

Aktuelle Aspekte der Langzeitversauerung von oberirdischen Gewässern und Grundwasser in Deutschland

Current aspects of long-term acidification of surface waters and groundwater in Germany

Jochen Bittersohl, Wolfgang Walther und Henning Meesenburg

Zusammenfassung

Die Versauerung von Böden und Gewässern (oberirdische Gewässer, Grundwasser/Quellen) der Waldgebiete durch Säure bildende Luftschadstoffe ist kein historisches Phänomen, sondern auch in Deutschland immer noch wirksam. Umweltverwaltung und Wasserwirtschaft sind bei der Überwachung des Schadensverlaufs, Begleitung von Regenerationsbemühungen und wegen besonderer Aufwendungen bei der Nutzung versauerter Gewässer langfristig gefordert. Nach erfolgreicher Reduzierung der Schwefelemissionen bleiben die Emissionen von reaktivem Stickstoff (Stickoxide, Ammoniak, Ammonium) ein anhaltendes Versauerungsrisiko, zum Teil verstärkt durch remobilisierten Schwefel aus dem Bodenspeicher. Während in den Lockersedimenten des Norddeutschen Tieflands der vertikale Stofftransport zum Grundwasser die Versauerungsdynamik bestimmt, sind im Mittel- und Süddeutschen Bergland schnelle hangparallele Abflüsse und damit einhergehende Versauerungsschübe umfangreich beteiligt. Für das Grundwasser in

Norddeutschland ist eine langfristig wenig veränderte Versauerungssituation wahrscheinlich, während sich im Mittel- und Süddeutschen Bergland eine Regeneration abzeichnet. Sie ist auch für einen Großteil der versauerten Bäche und Kleinseen der Mittelgebirge nachgewiesen. Die Trinkwasserversorgung hat diese nach anfänglichen Problemen weitgehend im Griff, sie muss jedoch mit anhaltend erhöhten Belastungen bei Förder- und Verteilersystemen und der Wasseraufbereitung rechnen. Stabilisierungsmaßnahmen in betroffenen Waldökosystemen (Kalkung, Waldumbau) bewirken keine direkte Regeneration der Gewässer, aber einen begleitenden Schutz. Waldökosysteme müssen Garanten für eine hohe Wasserqualität bleiben.

Stichworte: Gewässerversauerung, Grundwasser, Maßnahmen gegen Gewässerversauerung, Wasserversorgung, Waldkalkung, Waldumbau

Abstract

The acidification of the soil and of water bodies (surface water, groundwater/springs) in forest areas caused by acid forming airborne pollutants is not a historical phenomenon, but rather an ongoing problem in Germany. Regenerating, monitoring and using acid waters are long-term challenges for environmental administrations and for the water industry. Despite a successful campaign to reduce sulphur emissions, the emission of reactive nitrogen compounds (nitrogen oxides, ammonia, ammonium) remains an acidification hazard. This risk is reinforced by remobilised sulphur from the soil. In the loose sediments of the north German lowlands, vertical transport to the groundwater defines the acidification dynamic. In the mid and south German highlands, however, fast downslope discharges causing acidification surges is the main mechanism. While it is probable that the acidification of the groundwater in north Germany will remain unchanged in the long-term, regeneration in the highland regions is indicated. This has been substantiated for the majority of the acidified streams and smaller lakes in the low mountain range. After initial difficulties, the water industry now has the problem largely under control, must however reckon with increased wear to pumping, distribution and water preparation systems in the long-term. Measures to stabilize affected forest ecosystems (liming, conversion from coniferous to deciduous forests) don't have a direct effect on water quality regeneration, but do provide a measure of protection against acidification. Forest ecosystems must remain a guarantee for high water quality.

Keywords: acidification of waters, groundwater, mitigation of acidification, water supply, forest liming, forest conversion

1 Gewässerversauerung als aktuelles Umweltthema

Die Versauerung von Böden und Gewässern (oberirdische Gewässer, Grundwasser/Quellen) wird in der Öffentlichkeit vielfach als historisches Phänomen im Zusammenhang mit dem „Sauren Regen“ und dem „Waldsterben“ gesehen. Jedoch sind die mit anthropogener Versauerung verbundenen Prozesse immer noch wirksam. Wir konstatieren:

- Wo Gewässer versauern, sind Umweltverwaltung und Wasserwirtschaft beim allgemeinen Gewässerschutz und insbesondere bei der Sicherstellung der Trinkwasserversorgung langfristig gefordert.
- Die Entwicklung systematischer Umweltüberwachungsprogramme, u. a. der staatlichen Überwachung von Fließgewässern, Seen und Grundwasser/Quellwasser, wurde entscheidend durch die Erfahrungen mit der anthropogenen Versauerung vorangetrieben.
- Die Versauerung von Ökosystemen ist in ihrem Ausmaß sowie ihrer medienübergreifenden und langfristigen Wirkung ein Beispiel für globale Umweltschäden.
- Die Stringenz der ergriffenen Gegenmaßnahmen (speziell Emissionsminderung) kann als Vorbild dienen für die Bewältigung anderer globaler Umweltprobleme.

