©Österr. Fischereiverband u. Bundesamt f. Wasserwirtschaft, download unter www.zobodat.at

Wissenschaft

Österreichs Fischerei Jahrgang 37/1984 Seite 184 – 194

Roland Psenner

Saurer Regen – eine Gefahr für unsere Gewässer?

Bevor ich zu schreiben begann, habe ich mich gefragt: Ist es überhaupt notwendig, einen x-ten Artikel zum Problem »saurer Regen« zu verfassen, wo in den letzten Jahren jede, aber auch jede Zeitschrift, angefangen von »Bild der Wissenschaft«, über »National Geographic« bis zu »Time«, »Stern« und »Spiegel« Serien und Seiten mit diesem Thema gefüllt hat?

Es scheint mir doch einen Versuch wert, da oft Nebenaspekte überbetont, wichtige Dinge hingegen vernachlässigt wurden, und da bisher in Österreich zum Problem der Gewässerversauerung wenige Untersuchungsergebnisse vorliegen, während sich »das Waldsterben« zu einem Schlager entwickelt hat.

Ich möchte versuchen, das Problem so leidenschaftslos wie möglich und so engagiert wie notwendig zu behandeln, die wichtigsten Begriffe klären, auf weiterführende Literatur hinweisen und auch jene Aspekte anführen, die beim Zitieren des Schlagworts »saurer Regen« oft übersehen werden.

Dazu werde ich diesen Artikel in zwei Teile gliedern:

1. Ursachen und Entstehung
2. Auswirkungen auf Böden, Vegetation und Gewässer.

Logischerweise sollte sich ein dritter Teil anschließen, der etwa lauten könnte:

3. Perspektiven, Gegenmaßnahmen.

Er soll hier nur kurz angedeutet werden und auf zwei wesentliche Bedingungen reduziert werden, die meiner Meinung nach sind: globale Betrachtungsweise, ökologisches Denken.

1. Wie entsteht saurer Regen?

Stumm, Morgan und Schnoor haben das Phänomen auf die einfachste Formel gebracht: »Das Auftreten saurer Niederschläge in verschiedenen Regionen der nördlichen Hemisphäre ist eine Folge von Störungen der Kreisläufe, die Land, Wasser und Luft koppeln.«

Damit ist folgendes gesagt: Saurer Regen ist eine der Auswirkungen des biogeochemischen Ungleichgewichtes zwischen Auf- und Abbau von Biomasse; die in Jahrmillionen entstandenen fossilen Brennstoffe mit ihrem riesigen Gehalt an Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel, Phosphor und Schwermetallen werden in wenigen Jahrzehnten wieder freigesetzt und belasten die Biosphäre (Luft, Wasser, Boden).

Azidität oder die Anwesenheit freier Säuren ist allerdings nicht die einzige Eigenschaft des Regens, er wirkt auch als *Dünger:* positiv in einer sehr frühen Phase für das Wachstum von Wäldern (Stickstoffdüngung), negativ durch eine Eutrophierung von Seen. Bei großen Seen im Voralpengebiet reicht z. B. der aus der Luft eingetragene Phosphor bereits aus, jede Restaurierungsmaßnahme zu erschweren oder zu blockieren.

©Österr. Fischereiverband u. Bundesamt f. Wasserwirtschaft, download unter www.zobodat.at

Eine dritte Eigenschaft des Regens muß genannt werden: seine Giftigkeit oder *Toxizität* für Pflanzen, Tiere und Menschen. Sie besteht einerseits darin, daß mit der Luft große Mengen organischer Verunreinigungen und Schwermetalle in Böden und Gewässer gelangen, und andererseits in der Tatsache, daß unter sauren Bedingungen aus Böden und Gestein Aluminium und Schwermetalle freigesetzt werden.

Damit hätten wir die drei wichtigsten Eigenschaften des Regens, der heute auf Europa und Nordamerika niedergeht, erwähnt:

Säure, Dünger, Gift.

Seit wann gibt es sauren Regen?

Um auf diese Frage eine Antwort zu erhalten, bieten sich im Grunde zwei Betrachtungsweisen an:

- Die Untersuchung natürlicher Kreisläufe jener Elemente, die die chemischen Eigenschaften des Regens bestimmen; das sind in der Hauptsache Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel. Dazu eignen sich Untersuchungen in sehr abgelegenen Gebieten der Erde.
- Untersuchungsergebnisse oder die Untersuchung »fixierter« Niederschlagsproben aus vorindustriellen Zeiten; hier bieten sich z. B. das Eis kalter Gletscher oder die Sedimente von Seen an.

Natürliche Quellen

Eine Quantifizierung natürlicher Kreisläufe ist verständlicherweise schwierig und muß sich immer auf eine bestimmte geographische, klimatische oder Vegetationszone beschränken. Der Abgabe von Kohlendioxid (CO_2) durch Atmung, Waldbrände, Vulkanismus steht der Prozeß der Photosynthese oder der pflanzlichen Fixierung von Kohlensäure gegenüber, der bis vor etwa 100 Jahren in einem Gleichgewicht stand. Die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre spielt allerdings für die Versauerung des Regens nicht in erster Linie eine Rolle – obwohl sie wahrscheinlich zu Klimaveränderungen führen wird –, da CO_2 bzw. das in Wasser gelöste H_2CO_3 eine schwache Säure ist (pH 5.6).

Wichtiger ist der Schwefelkreislauf. Schwefel wird in großen Mengen als Seesalzaerosol freigesetzt, ist aber in dieser Form für die Versauerung belanglos, da es sich um ein neutrales Salz (Na_2SO_4) handelt. Schwefelwasserstoff (H_2S), der aus Sedimenten, Sümpfen und nassen Böden freigesetzt wird, spielt jedoch eine wichtige Rolle, da er in der Atmosphäre innerhalb kürzester Zeit in Schwefelsäure (H_2SO_4) umgewandelt wird.

