette zu verringerter Standfestigkeit der Bäume: Durch den niedrigen pH-Wert verringert sich die Zahl der Regenwürmer. Dadurch verringert sich die Durchmischung der Bodenschichten und die Nährstoffe verbleiben nahe der Oberfläche. In der Folge wurzeln die Bäume flacher, was zu geringerer Standfestigkeit führt.

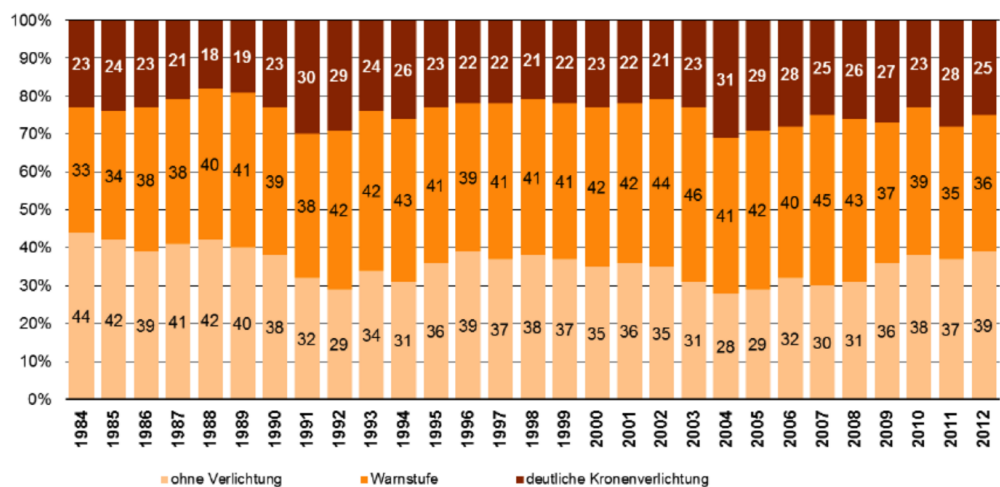


Abbildung 3: Entwicklung der Schadstufenanteile (alle Baumarten)

Quelle: Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2012, S. 5.

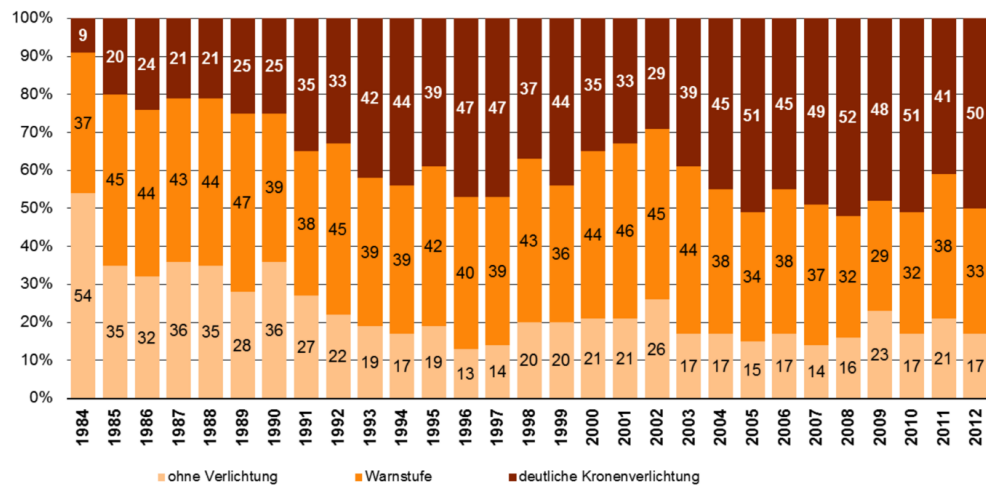


Abbildung 4: Entwicklung der Schadstufenanteile (Eichen)  
Quelle: Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2012, S. 17.