In Ergänzung zu früheren Übersichten und Schwerpunktberichten betroffener Bundesländer (z. B. UBA 1984, BITTERSOHL et al. 1997, RATHKENS 2003, JANKOWSKI et al. 2007, LUBW 2010, SCHAUMBURG et al. 2010) wird die aktuelle Situation der Gewässer in Deutschland auch unter dem Aspekt der Wasserdienstleistungen des Waldes sowie der Nutzungsproblematik beleuchtet. Die Ausführungen stützen sich auf veröffentlichte Informationen und aktuelle Daten zu einzelnen Fallbeispielen, zum Teil in Anlehnung an BITTERSOHL et al. (2014). Bezüglich der in den Waldökosystemen ablaufenden Pufferprozesse bzw. Säure-Base-Reaktionen wird auf die einschlägige Literatur verwiesen. Das spezielle Phänomen der Gewässerversauerung infolge Braunkohletagebau wurde aktuell u. a. von GRÜNEWALD u. SCHÖNHEINZ (2014) beschrieben.

2 Säuredeposition nimmt ab – Restrisiken bleiben

Potentielle Säurebildner sind chemische Verbindungen des Schwefels und des Stickstoffs, die seit Beginn der Industrialisierung verstärkt in die Atmosphäre emittiert werden. Infolge intensiver Luftreinhaltungsmaßnahmen konnten die Emissionen von Schwefelverbindungen in Deutschland zwischen 1990 und 2010 um 91,5 % verringert werden. In Folge dessen wurde in ganz Mitteleuropa ein starker Rückgang der Schwefeldeposition in den Waldgebieten registriert. Der Rückgang ist an ehemals hoch belasteten Standorten, wie dem Fichtelgebirge, besonders ausgeprägt

(s. Abb. 1). Auch die Emissionen von Stickstoffoxiden, die dem Verkehrs- und Industriebereich zuzuordnen sind, gingen in Deutschland um 54,2 % zurück. Dagegen wurde beim reduzierten Stickstoff (Ammoniak, Ammonium), der überwiegend landwirtschaftlichen Quellen zuzuordnen ist, nur 20 % Emissionsminderung erreicht. Das bedeutet für die aktuelle Deposition von Säurebildnern: die Stickstoffkomponenten überwiegen, wobei die Deposition von Nitrat-Stickstoff deutlich abnimmt, von Ammonium-Stickstoff zum Teil auf hohem Niveau verbleibt. Von letzterem besonders betroffen sind Waldgebiete in Regionen mit intensiver Tierhaltung (MOHR et al. 2005).

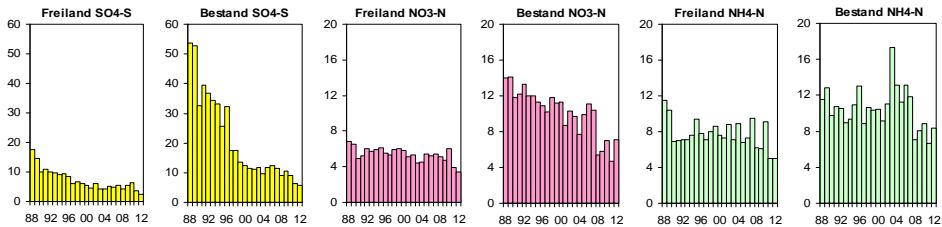


Abbildung 1: Deposition von Säurebildnern im Freiland (jeweils links) und Waldbestand (jeweils rechts) [kg/ha/a], Sulfat-Schwefel (gelb, links), Nitrat-Stickstoff (rot, Mitte), Ammonium-Stickstoff (grün, rechts). Hydrol. Intensivmessgebiet Lehstenbach/Fichtelgebirge (BLFU 2013 b)

Versauerungsempfindlich sind die Gebiete mit pufferschwachen (kalkfreien, basenarmen) Böden und Gesteinen. So betragen die Critical Loads (Ökosystem verträgliche Obergrenzen der Belastung) für Säure auf über 50 % der Waldfläche Deutschlands weniger als $1,5 \text{ kmol}_c/\text{ha/a}$ (Ionenäquivalente pro Hektar und Jahr). Zwischen 1990 und 2007 nahm der Anteil der Flächen in Deutschland, auf denen die Critical Loads für Versauerung deutlich bis sehr deutlich überschritten wurden, von über 50 % auf unter 10 % ab (BULTJES et al. 2011). Für 40 % der sensiblen Gesamtfläche wurde nur noch eine geringe Überschreitung von 0 bis $1 \text{ kmol}_c/\text{ha/a}$ ermittelt. Auch bei diesen geringeren Belastungen können Bodenvorräte an Säure puffernden basischen Kationen weiter abgebaut werden, so dass das Versauerungsrisiko für die nachgeordneten Gewässern anhält. Zudem werden infolge der nachlassenden Schwefeldeposition in den Verwitterungsdecken erhebliche Mengen an gespeichertem Sulfat-Schwefel remobilisiert. Dies kann die Regeneration versauerter Gewässer erheblich verzögern (ALEWELL et al. 2001).

3 Exkurs – Stofftransport zum Gewässer

Der Stoff- bzw. Säuretransport in der Landschaft wird maßgeblich von den Abflussvorgängen und Fließwegen des Wassers bestimmt. Zugeführte und im Untergrund freigesetzte Stoffe können entweder mit der Hangneigung in das nächstgelegene oberirdische Gewässer gelangen oder sie werden nach vertikaler Sickerpassage in das Grundwasser und gegebenenfalls von dort aus in das oberirdische Gewässer verfrachtet (s. Abb. 2).