Noch unsicherer ist die Quantifizierung natürlicher Stickstoffkreisläufe, hier ist einerseits an die Freisetzung von NO und N_2O (Stickstoffoxide) aus marinen Sedimenten und Böden zu denken, die auf bakterielle Aktivität zurückgehen, andererseits an die Freisetzung von Ammoniak (NH_3) aus dem Eiweißabbau.

Auch die Blitzentladung bei Gewittern kann zur Entstehung von Stickstoffoxiden (NO_x) beitragen, diese Reaktion ist mit dem Zündfunken im Automotor zu vergleichen. Die Stickstoffoxide werden in der Regel weiteroxidiert zu Salpetersäure (HNO_3), der zweitwichtigsten starken Säure neben H_2SO_4, während Ammoniak in der Atmosphäre nur zu einem geringen Teil oxidiert wird und als Puffer für H^+-Ionen wirken kann ($NH_3 + H^+ - NH_4^+$).

Einen weiteren Beitrag zur Versauerung der Atmosphäre stellt der Vulkanismus dar, durch den Schwefelverbindungen (SO_2, SO_3, H_2S, H_2SO_4) und Salzsäure (HCl), die dritte starke Säure im Niederschlag, in die Atmosphäre gelangen.

Das aus dem Meer stammende Chlorid ist hingegen neutral, es besteht fast ausschließlich aus Kochsalz (NaCl).

Aus diesen biogeochemischen Kreisläufen läßt sich ein natürlicher pH-Wert des Regens

©Österr. Fischereiverband u. Bundesamt f. Wasserwirtschaft, download unter www.zobodat.at

abschätzen: er liegt im Mittel bei etwa 5.0, der Schwankungsbereich ist jedoch mit Werten zwischen pH 4.5 und 5.5 relativ groß.

Diese Ergebnisse wurden durch Untersuchungen von Niederschlägen aus dem Polargebiet und dem Nordwest-Territorium Kanadas bestätigt.

Der Eingriff des Menschen

Einen ausgezeichneten Vergleich mit der Situation von vor über 100 Jahren bietet die Arbeit von Robert Angus Smith, dem Begründer der chemischen Klimatologie. Er untersuchte um 1870 den Regen in England (und Deutschland), wobei er ländliche Gebiete mit städtischen Meßorten und hochindustriellen Gegenden verglich. Die Arbeiten wurden sehr sorgfältig durchgeführt und erlauben es, die von Smith gemessenen Konzentrationen an freien Säuren (mineralische Azidität = H-Azi) in pH-Werte umzurechnen (vergleiche Abb. 1 und 2). Daraus ergibt sich, daß vor mehr als 100 Jahren der saure Regen in England auf Industriestädte wie Liverpool, Manchester, London und Glasgow begrenzt blieb, die durchwegs pH-Werte um 3.5 aufgewiesen haben dürften. Kleinere Städte in England und Schottland waren etwa im pH-Bereich von 3.9, während der Regen in ländlichen Gebieten meist einen pH von 5.1 aufwies.

Heute hat sich das Problem insoweit verlagert, daß zwar kaum niedrigere pH-Werte im Regen festzustellen sind (es gibt zwar »Rekorde« von pH unter 3 im Regen und unter 2 im Nebel) als damals in englischen Großstädten gemessen wurden, daß sich aber die Gebiete mit saurem pH stark ausgedehnt haben.

Es hat also, mit anderen Worten, eine Nivellierung stattgefunden. Dieser Trend zur Angleichung und zugleich Ausweitung des Problems wurde auch bei einer vergleichenden Untersuchung 1956/1983 in Europa und Nordamerika festgestellt. Es gibt in Mitteleuropa und Nordamerika sehr große Gebiete mit pH-Werten um 4.0, eine Differenzierung in Gegenden mit normalem und saurem Niederschlag ist kaum mehr möglich. Mit einiger Übertreibung könnte man sogar behaupten, daß sich der Trend umgekehrt hat, d. h. daß der Niederschlag in Städten weniger sauer ist als auf dem Land.

Das hängt damit zusammen, daß die größere Staubbelastung in den Städten zu einer gewissen Neutralisation der im Regenwasser gelösten Säuren beiträgt.

Die von vielen Untersuchungen gestützte Aussage, daß sich der pH-Wert der Niederschläge in Mitteleuropa in den letzten Jahren auf ein Mittel von 4.0 ± 0.3 eingependelt hat, hängt mit der »Politik der hohen Schornsteine« zusammen. Bei Höhen von über 300 m durchstoßen die Abgase meistens die im Winter vorhandenen Inversionsschichten und führen zu einer gleichmäßigen und weiträumigen Verteilung der Luftschadstoffe.

Die einseitige Reduzierung des Staubausstoßes hat außerdem dazu geführt, daß erstens eine gewisse Neutralisation der Säuren bereits in der Atmosphäre verhindert wurde und daß zweitens die gasförmigen Luftverunreinigungen auf eine weite Reise – oft über 1000 km – geschickt wurden.

Der Tropengürtel bildet eine wirksame Sperre gegen die Ausbreitung der Luftverunreinigungen, so daß die Niederschlagsversauerung in der Regel auf die Nordhalbkugel beschränkt ist.

Emission – Transmission, Konversion – Immission, Deposition

beschreiben in Kurzform die Abgabe, die Windverfrachtung, Umwandlung und Einwirkung von Luftverunreinigungen.

Aus Emissionsdaten bzw. aus der Menge verbrannter Kohle und Erdöls und deren Schwefelgehalt und aus meteorologischen Daten kann man berechnen, wieviel an Luftschadstoffen (SO_2) jedes europäische Land importiert und exportiert.

Eines ist aus diesen Berechnungen klar geworden: kein Land kann heute isoliert etwas gegen die enorme Belastung der Atmosphäre mit Schadstoffen unternehmen.