## 2.4 VERSAUERUNG VON GEWÄSSERN

Auch Gewässer haben eine gewisse Pufferkapazität, die den Eintrag von Säurebildnern so lange puffert, bis die Pufferwirkung aufgebraucht ist. Meerwasser ist mit einem pH-Wert von 8,2 leicht basisch, auch der Mittelwert von Flusswasser tendiert mit 6,5 – 8,5 eher zu einer basischen Zusammensetzung. Je nach geologischen Gegebenheiten kann sich der pH-Wert von Gewässern jedoch stark unterscheiden. Während der Zürichsee als ein Gewässer in kalkreichem Gebiet einen pH-Wert von 7,6 – 8,4 und eine im Vergleich recht hohe Pufferwirkung aufweist, enthalten Gewässer in Regionen mit kristallinem Gestein wie Gneise oder Granite nur geringe Konzentrationen von Kalzium, Magnesium oder Karbonat und verfügen über eine geringere Pufferwirkung. Die durch Versauerung vor allem geschädigten Seen in Skandinavien weisen durch ihr Vorkommen in Gegenden mit kristallinem Gestein eher geringe Pufferwirkung auf.

Ähnlich der Vorgänge im Boden werden auch im Gewässer bei niedrigerem pH-Wert bestimmte Metall-Ionen (v. a. Aluminium) remobilisiert. Schädigungen entstehen somit durch den direkten Einfluss der pH-Verschiebung und durch zusätzliche toxische Effekte gelöster Metalle. In der Folge verschiebt sich die Zusammensetzung der Planktongemeinschaft (Indikator für Versauerung). Auffallend direkte Schäden zeigen die Fischpopulationen. Allgemein wirkt sich die Versauerung negativ auf die Reproduktion der Fische aus. Durch den tiefen pH-Wert werden die Jungstadien der Fische geschädigt. Dadurch brechen die Populationen ein. Aber auch die Mortalität der erwachsenen Tiere ist bei Versauerung – insbesondere durch die Fischtoxizität der Aluminium-Ionen – erhöht.



## A1.2

# 3 EMISSIONSQUELLEN UND DEPOSITIONSWEGE

## 3.1 EMISSIONSQUELLEN

Einige Emissionen aus Industrie, Verkehr und Landwirtschaft haben säurebildende Wirkung und können daher zu einer Absenkung des pH-Werts in Böden und Gewässern beitragen.

Für die Versauerung werden vor allem Luftschadstoffe als Verursacher genannt. Zu den wesentlichen Schadstoffen gehören Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) und Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ), die bei industriellen Verbrennungsprozessen entstehen, sowie Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), welches hauptsächlich aus landwirtschaftlichen Prozessen stammt.

In internationalen Vereinbarungen (Genfer Luftreinhaltekonvention und EU-Richtlinien) hat sich Deutschland zu einer Verminderung der Emissionen von Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), Stickstoffoxiden ( $\text{NO}_x$ ), Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) verpflichtet, wobei die zuletzt genannte Stoffgruppe keinen Zusammenhang zur Versauerung hat.

Zwar konnten Erfolge bei der Reduktion der Emissionen an Schwefeldioxid (z.B. durch Kraftwerksentschwefelung, Begrenzung des Schwefelgehalts in flüssigen Brennstoffen) erzielt werden. Der Ausstoß von versauernden Luftschadstoffen ist aber, gemessen an der dauerhaften Belastbarkeit der Ökosysteme, immer noch zu hoch. Dies gilt besonders für Stickstoffoxide und Ammoniak (vgl. Abbildung 5).

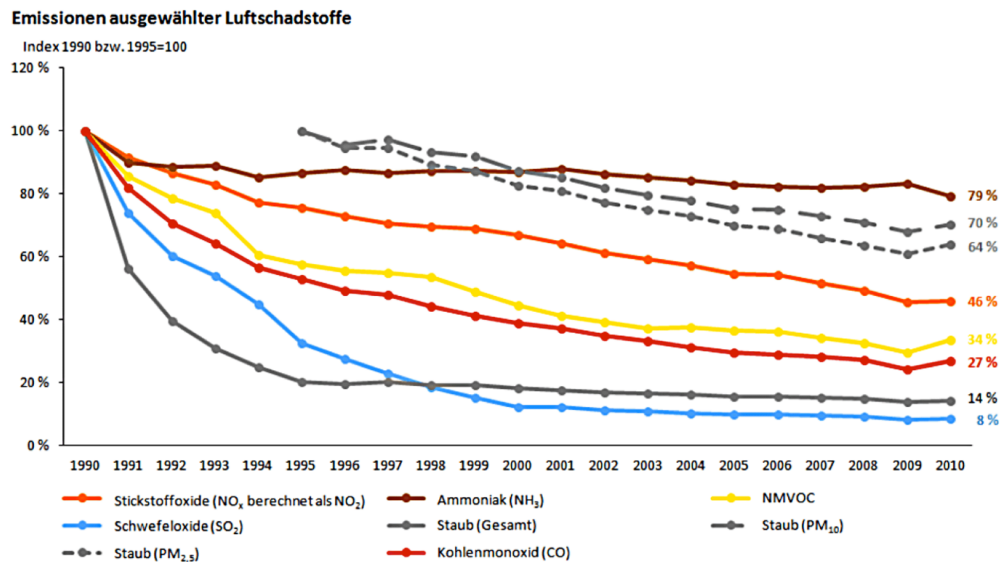


Abbildung 5: Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe

Quelle: Umweltbundesamt. Nationale Trendtabelle für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990. [www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm](http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm).