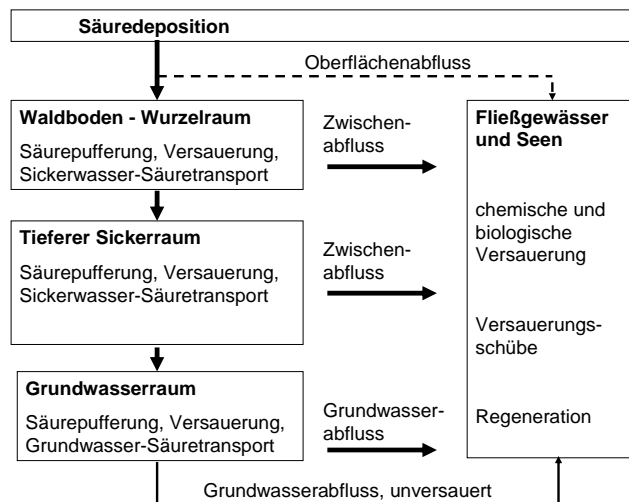


Abbildung 2: Stoffumsatzräume und Abflusskomponenten als Transportbahnen für atmosphärisch eingetragene und im Untergrund freigesetzte Säuren und Basen (aus BITTERSOHL et al. 2014)

Die Stoffbefrachtung der einzelnen Abflusskomponenten wird vom Stoffinhalt des Niederschlags, vom chemischen Zustand der durchflossenen Boden- und Gesteinsschichten sowie von den Feststoff-Wasser-Kontaktzeiten bestimmt. In den Lockersedimenten des Norddeutschen Tieflands überwiegt der vertikale Stofftransport mit dem Sickerwasser zum Grundwasser. Dagegen sind im Mittel- und Süddeutschen Bergland schnelle hangparallele Abflüsse aus Landoberflächen und Schneedecken sowie insbesondere aus den oberen Bodenhorizonten umfangreich beteiligt. Sie verursachen die saisonalen und episodischen Versauerungsschübe in die oberirdischen Gewässer, die die Biozönosen erheblich schädigen können (MEESENBURG 1997). Andererseits wird die Sicker- und Grundwasserpassage durch die laterale Stoffabfuhr partiell entlastet.

Das Grundwasser reagiert am Ende der Prozesskette des mehr oder weniger versauerten tieferen Sickertraums. Von Bedeutung ist hier die Lage der „Versauerungsfront“, die in der Regel eine obere versauerte Zone (Basensättigung BS der Festphase < 80 %) von einer tieferen unversauerten Zone (BS > 80 %) trennt

(MALESSA 1995). Reicht die Versauerungsfront in den Grundwasserschwankungsbereich hinein, kommt es zur episodischen Versauerung des Grundwassers. Eine gänzlich in das Grundwasser vorgedrungene Versauerungsfront kann zu chronischer Versauerung der über den Basisabfluss gespeisten Fließgewässer führen. Die Analyse der Stoffflüsse in einem Messprofil im Einzugsgebiet Lehstenbach/Fichtelgebirge zeigt beispielhaft, wie die deutliche Reduktion der Sulfateinträge ein Entlastungssignal Richtung Grundwasser bewirkte, dieses aber noch nicht maßgeblich beeinflussen konnte (s. Abb. 3). Das Sickerwasser der obersten Bodenschichten (gemessen in 0,5 m Tiefe) war im Zeitraum 2007 - 2010 nur noch gering belastet, entsprechend auch der hier generierte Zwischenabfluss. Andererseits wurden in der Festphase des tieferen Sickerbaus erhebliche remobilisierbare Sulfatmengen nachgewiesen (ca. 3.300 kg/ha, ALEWELL et al. 2001), die nachweislich den Prozess der gewässerseitigen Entsauerung verzögern (s. Kap. 5).

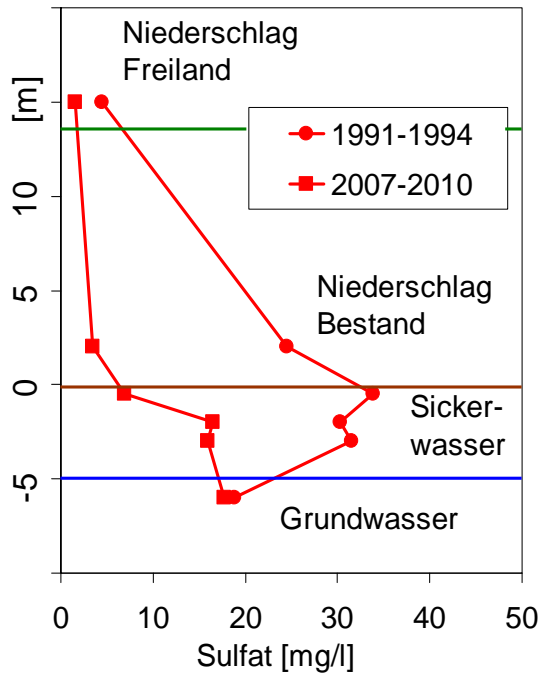


Abbildung 3: Entwicklung der Sulfatkonzentration im Niederschlag (Freiland, Waldbestand), Sickerwasser (3 Ebenen) und Grundwasser. Hydrologisches Intensivmessgebiet Lehstenbach/Fichtelgebirge (BLFU 2013a)

4 Versauerung des Grundwassers in Nord- und Süddeutschland

In den verbreiteten Lockergesteinsfolgen des Norddeutschen Tieflands ist das Grundwasser, soweit nicht durch Landwirtschaft und Siedlungen beeinflusst, zum Teil bis in über 10 m Tiefe versauert (FISCHER 1992, KUNKEL et al. 2004, WAESCH u. JANKOWSKI 2013). An 10 % aller flachen Grundwassermessstellen (0-10 m unter Gelände) wird deutlich versauertes Wasser mit pH-Werten von max. 5,7 angetroffen (s. Tab. 1). Hier erreichen 10 % aller Messstellen Aluminiumgehalte von mindestens 0,75 mg/l (nicht dargestellt), also weit über dem Trinkwassergrenzwert von 0,2 mg/l.