©Österr. Fischereiverband u. Bundesamt f. Wasserwirtschaft, download unter www.zobodat.at

Der Hauptgrund für die derzeitige Situation ist in der gewaltigen Steigerung der Kohle- und Erdölverbrennung zu suchen, die im Jahr 1976 auf der Nordhalbkugel ca. 100 Millionen Tonnen an Schwefel freigesetzt hat, ein Wert, der die biogene Emission um etwa 100% übersteigt.

Dazu kommt eine anthropogene NO_x-Emission von etwa 15 Millionen Tonnen Stickstoff pro Jahr.

Die Freisetzung von Salzsäure durch menschliche Tätigkeit ist für die Säurekonzentration des Regens nicht so bedeutend, kann aber lokal (Müllverbrennung: PVC) von Einfluß sein.

Was macht nun die Azidität des Regens aus?

Vor zwanzig Jahren war es zu ca. 90% die Schwefelsäure, während z. Z. der pH-Wert des Regens zu etwa 60% von der Schwefelsäure und zu 40% von der Salpetersäure bestimmt wird. Das geht darauf zurück, daß in letzter Zeit einige Anstrengungen unternommen wurden, die SO_2-Emissionen zu reduzieren, während die NO_x-Abgabe (Autoverkehr) sowohl in Nordamerika als auch in Europa im Steigen begriffen ist.

Mechanismen der Entstehung starker Säuren in der Atmosphäre

Mit dem Problem der Umwandlung von SO_2 und NO_x und dem Transport dieser Verbindungen hat sich im letzten Jahrzehnt eine steigende Anzahl von Wissenschaftlern beschäftigt.

Die Zusammenhänge sind deshalb so schwierig zu durchschauen, da die Prozesse, die zu einer Oxidation von SO_2 zu SO_3 und H_2SO_4 führen, in starker Wechselwirkung mit der Umwandlung von Stickstoffoxiden stehen und da die Bedeutung vieler Reaktionen noch unsicher ist oder nur in Laborexperimenten mit relativ wenigen Reaktionspartnern untersucht werden kann.

Die Atmosphäre stellt ein oxidierendes System dar, und die Umwandlung von Schwefel- und Stickstoffverbindungen in starke Säuren erfolgt entweder homogen (nur in der Gasphase) oder heterogen (in Tröpfchen oder an Aerosolpartikeln).

Der bedeutendste Faktor für alle diese Reaktionen dürfte das Hydroxylradikal ($OH^{\cdot}$) sein, das photochemisch gebildet wird und in S- und N-Kreisläufe eingreift.

Alle diese Umsetzungen, die als Endergebnis Schwefelsäure bzw. Sulfat und Salpetersäure bzw. Nitrat haben, laufen innerhalb sehr kurzer Zeit ab.

Ein eigenes Kapitel stellt die Immissions- bzw. Depositionsmessung trockener (Gase, Aerosole) und nasser Niederschläge (Regen, Schnee...) dar. Beide Prozesse, die chemische Umwandlung und die Deposition, führen zur Entfernung der Luftverunreinigung aus der Atmosphäre und müssen bei Transportberechnungen berücksichtigt werden. Alle diese Vorgänge spielen sich in der Troposphäre ab, das ist die unterste Schicht der Atmosphäre, die eine mittlere Höhe von etwa 10 km erreicht.

2. Auswirkungen der Niederschlagsversauerung

Sehr viel schwieriger zu beschreiben sind die Wechselwirkungen zwischen Luftschadstoffen und Gewässern, Böden, Vegetation.

Bevor die Säuren aus Niederschlägen in einen See oder ein Fließgewässer gelangen – abgesehen von dem meist geringen Teil des direkt einfallenden Niederschlags –, geht eine Reaktion mit dem Gestein, den Böden und der Vegetation voraus (siehe Abbildung 3). Wir haben hier an mehrere Mechanismen zu denken, wie z. B. den Ionenaustausch zwischen Bodenpartikeln und eindringendem Regenwasser, der kurzfristig eine Pufferwirkung ausüben kann.

Die Verwitterung von basischen Gesteinen (Karbonate, Silikate) spielt eine bedeutende

©Österr. Fischereiverband u. Bundesamt f. Wasserwirtschaft, download unter www.zobodat.at

Rolle für die Azidität des Oberflächen- und Grundwassers. Die Pufferwirkung der Metallhydroxide kommt zum Tragen, wenn die vorgeschalteten Puffersysteme des Bodens (Kalk, Silikat) erschöpft sind. Das führt allerdings zu einem Anstieg der Konzentration an Metallionen wie Al, Fe, Pb, Cd, Zn, Cu. Die Vegetation, und hier ist vor allem der Wald gemeint, und die Bodenorganismen können zu einer Verminderung, aber auch zu einer Erhöhung des H^+-Ioneneintrags in die Gewässer führen. Ist die Neutralisationskapazität des Einzugsgebietes erschöpft, kann die Alkalinität des Seewassers noch eine gewisse Pufferwirkung ausüben (vgl. Abbildung 3), bei weichen Wässern erschöpft sich diese Pufferwirkung jedoch in kurzer Zeit.

Wichtige Zusammenhänge zwischen der Versauerung von Seen und den Veränderungen im Einzugsgebiet sind in Abbildung 2 zu sehen.

Die Erfahrungen aus Norwegen weisen darauf hin, daß die erhöhte Azidität der Zuflüsse nicht nur von den Niederschlägen, sondern auch von Veränderungen im Einzugsgebiet abhängen können (wie z. B. Übergang von Weidewirtschaft zu Waldwirtschaft).

Die durch die Versauerung verstärkte Auswaschung von Eisen- und Aluminiumionen aus dem Einzugsgebiet in den See bewirkt erhöhte Sedimentation und Sorption von Phosphor, d. h. der See versauert und oligotrophiert zugleich, was sich in geringeren Primärproduktionsraten und niedrigeren Umsatzraten auswirkt.