## 3.2 VERBREITUNG UND DEPOSITION

Die Emissionen schlagen sich v. a. über zwei Wege nieder: die trockene und die nasse Deposition. Bei der trockenen Deposition lagern sich Luftschadstoffe gasförmig oder als Staub z.B. auf der Vegetation ab.

Bei der nassen Deposition erfolgt der Eintrag von Schadstoffen mit dem Regenwasser. Anschaulich beschrieben wird dies mit dem Begriff „saurer Regen“. Gelöste Schadstoffe führten teilweise zu einer messbaren Absenkung des pH-Wertes des Regens deutlich über das natürliche Maß hinaus auf Werte von bis zu 3 - 4.

Emissionen in die Luft (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und NH<sub>3</sub>) können in der Atmosphäre abhängig von Strömungsprozessen und Wetter weite oder auch nur sehr kurze Wege zurücklegen. Ammoniak hat nur eine geringe Verweilzeit in der Atmosphäre (einige Stunden bis wenige Tage), bevor es zu Umwandlungsprozessen kommt. Ammoniak selbst wird daher v.a. im nahen Umfeld der Quelle eingetragen. Für die Umwandlungsprodukte von Schwefeldioxid und Stickstoffoxiden (z.B. von Schwefeldioxid über Schwefeltrioxid zu Schwefelsäure); die mit dem in der Atmosphäre enthaltenen Wasser (H<sub>2</sub>O) reagieren, ist eine weiträumigere Verbreitung typisch.

Einträge in Gewässer und in den hydrologischen Kreislauf finden sowohl durch den direkten Eintrag von Luftschadstoffen als auch durch die Auswaschung versauernder Verbindungen aus Böden statt.

Durch die früher verfolgte Politik der „hohen Schornsteine“ wurde versucht, die Folgen der Industrieemissionen durch eine Verdünnung der Schadstoffe abzumildern. Im Ergebnis jedoch trug dies lediglich dazu bei, lokale Schäden zwar zu beschränken, die Luftschadstoffe jedoch in einem weiteren Umkreis zu verteilen und die Schäden in ein anderes Gebiet zu verlagern.

## A1.2

# 4 FAZIT UND AUSBLICK

Seit den 1970er Jahren führten zahlreiche politische und technische Anstrengungen zur Reduzierung der Emissionen von Ammoniak, Stickstoffoxiden und Schwefeldioxid. Dennoch sind die Einträge in Ökosysteme, bezogen auf deren dauerhafte Belastbarkeit, nach wie vor zu hoch. Obwohl die Schwefeleinträge in den letzten Jahren stark abgenommen haben, ist noch immer fast die Hälfte der Ökosysteme nicht nachhaltig vor Versauerungsschäden geschützt. Bei der Versauerung spielt Stickstoff mittlerweile eine bedeutende Rolle. Konsequenz sollten daher neben der fortzusetzenden Verringerung der Emissionen in Industrie und Verkehr u. a. Emissionsminderungsmaßnahmen im landwirtschaftlichen Bereich (Tierhaltung) sein.

# LITERATUR

Bliefert, Claus (2002): Umweltchemie. 3., aktualisierte Aufl. Weinheim: Wiley.

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2012, online verfügbar unter:

[http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Wald-Jagd/ErgebnisseWaldzustandserhebung2012.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Wald-Jagd/ErgebnisseWaldzustandserhebung2012.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft 11.02.2015.

## Impressum

Erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes  
im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens FKZ 371295303

durch

Ökopol – Institut für Ökologie und Politik GmbH, Nernstweg 32–34, 22765 Hamburg  
Tel.: +49 (0)40/39 100 2-0; Fax.: +49 (0)40/39 100 2-33; Internet: [www.oekopol.de](http://www.oekopol.de)