Tabelle 1: pH-Werte im Grundwasser (Daten ca. 1980 - 2000, nach KUNKEL et al. 2004)

	Norddeutsche Lockersedimente (nach Filtertiefe)			Saure Magmatite	Paläozoische Sedimente	Buntsandstein
Tiefe	< 10 m	10-25 m	25-50 m	Bohrungen und Quellen		
10-Perzentil	5,7	6,0	6,3	5,4	5,9	5,7
50-Perzentil	7,0	7,2	7,3	6,0	7,0	6,7

Bei stärkerer Sedimentverzahnung mit wechselnden Puffereigenschaften kann die Versauerungstiefe kleinräumig wechseln. Im Bereich der Wingst (Norddeutsche Geest) wurde die Versauerungsfront zwischen 11 und 27 m unter Gelände erbohrt (WALTHER et al. 2000).

In den versauerungsempfindlichen Festgesteinseinheiten Mittel- und Süddeutschlands wird häufig Quellwasser (als austretendes Grundwasser, vielfach Stütze ortsnaher Wasserversorgungen) untersucht. Tiefenabhängige Daten liegen daher nicht vor. Die niedrigsten pH-Werte (10 % aller Messstellen mit pH max. 5,4) finden sich im Grundwasser der sauren Magmatite und Metamorphite, das sind vorwiegend Granite und Gneise (s. Tab. 1). Aluminium wird mobilisiert, aber weniger stark als in den Norddeutschen Lockersedimenten. Die Versauerung dürfte meist einige Meter Tiefe erreichen, kann aber in aufgelockerten Gesteinen sowie wasserwegsamem Kluft- und Störungszonen wesentlich tiefer gelangen. Hier sind oft die Fassungsanlagen von Wasserversorgungen platziert.

Für lange Zeitvergleiche steht oft nur der pH-Wert zur Verfügung, der (mit Einschränkung) leicht zu messen ist und trinkwassertechnische Bedeutung hat. Soweit Messdaten verfügbar, kann die tatsächliche hydrochemische Entwicklung mittels nicht pufferabhängiger Versauerungsindikatoren, z. B. Sulfat (vgl. Abb. 3) oder Alkalinität (nach REUSS u. JOHNSON 1985) genauer beschrieben werden.

Für das Grundwasser der Norddeutschen Lockersedimente liegen keine aktuellen Daten zu zeitlichen Trends vor. Beobachtungen, u. a. in den Trinkwassergewinnungsgebieten Senne, Fuhrberger Feld, Düşhorner Heide, Wingst, weisen darauf hin, dass sich versauerte Grundwasservorkommen trotz Rückgang der Säuredeposition und Entlastung der Waldböden nicht merklich verbessert haben (s. Kap. 6).

Für das Grund- und Quellwasser der Mittel- und Süddeutschen Festgesteine zeichnet sich eine Regeneration ab. Im Buntsandsteingebiet der Kleinen Kinzig (Baden-Württemberg) wurde eine Zunahme der pH-Werte um 0,1 bis 0,6 Einheiten zwischen 1994/96 und 2005/07 registriert (LUBW 2010). Für die Landesfläche Bayerns ermittelte NEUMANN (2014) eine deutliche Abnahme der Messstellen im pH-Bereich $< 5,5$, während die Anzahl der Messstellen im pH-Bereich 5,5 bis $< 6,5$ keine signifikante Veränderung zeigt. Ein (allerdings aus unterschiedlichen Messstellenkollektiven) ermittelter Datenvergleich deutet an, dass zwischen 1989 und 2007/09 sowohl im Kristallin- als auch im Buntsandsteingebiet Bayerns die Anteile versauerter Grundwasservorkommen ($\text{pH} < 6,0$) deutlich zurückgegangen sind (BLFU 2011). Besondere Ursachen der Regeneration können sein:

- nachlassende Intensität von Versauerungsschüben, die auf oberflächennahe Grundwasserschichten wirken
- zunehmende Entlastung der oberflächennahen, lateralen Fließwege, soweit sie auf flache Fließwege von Quellfassungen Einfluss haben

Bei Berücksichtigung der regionalen Vielfalt von Einflussfaktoren kann eine generelle Entlastungstendenz für das Grund- und Quellwasser in den deutschen Mittelgebirgen angenommen werden. Für einen kleinen Anteil ehemals hoch belasteter und stark versauerungsempfindlicher Vorkommen, besonders in den sauren Magmatiten (Granite, Gneise, etc.) und Quarziten, wird sich nur sehr langfristig eine Verbesserung einstellen.

5 Versauerung der Fließgewässer und Seen

Die oberirdischen Gewässer des Norddeutschen Tieflands sind wegen geringem Zwischenabfluss (s. Kap. 3) sowie Einflüssen aus Landwirtschaft und Besiedelung weitgehend von anthropogener Versauerung verschont. Im bewaldeten Bergland sind überwiegend die quellenahen Bachabschnitte und einzelne hochgelegene Kleinseen versauert. Vielfältige lokale Einflüsse wie die Höhe der Säuredeposition, die Versauerungsempfindlichkeit der Böden, die Lage der Versauerungsfront, die Säurespeicherung im Untergrund und die Ausprägung der Abflusskomponenten bestimmen den Versauerungsgrad der oberirdischen Gewässer und den Verlauf der Regeneration. Beispielhaft für die Spanne von Versauerungstypen und die Art ihrer Regeneration stehen der *Gräfenbach* im Hunsrück und die *Lange Bramke* im Harz (s. Abb. 4).