Eine Folge davon ist, daß Reduktionsvorgänge (hierzu gehört die Umwandlung von Schwefelsäure in Schwefelwasserstoff, was einen Abbau von Azidität bedeuten würde) in ihrer Intensität zurückgehen.

Wir haben es hier also mit einem Prozeß zu tun, der sich seeintern aufschaukeln kann, so daß die primäre Versauerung durch Zuflüsse einen weiteren Versauerungsschub auslöst.

Ein ähnlicher Mechanismus wurde auch in Waldökosystemen beobachtet: erhöhter Säureeintrag von außen führt zu einer vermehrten internen Säureproduktion.

Auf die Problematik des Waldsterbens soll hier nicht näher eingegangen werden, der Wald stellt jedoch ein wichtiges Zwischenglied für die Versauerung von Seen dar. Beim Waldsterben sind unter anderem folgende Mechanismen zu bedenken:

- Direkte toxische Wirkung von starken Säuren auf Blätter und Spaltöffnungen; direkte Auswaschung von Nährstoffen aus Blättern und Nadeln.
- Veränderung des Boden-pH's, Auswaschung von Nährstoffen aus dem Boden (Ca, Mg), Schädigung der Bodenorganismen, Akkumulation von Rohhumus (Auseinanderklaffen von Aufbau und Zersetzung), Anreicherung von Schwermetallen in der Bodenlösung und Biomasse, Schadwirkung von Aluminium-Ionen auf das Feinwurzelsystem.
- Einwirkung anderer, gasförmiger Luftverunreinigungen (Fluor, SO_2, Ozon . . .)

Auch wenn einzelne dieser Erscheinungen nicht zu einem direkten Sterben des Baumes führen, so wird der Bestand doch anfälliger gegen Trockenheit, Schädlinge, Windwurf usw.

Das heißt, die durch Luftverschmutzung und sauren Regen geschädigten Bäume fallen leichter der Dürre, Parasiten oder Stürmen zum Opfer.

Auswirkungen auf wasserlebende Organismen

Eine pH-Absenkung führt in Seen und Flüssen ganz allgemein zu einer Artenverarmung auf allen Niveaus: Phytoplankton, Zooplankton, Bodenorganismen, Fische.

Ein massenhafter Anstieg ist nur bei sehr wenigen Arten beobachtet worden, die erhöhte Toleranz gegenüber niedrigeren pH-Werten aufweisen und aufgrund fehlender Beweidung ungehemmt wachsen, wie z. B. *Mougeotia,* eine fadenförmige Bodenalge. Moose wie *Sphagnum* überziehen ebenfalls weite Bereiche versauerter Seen.

©Österr. Fischereiverband u. Bundesamt f. Wasserwirtschaft, download unter www.zobodat.at

Beim Zooplankton ist ein rasches Verschwinden von Cladoceren wie *Daphnia* beobachtet worden, das bei pH-Werten unter 5.5 einsetzt. Das hängt nicht nur damit zusammen, daß bestimmte Arten niedrigere pH-Werte nicht tolerieren, sondern auch damit, daß durch das Verschwinden der Fische ein Wechsel im Räuber-Beute-System eintritt. In den meisten versauerten Seen nehmen Mückenlarven wie z. B. *Chaoborus* die Stelle von Fischen ein, auch Corixiden können ihren litoralen Lebensraum verlassen und das Zooplankton des offenen Wassers reduzieren.

In Flüssen ist die Eintagsfliege *Baetis rhodani,* die in reinen Fließgewässern vorkommt, meist schon bei pH-Werten unter 6.0 verschwunden. Sie kann nur wenige Tage bei pH-Werten zwischen 4.5 und 4.7 überleben.

Speziell empfindlich gegenüber pH-Absenkungen unter 5.5 bis 6.0 ist *Gammarus lacustris,* eine Reihe von Süßwasserschnecken und Muscheln wie *Pisidium.*

Aber auch Oligochaeten und Chironomiden gehen in ihrer Artenzahl und Biomasse stark zurück. Ihre Stelle nehmen oft Corixiden (Wasserwanzen), Gyriniden (Taumelkäfer) und *Sialis* (Schlammfliege) ein.

Das heißt also, daß bereits pH-Verschiebungen geringen Ausmaßes eine gewaltige Artenverarmung und eine stark verminderte Produktivität der Gewässer auslöst.

Am schwersten sind allerdings die Fische betroffen. Bereits bei pH-Werten unter 6.0 bleiben Lachse aus, wie die Erfahrungen aus Schweden und Norwegen seit langem zeigen. Jene Tiere, die als erste auf niedrige pH-Werte reagieren sind allerdings Krebse *(Astacus astacus),* Muscheln und Schnecken. Hier konnten Stoffwechselstörungen bereits bei pH 6.5 festgestellt werden. Die Tiere bilden dann nur dünnhäutige oder überhaupt keine Panzer mehr aus. Ab pH 6.0 verschwinden neben Lachs *(Salmo salar)* und Forelle *(Salmo trutta)* auch Rotauge *(Rutilus rutilus)* und Elritze *(Phoxinus phoxinus).* Unter pH 5.5 – ab diesem pH gilt ein Gewässer als versauert (siehe Kasten) – verschwinden viele Weißfische, ab pH 5.0 stirbt der Barsch *(Perca fluviatilis),* ab pH 4.5 verschwinden auch Aal *(Anguilla anguilla)* und Bachsaibling *(Salvelinus fontinalis).*

Nach dem Verschwinden der Fische dominieren einige pH-tolerante Insektenlarven, die die Stelle als »top predators« einnehmen.

In Gewässern unterhalb pH 5 gibt es kein »normales« Leben mehr.