Gräfenbach: Sehr pufferschwacher Untergrund (Quarzite), Anstieg des pH-Wertes bedeutet Verringerung der Protonenkonzentration um ca. 80 %, episodische Versauerungsspitzen werden schwächer, chemischer Versauerungsstatus weiterhin „versauert“, biologischer Versauerungsstatus (Diatomeen, Makrozoobenthos) weiterhin „permanent sauer“ (SCHAUMBURG et al. 2010).

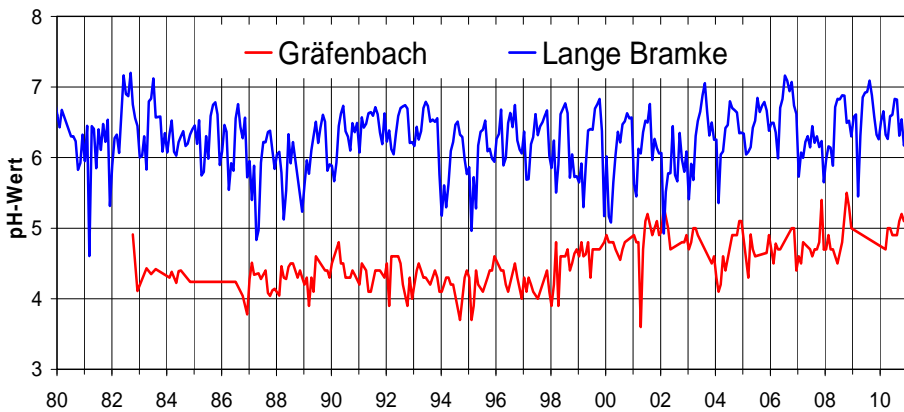


Abbildung 4: pH-Werte des Gräfenbachs (Hunsrück) 1983 - 2010 und der Langen Bramke (Harz) 1980 - 2010 (BLFU 2013b)

Lange Bramke: Mäßig pufferschwacher Untergrund (Schiefer), pH-Werte stabilisieren sich im schwach sauren Milieu, das dem natürlichen, unbelasteten Zustand (chemischer Status „versauerungsgefährdet“) nahekommt, extreme Versauerungsschübe bleiben weitgehend aus, biologischer Versauerungsstatus (Makrozoobenthos) steigt von Klasse 5 (permanent sauer) nach Klasse 2 (episodisch schwach sauer), wobei die Gesamt-Artenzahl deutlich ansteigt (SCHAUMBURG et al. 2010).

Der Zusammenhang von Versauerungsentwicklung und Fischpopulation ist wegen des erheblichen Beobachtungsaufwandes, vielfacher sonstiger Umwelteinflüsse und unklarer historischer Konstellationen schwierig zu fassen. Im Schwarzwald und Odenwald hat sich die Wasserqualität versauerter Bäche so weit verbessert, dass sich Bestandesdichte und Altersstruktur der Fischbestände erholen konnten (LUBW 2010). Soweit besonders im Frühjahr noch Versauerungsepisoden auftreten, können sie die Reproduktion von Bachforellen beeinträchtigen und die Population instabil halten. Andernorts noch anzutreffende, stark versauerte Bäche (z. B. im Fichtelgebirge, Erzgebirge) bleiben anhaltend besiedelungsfeindlich.

Nach Trenduntersuchungen für 79 Mittelgebirgsbäche in Deutschland setzte die allgemeine Regeneration Mitte der 1980er-Jahre ein (SUCKER et al. 2011). Sie ist z. B. an Hand der Indikatoren Sulfat (Abnahme bei 89 % aller Bäche), pH-Wert (Zunahme bei 67 %) und Aluminium (Abnahme bei 61 %) nachgewiesen. Langzeitmessungen in Mittelgebirgs-Einzugsgebieten haben nachgewiesen, dass die Sulfat-Austräge die abnehmenden atmosphärischen Einträge zunehmend übersteigen.

Durch Remobilisierung des noch im Sickerraum gespeicherten Sulfats wird die Regeneration der Gewässer erheblich verzögert (PRECHTEL et al. 2001). Die zeitlichen Trends sind für Nitrat – somit auch für den Anteil Stickstoff induzierter Versauerung – am wenigsten eindeutig, was auf die unterschiedlichen Einflüsse von Deposition, mikrobiellen Prozessen und Waldbewirtschaftung (einschließlich Kalkung) zurückzuführen ist.

Eine anthropogene Versauerung von Seen ist an etlichen hochgelegenen Kleinseen der Mittelgebirge zu beobachten. Die örtlich Stoffzufuhr (Quellbäche, Hangabflüsse, randliche Grundwasserzutritte) und seeinterne Umsätze bestimmen hier die Versauerungscharakteristik. Stichproben von 1999 zeigen einen versauerten Zustand (s. Tab. 2). Die damaligen hydrochemischen Hinweise auf beginnende Regeneration werden durch eine weitere positive Entwicklung bestätigt (SCHAUMBURG 2014). Soweit die Kleinseen des Bayerisch-Böhmischen Waldes einen (natürlichen oder künstlichen) Fischbestand hatten, ist dieser dem Versauerungsdruck ab den 1950er-Jahren zum Opfer gefallen. An versauerten Kleinseen des Schwarzwaldes zeigten die Amphibienpopulationen eine deutliche Verringerung der Schädigungsraten von Eiern und Larven sowie eine Erhöhung der Bestandesdichten (BÖHMER 2002).

Tabelle 2: *Kleinseen im Bayerischen-Böhmischen Wald, hydrochemischer Zustand im Spätsommer 1999 (aus VRBA et al. 2000)*

	Tiefe m	DO mg/l	pH	ANC µmol/l	DOC mg/l	SO ₄ mg/l	Al (ion.) mg/l
Rachelsee	0,5	8,20	4,97	-20	0,91	3,00	0,10
	12,5	0,10	5,93	151	3,21	2,02	0,03
Kleiner Arbersee	0,5	8,26	5,51	-1	2,95	3,08	0,03
	8	0,54	5,48	30	2,45	3,09	0,01

DO = gelöster Sauerstoff, ANC = Säureneutralisierungskapazität, DOC = gelöster organischer Kohlenstoff, Al (ion.) = Al³⁺, Al(OH)²⁺, Al(OH)₂⁺

6 Wasserversorgung – Probleme und Anpassungsmaßnahmen

Seit Mitte der 1980er-Jahre wurde erkannt, dass die Gewässerversauerung (hier überwiegend im Grundwasser) erhebliche Auswirkungen auf die Wasserversorgung hat (LÜCKEWILLE et al. 1984, STREBEL et al. 1984, RÖDER et al. 1984, BAUDISCH 1989, HARTING et al. 2000, WALTHER et al. 2000).

Infolge zunehmender Versauerung des gewonnenen Rohwassers waren folgende Probleme zu bewältigen:

- Verkrustung von Förderanlagen (Pumpen, Filter, Rohrleitungen)
- Korrosion, Lösung von Metallen in Verteilersystemen, u. U. auch in Hausinstallationen
- Unzureichende Aufbereitungstechnik bzw. Einhaltung von Grenzwerten (Entsäuerung, Entaluminierung, Filterung, Wartungsqualität)
- Mangelnde betriebswirtschaftliche Basis von Klein- und Kleinstanlagen (vor allem Quellen gestützte Ortswasserversorgungen im Süddeutschen Raum)
- Mangelnde Kenntnisse der Vorgänge im Zustromgebiet (hydrologisches Einzugsgebiet)
- Anfangs mangelnde Fachgrundlagen und Beratungskompetenz der Fachbehörden

Grundsätzlich können diese Probleme als technisch und organisatorisch überwunden gelten. Neben z. T. erheblichen Anfangsinvestitionen berichten betroffene Wasserversorger über langfristig erhöhte Aufwendungen, zumal sich die Versauerungssituation nicht wesentlich verbessert hat (KULASZEWSKI 2012, MÜLLER 2012, RAUE & ZANDER 2012, WARNKE 2012, HARTING et al. 2000). Diese zusätzlichen Aufwendungen werden nach Auskunft der Wasserversorger nicht gesondert registriert. Zu den seit den 1980er-Jahren getroffenen Maßnahmen gehören:

- Wiederholte Regeneration von Anlagenteilen (chemisch-physikalische Behandlung)
- Erneuerung korrodierter Anlagenteile, beschleunigter Ersatz veralteter Materialien
- Nachrüstung bzw. Neubau der Trinkwasseraufbereitungsanlage
- Verbessertes Einzugsgebietsmanagement, ggf. Erschließung unversauerter Vorkommen, ggf. Waldumbau (i. d. R. keine Waldkalkung wegen Nitrat-Austragsrisiko)
- Bei Kleinbetrieben und Einzelwasserversorgern vielfach
 - Verbessertes Betriebsmanagement und Wartungsniveau
 - Auflassung nicht sanierungsfähiger Anlagen
 - Bildung von Versorgungsgemeinschaften, Fernwasseranschluss

7 Was kann die Forstwirtschaft zur Regeneration beitragen?

Die in Waldgebieten gebildeten Wasservorkommen sind grundsätzlich als hochwertig einzustufen, bereichsweise jedoch durch die von außen hereingetragene Schadstoffbelastung, u. U. auch durch instabile Waldzustände, gefährdet oder beeinträchtigt. Forstwirtschaftliche Maßnahmen, die der Wiederherstellung eines stabilen, leistungsfähigen Waldökosystems dienen, können zur Stabilisierung der Wasserdienstleistungen des Waldes beitragen (s. Tab. 3). Allerdings ist eine kurzfristige Sanierung versauerter Bäche und Grundwasservorkommen mit forstwirtschaftlichen Methoden nicht zu erreichen. In Trinkwassereinzugsgebieten werden Waldkalkungen (mit Ausnahmen) sogar vermieden, da das Risiko erhöhter Nitratausträge aus Sicht des Grundwasserschutzes vielfach nicht hinreichend eingeschätzt werden kann.