Saure Gewässer haben mehrere Wirkungen auf den Fischbestand:

- der Elektrolytstoffwechsel kommt durcheinander
- Aluminium und Schwermetalle wirken giftig
- viele Futterorganismen verschwinden.

Der primäre Grund für das Fischsterben in versauerten Gewässern ist im Versagen der Salzregulation des Körpers zu suchen. Ein typisches Symptom ist die verringerte Salzkonzentration des Blutes von Fischen, die einem Säurestreß ausgesetzt werden.

Allerdings spielen nicht nur die Protonen-Aktivitäten eine Rolle, sondern auch die Konzentrationen an Ca-Ionen, die niedrigen pH-Werten entgegenwirken.

Der kritische pH-Wert für bestimmte Arten schwankt, wenn man Literaturdaten vergleicht, um mehr als eine Einheit, ein Zeichen dafür, daß neben dem pH-Wert auch andere toxische Komponenten von Bedeutung sind. Als wichtigste ist Aluminium zu nennen. Aluminium ist dann besonders giftig, wenn es als freies Al-Ion oder als Hydroxid vorkommt, während durch organische Substanzen (Humus) komplexiertes Aluminium nicht so giftig wirkt. Die Giftwirkung von Aluminium scheint in einer kombinierten Wirkung von Ionenmangel bei geringen Salzkonzentrationen im Blut und Atemnot durch das Verlegen der Kiemen zu bestehen, was zu niedrigen Sauerstoffkonzentrationen im Blut führt. Bei pH-Werten knapp über 5 kommt es zu einer Ausfällung von Aluminiumhydroxid auf den Kiemen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, daß auch eine

©Österr. Fischereiverband u. Bundesamt f. Wasserwirtschaft, download unter www.zobodat.at

sehr kurzfristige pH-Absenkung bzw. Erhöhung der Aluminiumkonzentration, wie sie z. B. während der Schneeschmelze beobachtet wird, zu verheerenden Auswirkungen auf die Fischfauna führt.

Diese Erkenntnisse stammen aus Untersuchungen, die seit den 50er Jahren in Skandinavien und seit den 70er Jahren in Nordamerika durchgeführt wurden.

Allein in Schweden sind tausende Seen versauert und die meisten davon fischlos.

Die Versauerung von Seen wurde als rezentes Phänomen in den letzten Jahren auch in Deutschland beobachtet, in Österreich gibt es dazu nur wenige Untersuchungen.

Besonders empfindlich reagieren Hochgebirgsseen in silikatreichem Gestein, das wegen seiner geringen Verwitterungsrate nur sehr wenig Pufferkapazität besitzt.

In Tirol gibt es bereits einige versauerte Hochgebirgsseen, ähnliche Ergebnisse stammen aus der Schweiz und Oberitalien.

In welchem Ausmaß die ökologischen Beziehungen in diesen Seen, die Produktivität tiefer liegender Gewässer bzw. des Grundwassers beeinträchtigt ist, weiß man bisher noch nicht.

Wie gefährdet ist der Mensch?

Die menschliche Existenz ist nicht nur mittelbar bedroht durch das Verschwinden vieler Tier- und Pflanzenarten, durch die Ausrottung von Wäldern und verringerte Ernten, es gibt bereits direkte Auswirkungen des sauren Regens bzw. der Luftverschmutzung. Sie reichen von Vergiftungen des Trinkwassers durch Schwermetalle bis zum Kindersterben in Gegenden mit hoher Luftverunreinigung. Nebenbei sollte man auch erwähnen, daß in den letzten fünfzig Jahren Kunstwerke (Statuen, Fresken) in einem erschreckend steigenden Maß zerstört werden und auch Bauwerke immer stärker angegriffen werden.

3. Perspektiven

Was ich eingangs als »Störung biogeochemischer Kreisläufe« bezeichnet habe, beschreibt eine Vielfalt von Phänomenen.

In ihrer Summe sind sie als Auswirkungen eines globalen Wahnsinns zu betrachten, hervorgebracht durch eine Wirtschaftsordnung und Denkweise, welche die Folgen ihrer Aktivität (verschmutzte Luft, vergiftetes Wasser, verseuchte Böden) nicht in ihre Kosten-Nutzen-Rechnung einbezieht.

Mit anderen Worten: nicht nur Rohstoffe, Arbeitskraft usw. müssen als Wirtschaftsfaktoren behandelt werden, sondern auch die Luft, das Wasser, der Boden, die Pflanzen und die Tiere.

Die meisten von uns haben bisher an den Primat der Ökonomie geglaubt, wir haben aber einsehen müssen – viele wollen das zwar immer noch nicht –, daß die Ökologie unsere Art von Ökonomie ad absurdum geführt hat. Wir sind heute an dem Punkt, wo allein die materiellen Schäden, die durch diese Produktionsweise angerichtet werden, höher sind als die Kosten für Maßnahmen zu deren Verhütung (intelligente Nutzung von Energie, Rohstoffen und Nahrungsmitteln).

Das heißt jedoch nicht, daß diese Vorsorgemaßnahmen (Energie sinnvoll und sparsam anwenden, effiziente Filteranlagen für Abgase, Verzicht auf bestimmte chemische Produkte, wie Insekten- oder Pflanzengifte, Klärung von Fabrikabwässern, Recycling, soziale Nutzung landwirtschaftlicher Produkte . . .) »billig« sind. Sie würden, wollte man sie generell anwenden, an die Ausgaben für die Rüstung heranreichen.

Zur Behebung der angerichteten Schäden würden Jahrzehnte vergehen, sehr viele sind nicht mehr gutzumachen.

©Österr. Fischereiverband u. Bundesamt f. Wasserwirtschaft, download unter www.zobodat.at

An dieser Stelle werden von Wissenschaftlern, gleich welchen Fachgebietes, meist Prophezeiungen geäußert, die den Wissensbereich der einzelnen Disziplinen bei weitem übersteigen. Daß sich viele dieser Prophezeiungen (wie der Untergang der Welt oder wenigstens des Abendlandes) deshalb nicht erfüllt haben, hat dazu geführt, daß man diesen Ankündigungen nicht mehr allzuviel Glauben schenkt. Ich beschränke mich daher auf einige Feststellungen. Sie sind schlimm genug.

Wichtige Begriffe

pH **Wasserstoffionenkonzentration** bzw. -aktivität (H^+), oder Konzentration freier Säure, Protonenkonzentration. Säuren reagieren mit Wasser unter Bildung von H^+ (Wasserstoffionen, Protonen).
Der pH-Bereich geht von stark sauer (pH 0 = 10^0 Äquivalent oder Gramm H^+ pro Liter = 1 eq/1) bis stark alkalisch (pH 14 = 10^{-14} Äquivalent H^+/1). Der Neutralpunkt liegt bei pH 7.
pH 7 = 10^{-7} Äquivalent H^+/Liter = 0.1 Mikroäquivalent/1 = 0.1 μeq/l
pH 6 = 10^{-6} eq/1 = 1 Mikroäquivalent/Liter = 1 μeq/l
pH 5 = 10 μeq/l
pH 4 = 100 μeq/l
pH 3 = 1000 μeq/l

Alk **Alkalinität,** Säurebindungsvermögen; die Kapazität des Wassers, Wasserstoffionen abzupuffern, d.h. Säuren zu neutralisieren. Angegeben in Mikroäquivalent pro Liter = μeq/l. pH-Werte über 5.6.

A-Aci **Mineralische Azidität,** entspricht der Konzentration freier Säuren; stellt – im Gegensatz zur Alkalinität – das Basenbindungsvermögen des Wassers dar. Angaben in μeq/l. pH-Werte unter pH 5.6.

Versauert ist ein **Gewässer,** wenn es mineralische Azidität enthält, d.h. pH-Werte unter 5.6 aufweist. Eine Gefährdung der Fischfauna ist allerdings bereits bei höheren pH-Werten möglich, aber auch dann, wenn der pH nur für kurze Zeit im Jahr (z.B. während der Schneeschmelze) absinkt, jedoch nur bei Anwesenheit von anorganischem gelösten Aluminium oder anderen toxischen Stoffen.

Gepuffert, d.h. **neutralisiert** wird die in den Niederschlägen enthaltene Säure beim Kontakt mit Gestein, Boden, Wasser durch:
- Verwitterung basischer Mineralien (Karbonat, Silikat)
- Ionenaustausch mit Bodenpartikeln
- Biologische Prozesse (Bodenmikroorganismen, Pflanzen), die allerdings auch **zusätzliche** H^+-Ionen liefern können
- Alkalinität der Gewässer (gering bei weichen Wässern)

Leitfähigkeit (elektrolytische Leitfähigkeit, Conductivity) ist ein Maß für die Konzentration aller Ionen. Sie wird ausgedrückt in Mikrosiemens pro cm bei 20° C = μS_{20}
Destilliertes Wasser: weniger als 1 μS
Reines Regenwasser: weniger als 10 μS
Weiche Wässer weniger als 100 μS

Reines Wasser (dest. W.), das in Kontakt mit der Atmosphäre steht, hat aufgrund des Kohlensäuregehalts der Luft einen pH-Wert von ca. 5.6. Es enthält weder Alkalinität noch mineralische Azidität.

Natürlicher Regen (d.h. anthropogen unbeeinflußter Regen) sollte aufgrund natürlicher Schwefel- und Stickstoffkreisläufe einen mittleren pH-Wert von etwa pH 5 aufweisen, die Bandbreite beträgt etwa 4.5 bis 5.5.

Saurer Regen: durch menschliche Tätigkeit überhöhter Säuregehalt der Niederschläge. In Mitteleuropa beträgt der pH-Wert des Regens pH 4.0 ± 0.3, also zwischen 3.7 und 4.3. Auch in Nordamerika pendeln sich die Werte auf ein Mittel von ca. pH 4 ein. Der Säuregehalt wird hauptsächlich von den starken Säuren H_2SO_4 und HNO_3 bestimmt, der Anteil der Salpetersäure nimmt jedoch ständig zu.

Aerosol ist ein disperses System von in Gas suspendierten festen oder flüssigen Partikeln. Durchmesser zwischen 0.01 und 100 μm.

©Österr. Fischereiverband u. Bundesamt f. Wasserwirtschaft, download unter www.zobodat.at

SO_4^{--} **Sulfat,** Sulfat-Ion. Sulfat entsteht aus der Oxidation von SO_2 (Rauchabgas) unter Anwesenheit von Wasser in der Atmosphäre. Dabei kann Schwefelsäure ($H_2SO_4 \rightarrow 2\,H^+ + SO_4^{--}$), eine starke Säure, oder – bei Anwesenheit von neutralisierenden Substanzen (Kalkstaub, Ammoniak) – ein Sulfatsalz entstehen. Sulfat kann auch aus natürlichen Quellen (H_2S, Meeresspray) stammen.

Cl^- **Chlorid** stammt aus dem Meer oder aus Salzsäure (HCl), die bei der Verbrennung von PVC-Kunststoff entsteht. HCl hat für die Versauerung des Regens nur lokale Bedeutung (Müllverbrennung).

$NO_3^- - N$ **Nitrat-Stickstoff** stammt aus der Oxidation von Stickstoffoxiden (NO_x, Industrie- und Autoabgase) und bildet Salpetersäure (HNO_3), eine starke Säure, die zudem toxisch ist. No_x kann auch aus natürlichen Quellen stammen.

$NH_4^+ - N$ **Ammonium-Stickstoff** stammt aus Industrieabgasen (Ammoniak, NH_3) und aus der Landwirtschaft sowie aus natürlichen Quellen. Ammoniak neutralisiert z.T. die in Niederschlägen enthaltenen starken Säuren H_2SO_4 und HNO_3.

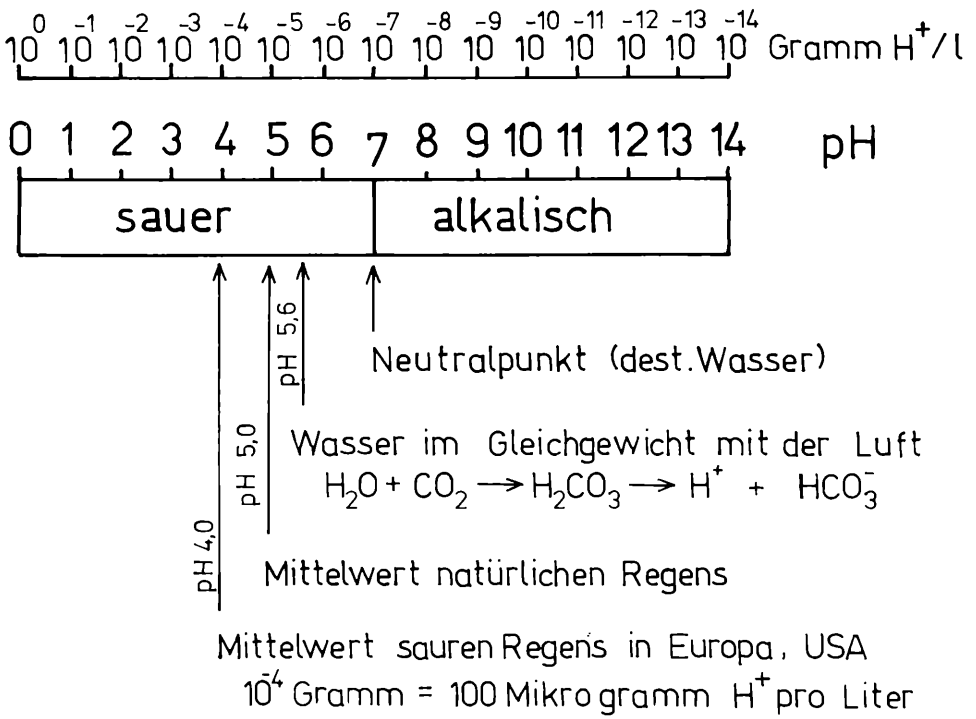

Abb. 1: Der pH-Wert entspricht dem negativen Logarithmus der H^+ – Ionenkonzentration, wobei 1 Mikrogramm pro Liter (µg/l) einem Mikroäquivalent pro Liter (µeq/l) entspricht. Reines Wasser im Gleichgewicht mit der Atmosphäre (CO_2) hat einen pH von 5.6, es enthält weder Alkalinität noch mineralische Azidität. Aufgrund natürlicher Schwefel- und Stickstoffkreisläufe ist ein mittlerer pH-Wert des Regens von 5.0 zu erwarten. Der durchschnittliche pH-Wert des Regens über größten Teilen Europas und Nordamerikas liegt bei 4.0 ± 0.3.

©Österr. Fischereiverband u. Bundesamt f. Wasserwirtschaft, download unter www.zobodat.at

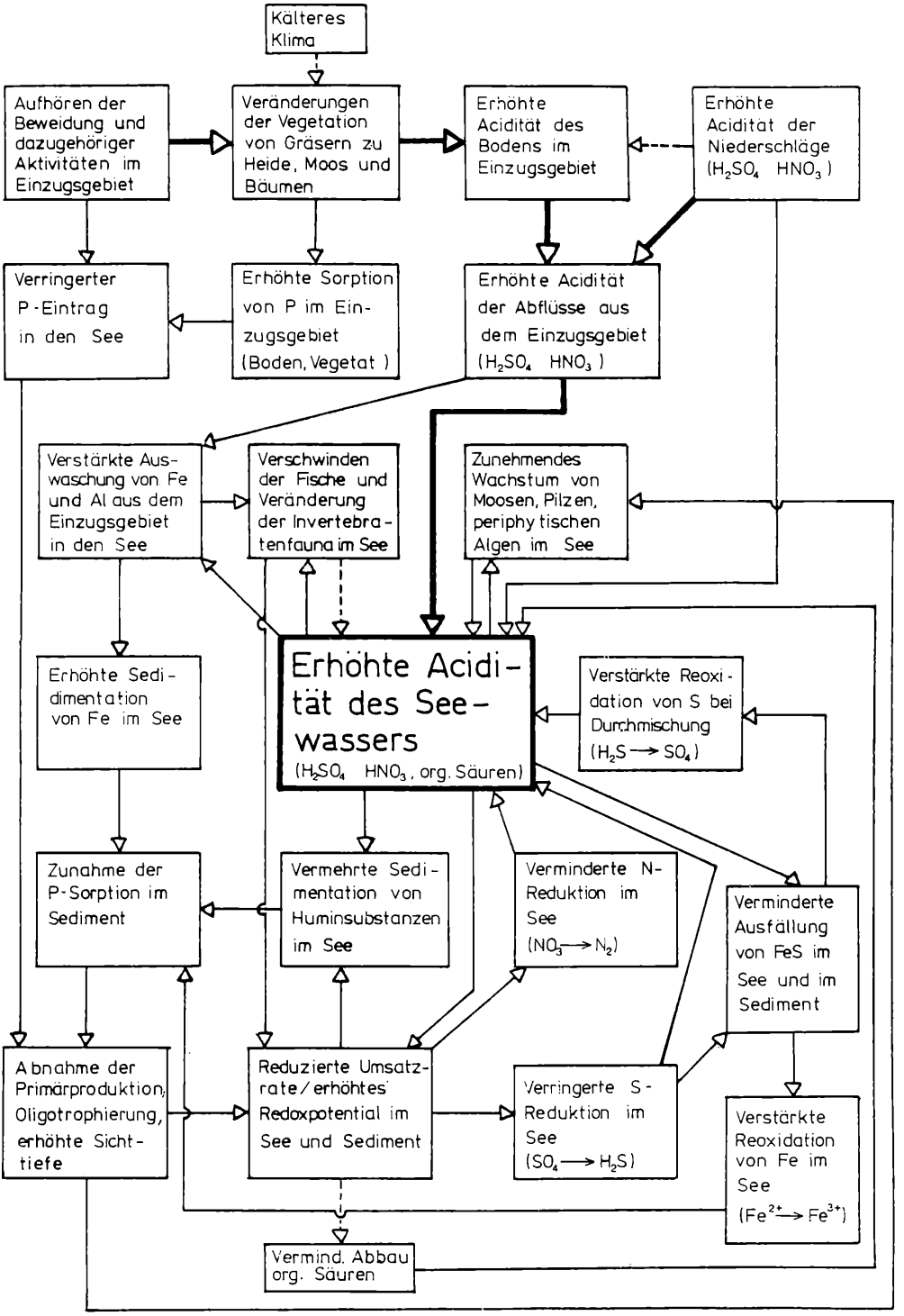

Abb. 2: Wechselwirkungen zwischen der Seenversauerung und Veränderungen im Einzugsgebiet und in der Atmosphäre (nach Grøterud 1983).

©Österr. Fischereiverband u. Bundesamt f. Wasserwirtschaft, download unter www.zobodat.at

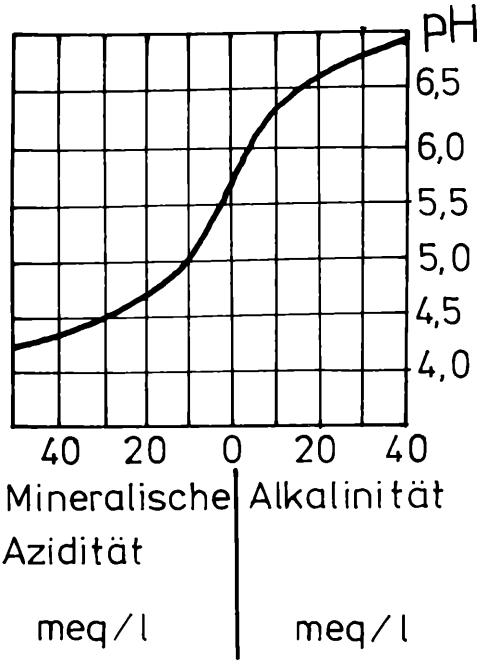

Abb. 3:
In einem wäßrigen System im Gleichgewicht mit dem CO_2 der Atmosphäre gehört zu jeder Alkalinität (Karbonathärte, Säurebindungsvermögen) oder Azidität (Basenneutralisierungskapazität) ein bestimmter pH. Bei pH 5.6 enthält das System weder Alkalinität noch mineralische Azidität.

LITERATUR:

Berger, F., 1984: Wie sauer sind eigentlich Regen und Schnee? Jber. Biol. Stat. Lunz 7: 12p.

Charlson, R. J. & H. Rohde, 1982: Factors controlling the acidity of natural rainwater. Nature 295: 683–685.

Drablos, D. und A. Tollan (Hsg.), 1980: Ecological impact of acid precipitation. Proceedings of an international conference Sandefjord, Norway, March 11–14, 1980: 383 S.

Fabian, P., 1984: Atmosphäre und Umwelt. Chemische Prozesse – menschliche Eingriffe. Springer-Verlag Berlin, 115 S.

Schnoor, J. J., Laura Sigg, W. Stumm & J. Zobrist, 1983: Saure Niederschläge und ihr Einfluß auf die Schweizer Seen. Mitt. d. EAWAG 15 (Februar 1983): 6–14.

Schütt, P. 1983: So stirbt der Wald. Schadbilder und Krankheitsverlauf. BLV Verlagsgesellschaft München, 95 S.

Smidt, S., 1982: Untersuchungen über das Auftreten von Sauren Niederschlägen in österreichischen Waldgebieten. Allgemeine Forstzeitung 216, Informationsdienst Dezember 1982.

Smidt, S., 1984: Analysen von Niederschlagsproben aus Waldgebieten Österreichs. Allgemeine Forstzeitung 221, Informationsdienst Jänner 1984.

Stumm, W., J. J. Morgan und J. L. Schnoor, 1983: Saurer Regen, eine Folge der Störung hydrogeochemischer Kreisläufe. Naturwissenschaften 70: 216–223.

Stumm, W. und G. Righetti, 1982: Tessiner Bergseen: saurer Regen, saure Traufe. Neue Zürcher Zeitung 231 (6. Oktober 1982): 31.

Ulrich, B., 1982: Gefahren für das Waldökosystem durch Saure Niederschläge. Mitteilungen der Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung Nordrhein-Westfalen, Sonderheft 1982: 9–25.

Ulrich, B., R. Mayer und P. K. Khanna, 1979: Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. Schriften der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 58: 291 S.

VDI-RdL, 1983: Säurehaltige Niederschläge – Entstehung und Wirkungen auf terrestrische Ökosysteme. Verein Deutscher Ingenieure, Kommission Reinhaltung der Luft: I–VII, 1–277.

Adresse des Autors:
Dr. Roland Psenner, Abteilung für Limnologie der Universität Innsbruck, Technikerstr. 13, 6020 Innsbruck

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Österreichs Fischerei

Jahr/Year: 1984

Band/Volume: 37

Autor(en)/Author(s): Psenner Roland

Artikel/Article: Saurer Regen - eine Gefahr für unsere Gewässer? 184-194