Tabelle 3: *Wirkungen forstlicher Maßnahmen auf die Versauerung von Gewässern*

Ziele der Forstwirtschaft	Gewässer bezogene Wirkungen
Bodenkalkung Mittels Bodenkalkung Risiken aus abgelaufener und aktueller Bodenversauerung vermindern	<ul style="list-style-type: none"> - Pufferfähigkeit des Waldoberbodens wird wieder aufgebaut, oberflächennahe Wasserflüsse werden zum Teil säureentlastet (Zwischenabfluss in Bäche, Seen) - Keine (direkt) entlastende Wirkung im tieferen Sickerraum, aber möglicherweise Verlagerung gespeicherter Säure in den tieferen Sickerraum bzw. Grundwasser - An umsetzungsbereiten Standorten Bildung von Überschussnitrat (Versauerungspotential, Nitratbelastung des Grundwassers), hier soll nicht gekalkt werden - Risiko für Gewässer-Biozönosen bei Direkteintrag von Kalk in die Gewässer, diese sind samt Randstreifen auszusparen
Waldumbau Durch Entwicklung laubholzreicher Wälder und ggf. Bodenkalkung die Vitalität und Stabilität der Waldbestände erhöhen	<ul style="list-style-type: none"> - Deposition von Säurebildnern wird partiell gemindert, denn Laubholz und gemischte Bestände filtern weniger Schadstoffe aus der Luft (jedoch Verlagerung der Schadstoffe an andere Orte) - Höheres Stickstoffspeichervermögen von laubholzreichen Wäldern mindert Versauerungs- und Nitrat-austragsrisiko - Höhere Stabilität (gegen abiotische und biotische Risiken (Sturm, Schädlingsbefall)) mindert Versauerungs- und Nitrataustragsrisiko

8 Ausblick

Angesichts der schwierigen Gestaltung eines effektiven Gewässerschutzes in der landwirtschaftlich genutzten Fläche müssen die Wälder weiterhin als bevorzugte Lieferanten für saubere Gewässer und gutes Trinkwasser gepflegt und entwickelt werden. Die internationale Politik hat sich über wirksame Maßnahmen gegen die Versauerung unserer Lebensräume verständigen können. Warum sollte Entsprechendes zur Begrenzung des Klimawandels nicht möglich sein?

Literatur

- ALEWELL, C.; ARMBRUSTER, M. J.; BITTERSÖHL, J.; EVANS, C.; MEESENBURG, H.; MORITZ, K. u. PRECHTEL, A. (2001): Are there signs of aquatic recovery after two decades of reduced acid deposition in the low mountain ranges of Germany? *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 5, 367-378
- BAUDISCH, R. (1989): Verstopfung von Brunnenfiltern und Unterwasserpumpen durch Aluminiumoxide. *bbr*, 40, 270-274
- BITTERSÖHL, J., KÖLLING, C.; KREBS, M.; MORITZ, K.; MÜLLER, F.-X. u. VON BOHLEN, W. (1997): Grundwasserversauerung in Bayern. – Informationsber. Bayerisches Landesamt Wasserwirtschaft 1/97, München, 179 S.
- BITTERSÖHL, J.; WALTHER, W. u. MEESENBURG, A. (2014): Gewässerversauerung durch Säuredeposition in Deutschland – Entwicklung und aktueller Stand. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 58, 260-273
- BLFU (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT) (2011): Daten aus dem Landesmessnetz Grundwasserbeschaffenheit (schriftl. Mitt. J. FRIPAN)
- BLFU (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT) (2013a): Daten aus dem Integrierten Hydrologischen Monitoring (schriftl. Mitt. N. FOULLOIS)
- BLFU (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT) (2013b): Daten aus dem Monitoringprogramm für versauerte Gewässer in der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen der ECE (schriftl. Mitt. A. MAETZE)
- BÖHMER, J. (2002): Untersuchungen des Säurezustandes von Stillgewässern des Schwarzwaldes und des Odenwaldes mittels Bioindikatoren (Amphibien). LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.), <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/>, Zugriff am 20.8.2013 16:05
- BUILTJES, P.; HENDRIKS, E.; KOENEN, M.; SCHAAP, M.; BANZHAF, S.; KERSCHBAUMER, A.; GAUGER, T.; NAGEL, H.-D.; SCHEUSCHNER, T. u. SCHLUTOW, A. (2011): Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland (Modelling of Air Pollutants and Ecosystem Impact - MAPEI). Texte Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau, 97 S.
- FISCHER, J. (1992): Gefährdung der Grundwasserqualität durch Säureeintrag in das Grundwasser und Pilotmaßnahmen zur Sicherung der Trinkwasserversorgung. *DVGW-Schriftenreihe Wasser*, 73, 91-110
- GRÜNEWALD, U. u. SCHOENHEINZ, D. (2014): Bergbaubedingte Gewässerversauerung in der Niederlausitz – Ursachen, Ausmaß und Minderungskonzepte. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 58, 274-285
- HARTING, H.; SCHMIDT, H.; GOENS, J. u. JAGEMANN, M. (2000): Versauerungserscheinungen in Grundwasser und Boden an Waldstandorten am Beispiel des Wasserschutzgebietes Düşhorner Heide. Bericht, unveröff., Bez.-Reg. Lüneburg, Außenstelle Verden

- JANKOWSKI, A.; SCHÜLTKEN, H.; HÖLSCHER, J.; WALTHER, W.; CRAMER, T.; REINSTORF, F.; HEBLACK, K.; MEESENBERG, H.; MEIWES, K. J.; BÖTTCHER, J.; MÜLLER, U.; MALESSA, V. u. AHRENDTS, B. (2007): Grundwasserversauerung: Methoden zur Gefährdungsabschätzung und Möglichkeiten zu Gegenmaßnahmen. Grundwasser 7, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, 39 S.
- KULASZEWSKI, O. (2012): schriftl. Mitteilung, Stadtwerke Bielefeld
- KUNKEL, R.; VOIGT, H.-J.; WENDLAND, F. u. HANNAPPEL, S. (2004): Die natürliche, ubiquitär überprägte Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland. Umwelt, Band 47, Forschungszentrum Jülich
- LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.)) (2010): Bericht zur Versauerung der Umwelt. 99 S.
- LÜCKEWILLE, A.; SPÄH, H. u. THESING, U. (1984): Aluminiumhydroxid – Ausflockungen in Quellbächen der Senne (Teutoburger Wald) als Folge saurer Niederschläge. Umweltbundesamt, Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland, Materialien 1/84, 106-120
- MALESSA, V. (1995): Soil acidification gradients: Mode of development, status quo and classification. Water, Air, and Soil Pollution, 84, 303-321
- MEESENBERG, H. (1997): Untersuchungen zum Säure-Base-Status eines episodisch sauren Fließgewässers im Schwarzwald. Freiburger Geographische Hefte, 51, 154 S.
- MOHR, K.; SCHAAF, S.; HORVÁTH, B.; MEESENBERG, H. u. DÄMMGEN, U. (2005): Stoff- und Energieflüsse der im ANSWER-Projekt untersuchten Waldbestände. In: DÄMMGEN, U. (Hrsg.): Bestimmung von Ammoniak-Einträgen aus der Luft und deren Wirkung auf Waldökosysteme (ANSWER-Projekt). Landbauforschung Völknerode, Sonderheft 279, 69-94
- MÜLLER, G. (2012): schriftl. Mitteilung, Stadtwerke Kirchenlamitz, Fichtelgebirge
- NEUMANN, J. (2014): Saure Gewässer unter uns – Versauerung im Grundwasser. Vortrag, Tagung „25 Jahre Versauerungsmonitoring in Bayern“, 04./05.11.2014, Bayer. Landesamt f. Umwelt, Hof
- PRECHTEL, A.; ALEWELL, C.; ARMBRUSTER, M.; BITTERSÖHL, J.; CULLEN, J. M.; EVANS, C.; HELLIWELL, R.; KOPACEK, J.; MARCHETTO, A.; MATZNER, E.; MEESENBERG, M.; MOLDAN, F.; MORITZ, K.; VESELY, J. u. WRIGHT, R. F. (2001): Response of sulphur dynamics in European catchments to decreasing sulphate deposition. Hydrol. Earth Syst. Sci., 5, 311-325
- RATHKENS, K. (2003): Wirkungen der Gewässerversauerung auf Fische und Amphibien. In: LANDESAMT FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.): Medienübergreifende Umweltbeobachtung – Stand und Perspektiven, Tagungsband zur Tagung der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg vom 18. Juni 2003 in Karlsruhe, 95-101
- RAUE, W. u. ZANDER, O. (2012): schriftl. Mitteilung, Stadtwerke Hannover
- REUSS, J. O. u. JOHNSON, D. W. (1985): Effect of soil processes on the acidification of water by acid deposition. J. Environ. Q., 14, 26-31
- RÖDER, R.; SCHRETZENMAYR, G. u. SIXT, K. (1984): Saures, oberflächennahes Grundwasser und Oberflächenwasser als Rohstoff für die Trinkwasserversorgung in Bayern. Umweltbundesamt, Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland, Materialien 1/84, 315-326
- SCHAUMBURG, J.; MAETZE, A.; LEHMANN, R.; KIFINGER, B.; CORING, E. u. BALTZER, S. (2010): Konvention über den weiträumigen, grenzüberschreitenden Transport von Luftverunreinigungen. Monitoringprogramm für versauerte Gewässer durch Luftschadstoffe in der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen der ECE. Bericht der Jahre 2007-2008. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 134 S.
- SCHAUMBURG, J. (2014): Versauerungsmonitoring Seen – Historie und Entwicklung. Vortrag, Tagung „25 Jahre Versauerungsmonitoring in Bayern“, 04./05.11.2014, Bayer. Landesamt f. Umwelt, Hof
- STREBEL, O.; BÖTTCHER, J. u. RENGER, M. (1984): Einfluß von Boden und Bodennutzung auf die Stoffanlieferung an das Grundwasser. Proceedings of the Internat. Symposium on „Recent Investigations in the Zone of Aeration (RIZA)“, Vol. 2, Munich, 263-269
- SUCKER, C.; WILPERT, K. V. u. PUHLMANN, H. (2011): Acidification reversal in low mountain range streams of Germany. Environmental Monitoring and Assessment, 174, 65-69

- UBA (UMWELTBUNDESAMT) (1984): Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland. Materialien 1/84
- VRBA, J. (Hrsg.) (2000): Acidified Lakes in the Bohemian/Bavarian Forest – History, Present and Future. Proceedings of the International Workshop, Ceske Budejovice, March 21-23 2000, Siva Gabreta, 4, Vimperk
- WAESCH, T. u. JANKOWSKI, A. (2013): schriftl. Mitteilung. NLWKN (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz), Betriebsstelle Hannover-Hildesheim
- WALTHER, W.; CRAMER, T.; HEBBLACK, K. u. REINSTORF, F. (2000): Säureeinträge und Einträge von Stickstoff über den Luftpfad und deren Auswirkungen auf Boden und Grundwasser im Bereich der Wingst / Niedersachsen. Abschlussbericht im Auftrag des Niedersächsischen Umweltministeriums, Hannover, TU Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft
- WARNKE, A. (2012): schriftl. Mitteilung. Wasserverband Wingst

Korrespondierender Autor:

Dr. Jochen Bittersohl
Aindorferstr. 2
D-80686 München
jochen.bittersohl@gmx.de

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Walther
Vormals: TU Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft

Dr. Henning Meesenburg
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt