Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 76 (1985)

Heft: 16

Artikel: Störungen der globalen Kreisläufe als Folge der Energiedissipation

Autor: Stumm, Werner

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904659

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Störungen der globalen Kreisläufe als Folge der Energiedissipation

Werner Stumm

Der Beitrag zeigt auf, dass es verschiedene Kreislaufprozesse auf der Erde gibt, bei denen der Mensch nicht mehr bloss physiologischer Teilnehmer, sondern zum beherrschenden geochemischen Manipulator geworden ist. Dies gilt beispielsweise für den Schwefelkreislauf, der etwa zur Hälfte durch die zivilisatorische Tätigkeit bestimmt wird. Während früher Verunreinigungen eher ein lokales Problem waren, werden die Konsequenzen heute immer weiträumiger spürbar. Auf längere Sicht könnte sich daher eine vermehrte Anpassung der ökonomischen und sozialen Systeme an die ökologischen Randbedingungen als notwendig erweisen.

L'article met en évidence que pour divers cycles existant sur terre, l'homme n'est plus uniquement un participant physiologique, mais bien au contraire un manipulateur dominant la géochimie. Ceci vaut par exemple pour le cycle du soufre dont près de la moitié est due à la civilisation. Alors qu'autrefois, la pollution était un problème plutôt local, les conséquences en sont ressenties de nos jours à une échelle tourjours plus grande. Une adaptation accrue des systèmes économiques et sociaux aux conditions marginales écologiques pourrait donc, à longue échéance, se révéler nécessaire.

Leicht gekürzte Niederschrift eines Referates, gehalten anlässlich einer Tagung des Forums Wissenschaft und Energie über langfristige Risiken verschiedener Energieumwandlungsprozesse am 14. Juni 1985 an der ETH Zürich (vom Autor nicht durchgesehen).

Adresse des Autors

Prof. Dr. *Werner Stumm*, Eidg. Technische Hochschule Zürich und Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), 8600 Dübendorf

1. Das Schauspiel der Evolution

Der Geologe E. Hutchinson hat vor mehreren Jahren ein Buch geschrieben mit dem imposanten Titel «The ecological theatre and the evolutionary play», also das ökologische Theater und das Drama der Evolution. Dieses ökologische Theater spielt sich ab in der dynamischen Wechselwirkung zwischen den Organismen, den Pflanzen und den Kreisläufen des Wassers an unserer Erdoberfläche. Es spielt sich ab seit Milliarden von Jahren, und unser Planet ist von einer ursprünglich anoxischen Umwelt sukzessive zu einem höheren Redoxpotential gelangt. Wichtige Marksteine der Evolution waren die Bildung von Sauerstoff, die Entwicklung der Photosynthese, die Bedeckung der Erdoberfläche mit einer dünnen Schicht von Vegetation (diese Schicht beträgt heute im Durchschnitt nur etwa ½ g pro cm^2) sowie die Entstehung der Lebewesen.

Man kann, wenn man will, die heute ablaufenden Prozesse als stark vereinfachte Gleichungen darstellen. Trotz der grossen Vereinfachungen vermitteln diese Gleichungen einige wesentliche Einsichten auf die Frage, bis zu welchem Masse der Mensch in der Lage ist, in die globalen Kreisläufe einzugreifen.

Der Mensch, schon der Urmensch, hat immer in seine Umwelt eingegriffen. Er musste ein wenig die Ordnung der Natur stören, um eine eigene Kultur aufzubauen. Aber im Laufe der sozialen Evolution ist der Mensch immer mehr vom physiologischen Teilnehmer zum geochemischen Manipulator geworden, und er musste seine Eingriffe in die Natur sehr stark vervielfältigen, um seine Zivilisation, seine Kultur (inkl. Agrikultur) aufzubauen.

Die wichtigste Frage, die man heute stellen kann, lautet daher, inwiefern wir an einer ganz besonders wichtigen Schwelle angelangt sind, an welcher der Mensch genügend stark geworden ist und genügend viel Energie einsetzt, um gewissermassen Prozesse einzuleiten, die zum Teil von einer ähnlichen Grössenordnung sind wie die Prozesse der Natur, Prozesse also, die zum Teil wirklich unsere Umwelt beherrschen.

2. Globale Prozesse

An einem stark vereinfachten Modell soll zunächst versucht werden, die wichtigsten Prozesse aufzuzeigen, die an diesen Reaktionen beteiligt sind. In Figur 1 sind die in den Sedimenten der Erdkruste vorhandenen Reservoire von Kalk, Silikat, Magnesiumsilikat, Eisensilikat, Eisenoxiden, Kalziumsulfat und Kalziumsilikat dargestellt, ferner Sauerstoff, ein kleiner Punkt nur, sowie als noch kleinerer Punkt das Kohlendioxid. Diese verschiedenen Reservoire stehen in einem dauernden Wechselspiel. Die Grösse der Kreise ist proportional zur Grösse der Reservoire; so liegt beispielsweise das Reservoir des SiO_2, das ist gewissermassen der Sand und der Anteil an Aluminiumsilikaten, in einer Grössenordnung von $220 \cdot 10^{20}$ Mole, beim Kalziumcarbonat sind es etwa $50 \cdot 10^{20}$ Mole usw.

Es sind ferner die verschiedenen Verzweigungen und Vernetzungen dieser Reservoire untereinander angedeutet: Die eingetragenen Zahlen stellen die Materien-Flüsse in den Reaktionen zwischen den einzelnen Reservoiren dar. Es ist die Aufgabe des Geochemikers und der Ökologen, dieses Beziehungsgefüge aufzustellen und zu quantifizieren.

Vereinfacht kann man sich das Ganze als ein Räderwerk von verzahnten Rädern vorstellen, die ineinandergreifen. Dabei gibt es sehr grosse Räder, welche sich sehr langsam drehen, aber auch sehr kleine Räder, die mit den anderen verzahnt und verknüpft sind und die sich sehr schnell drehen. Die Sedimente in der Erdkruste stellen beispielsweise sehr grosse «Zahnräder» dar, die sich nur sehr langsam drehen; es gibt daneben kleine Rädchen, beispielsweise das Kohlendioxid in der Atmosphäre, die sich sehr schnell drehen und sehr empfindlich reagieren.

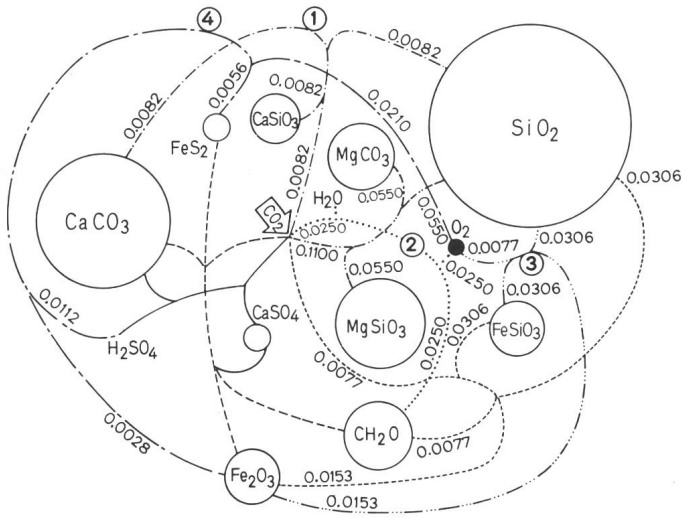


Fig. 1
Globale Kreislaufprozesse des Kohlenstoffs, Schwefels und Sauerstoffs

Alle diese Räder und Rädchen sind miteinander synchronisiert.

Als konkretes Beispiel soll zunächst auf den Kreislauf (1) in Figur 1 näher eingegangen werden, den *Verwitterungskreislauf*. Er geht aus vom CO_2 in der Atmosphäre, das mit dem Kalziumsilikat reagiert und dabei Kalziumcarbonat und ein Silikat bildet. Vereinfacht kann man diese Reaktion in folgender Gleichung darstellen:

Kalziumsilikat + CO_2 →
Kalziumcarbonat + Silikat

Die entsprechenden Massenflüsse sind in Figur 1 eingetragen.

Ein zweiter Kreislauf von grosser Bedeutung ist der Kreislauf (2). Er ist vor allem für den Menschen von Bedeutung, weil wir direkt in diesen Kreislauf involviert sind. Der Mensch ist an allen Kreisläufen involviert, an einzelnen jedoch in einer direkteren Art als an anderen. Dies gilt z.B. für diesen Kreislauf (2), der die *Photosynthese* darstellt. Aus CO_2 und etwas Wasser wird Sauerstoff produziert und organisches Material, welches zu einem guten Teil in die Sedimente gelangt. In Wirklichkeit ist diese Beziehung natürlich etwas komplizierter als hier dargestellt, es gibt Nährstoffe und Düngstoffe, die hier mit im Spiel sind, aber es ist der Kreislauf, an dem wir als aerobe Lebewesen, die auf den Sauerstoff angewiesen sind, am direktesten beteiligt sind. Es sind schliesslich die Pflanzen, die das CO_2 aufnehmen und in der Biomasse inkorporieren.

Aus der vereinfachten Gleichung für diesen Prozess

$CO_2 + H_2O \leftrightarrow$ org. Material + O_2

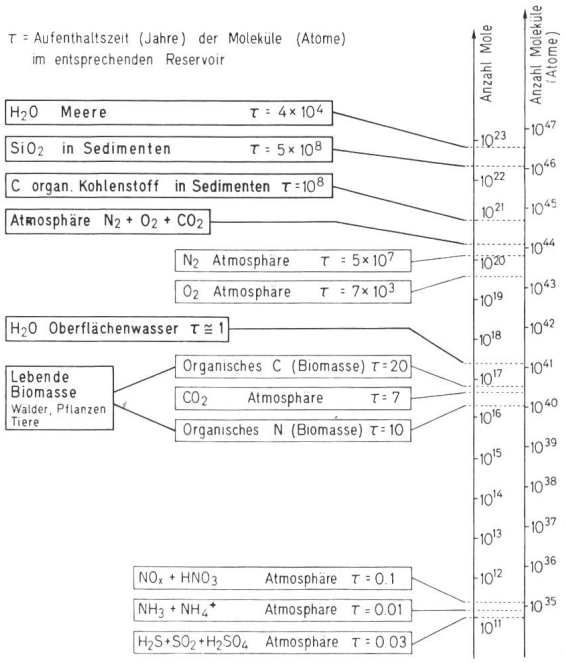
kann man ableiten, dass jedes Molekül CO_2, das photosynthetisiert wird, ein Molekül Sauerstoff und ein Molekül organisches Material bildet, das in die Sedimente eingebunden wird. Man könnte daraus ableiten, dass das Sauerstoffreservoir und das Reservoir an organischem Material gleich gross sind. Aus Figur 1 geht aber hervor, dass dies nicht zutrifft: Das Reservoir an organischem Material in den Sedimenten ist sehr gross im Vergleich zum Sauerstoffreservoir in der Atmosphäre. Ein Teil des Sauerstoffs, der durch die Photosynthese gebildet wurde, hat wieder reagiert, und zwar beispielsweise, wie der Kreislauf (3) in Figur 1 andeutet, mit den Eisensilikaten, und dabei Kieselsäure und Eisenoxid gebildet, oder mit dem Eisensulfid und dabei etwas Schwefelsäure und Eisenoxid gebildet (Kreislauf 4).

In Figur 2 sind die verschiedenen Reservoire nochmals einander gegenübergestellt. Neben ihrer Grösse, ausgedrückt durch die Anzahl Moleküle bzw. Atome oder Mole, ist hier auch die durchschnittliche Aufenthaltszeit der Moleküle (Atome) im entsprechenden Reservoir angegeben. Vom Wasser ist beispielsweise recht genau bekannt, wieviel davon es in den Meeren gibt. Die mittlere Aufenthaltszeit eines Wassermoleküls beträgt 40 000 Jahre. Nachdem es mit dem Fluss in das Meer gelangt, verbleibt es also im Durchschnitt – und dies ist wirklich als durchschnittliche Zahl zu verstehen – während etwa 40 000 Jahren im Meer, bis es wieder verdampft. Ebenfalls ein riesiges Reservoir ist das SiO_2 in den Sedimenten, das eine sehr lange Aufenthaltszeit aufweist, in der Grössenordnung von 100 Millionen Jahren.

Der Kohlenstoff ist einmal durch den Kreislauf der Photosynthese gegangen; der grösste Teil befindet sich in den Sedimenten und bildet dort ein ebenfalls sehr grosses Reservoir mit einer durchschnittlichen Aufenthaltszeit von etwa 100 Millionen Jahren.

Wesentlich kleiner in diesem Vergleich sind die Reservoire der Atmosphäre, des Süsswassers und der lebenden Biomasse, und dies sind die gefährdeten Reservoire. In der Atmosphäre sind Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid in verschiedenen Konzentrationen vorhanden. Die Atmosphäre ist sehr sensitiv und stellt ein ausgezeichnetes «Förderband» für Moleküle dar, die Aufenthaltszeit ist daher zum Teil sehr klein. Der ausserordentlich inerte Stickstoff hat zwar in der Atmosphäre eine Aufenthaltszeit in der Grössenordnung von etwa 10

Fig. 2
Vergleich der globalen Reservoire



Millionen Jahren, aber schon beim Sauerstoffmolekül beträgt die Aufenthaltszeit in der Atmosphäre nur etwa 7000 Jahre. Und beim Kohlendioxid wird die Situation noch kritischer, es ist sehr viel reaktiver: Im Durchschnitt ist ein Kohlendioxidmolekül nur etwa 7 Jahre in der Atmosphäre, bevor es wieder in den Photosynthesekreislauf eintritt.

Nochmals kleinere Reservoire sind das Süsswasser und die lebende Biomasse mit vergleichsweise sehr kurzen Aufenthaltszeiten der Moleküle in der Grössenordnung von Jahren. Bei genauerer Berechnung zeigt sich, dass der grösste Teil der Biomasse in den Wäldern zu finden ist, die Tiere, die Bakterien, die Organismen in den Meeren usw. machen nur einen sehr geringen Teil dieses Reservoirs aus.

Allein aus einem Vergleich der Grössenordnungen zwischen den verschiedenen Reservoiren wird deutlich, dass ein vermehrtes Ausnützen des Reservoirs der fossilen Brennstoffe einen Einfluss auf die empfindlichen Reservoire hat, empfindlich deshalb, weil sie in kleinerer Konzentration vorhanden sind und eine schnellere Reaktionskonstante aufweisen. So kann in einfachen Rechnungen gezeigt werden, dass der organische Kohlenstoff aus den Sedimenten, der freigesetzt wird, einen Einfluss auf den CO_2-Gehalt der Atmosphäre hat. In bezug auf den Stickstoff kann der Mensch die Gesamtzusammensetzung nicht ändern; und dennoch hat er sehr signifikant in den Stickstoffkreislauf eingegriffen, und zwar einfach deshalb, weil heute rund die Hälfte des Stickstoffs, der von der Natur fixiert wird, durch den Menschen fixiert wird, und zwar vor allem durch die Verbrennungsmotoren der Automobile.

Weil nun aber organische Kohlenstoffverbindungen in den Sedimenten auch andere Komponenten enthalten, z.B. Schwefel, so entstehen bei der Verbrennung auch einzelne Schwefelverbindungen, die in die Atmosphäre gelangen können. Bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen, beispielsweise von Benzin in einem Motor, wird zudem eine bestimmte Menge von Stickstoff in Form von Stickoxiden fixiert. Dies führt dazu, dass bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe einzelne Schwefelverbindungen und Stickstoffverbindungen in kleinerer Konzentration in die Atmosphäre eingebaut werden. Die Aufenthaltszeiten dieser Verbindungen sind sehr gering (siehe Fig. 2 unten), sie werden z.T. nach kürzester Zeit wieder ausgeschieden.

Ein weiteres Beispiel ist die Darstellung des globalen Schwefelkreislaufs, der ebenfalls in Figur 1 angedeutet ist. Allerdings sollte man diese Situation nicht nur global betrachten, denn die Schwefeldioxidprobleme fallen ja signifikant regional an. Wenn man die verfügbaren Zahlen nimmt und gewissermassen über die ganze Welt integriert, dann sieht man, dass von den Kontinenten etwa 123 Millionen Tonnen Schwefel in Form von Sulfaten mit den Flüssen in die Meere transportiert werden. Dabei stammt annähernd die Hälfte von der Verwitterung der Gesteine, also der Auflösung von Pyrit, Gips, Kalziumsulfat, ein ganz klein wenig kommt aus den Vulkanen; aber ungefähr die Hälfte kommt aus unserer zivilisatorischen Aktivität. Dies ist also ein Beispiel, das zeigt, dass der Mensch nicht nur regional, sondern global so «stark» geworden ist, dass er ungefähr die Hälfte des Materieflusses des Schwefelkreislaufes bestimmt. Und hier liegt der Kern unserer heutigen Probleme: Die Verunreinigung war früher ein lokales Problem, aber heute werden die Konsequenzen der Energiedissipation auf immer grössere Distanzen fühlbar.

Ein weiterer Vergleich natürlicher und zivilisatorischer Prozesse, der zum Nachdenken anregt, ist die Gegenüberstellung der anthropogenen und biotischen Energieflüsse in Watt pro Quadratmeter Erdoberfläche. Obwohl solche Werte unerhört stark fluktuieren können, kann man für Nordwesteuropa, also auch für die Schweiz, etwa mit einer anthropogenen Energiedissipation von 1 Watt pro Quadratmeter rechnen, während die biotisch fixierte Energiemenge bei etwa 0,2 W/m^2 liegt. Der zivilisatorische Energieflux ist also rund um den Faktor 5 grösser als der biotische Energieflux. Dies bedeutet erstens, dass wir nicht von erneuerbaren Energieressourcen in Form von Biomasse leben können – dies ist kein Vorwurf, sondern eine Feststellung –, und zweitens, dass wir hier wahrscheinlich in die Ökologie eingreifen.

Ein weiteres Beispiel ist die Oxidationsfracht: Man kann auf der einen Seite ermitteln, in welchem Umfang durch die Verbrennung der fossilen Energieträger eine Oxidation vorgenommen wird, und auf der anderen Seite, welche Oxidationsfracht durch die natürlichen Prozesse wie Photosynthese und Respiration in Bewegung

Emissionen in der Schweiz — Tabelle I

Schadstoff	Energieträger	Umgesetzte Energie in 10^{12} Joule pro Jahr	Gesamtemission in Tonnen pro Jahr
SO_2	Heizöl EL, M+S	257 000	54 000
	Kohle	21 000	11 000
	Rohöl (Raffinerie)	166 000	5 000
	Dieselöl	33 000	4 000
	Benzin	121 000	3 000
			Total 80 000 ($1{,}3 \cdot 10^9$ Mole S)
NO_x	Benzin	121 000	100 000
	Dieselöl	33 000	50 000
	Heizöl EL, M+S	257 000	16 000
	Flugtreibstoffe	30 000	5 000
	Gas	41 000	3 000
	Kehricht	16 200	3 000
			Total 180 000 ($4 \cdot 10^9$ Mole N)
HCl	Kehricht	16 200	10 000 ($3 \cdot 10^8$ Mole HCl)
Kohlenwasserstoffe	Benzin	121 000	50 000
	Rohöl (Raffinerie)	166 000	30 000
	Kohle + Dieselöl	50 000	11 000
			Total 90 000
Blei	Benzin	121 000	600
	Kehricht + Kohle	38 000	100
			Total 700 ($3 \cdot 10^6$ Mole Pb)

gesetzt wird. Die Rechnung ist hier etwas schwieriger, aber es zeigt sich erneut, dass die anthropogene Tätigkeit in der gleichen Grössenordnung liegt wie die biologische Tätigkeit.

3. Schadstoffemissionen und ihre Auswirkungen

Tabelle I gibt eine Übersicht über die heute in der Schweiz über die verschiedenen Energieträger umgesetzten Energien und die dabei freigesetzten Emissionen. Die Schwefelbelastung kommt zum grössten Teil von der Verbrennung fossiler Brennstoffe, die Stickoxide in der Schweiz zu 80 bis 90% aus den Automobilmotoren (im Ausland sind die konventionell-thermischen Kraftwerke signifikant an diesen Emissionen beteiligt). Salzsäure stammt überwiegend aus den Kehrichtverbrennungsanlagen. Diese verschiedenen Produkte durchlaufen zum Teil recht vielfältige Reaktionssequenzen. Daneben gibt es höchst interessante Prozesse, bei denen diese Substanzen in Aerosolteilchen, also in Wasser-, Wolken- oder Nebeltröpfchen eingelagert werden. Die einfachste Auswirkung, die sich daraus ergibt, ist die *Genese sauren Regenwassers*.

Nach der Freisetzung der Stickoxide, der Salzsäure, des Schwefeldioxids, der Kohlenwasserstoffe usw. durchlaufen diese Stoffe zum Teil noch verschiedene Umwandlungsprozesse, es finden Transporte und Verfrachtungen über zum Teil sehr weite Strecken statt, es gibt verschiedene Reaktionsgenetiken, z.T. kann es Stunden oder Tage dauern, bis einzelne dieser Verbindungen voll oxidiert sind, bis einzelne Wechselwirkungen zum Spiel kommen. Dies bedeutet Transportwege von einigen hundert bis vielleicht tausend Kilometern. Die Verbindungen, die hier geschaffen werden, können zusammen mit den ursprünglichen Substanzen in ganz verschiedener Art und Weise direkt und indirekt auf die verschiedenen terrestrischen und aquatischen Ökosysteme einwirken.

Es gibt einmal die Möglichkeit, dass Bäume oder Pflanzen direkt Stickoxide oder Schwefeldioxid aus der Atmosphäre aufnehmen. Es gibt ferner die Möglichkeit, dass solche Schadstoffe mittels Nassdeposition (mit dem Regen) oder in Form von Aerosolen usw. an die Oberfläche herangetragen werden. Es besteht sodann die Möglichkeit, dass die Bäume in der Lage sind, die Schadstoffe aus dem Nebel in sehr

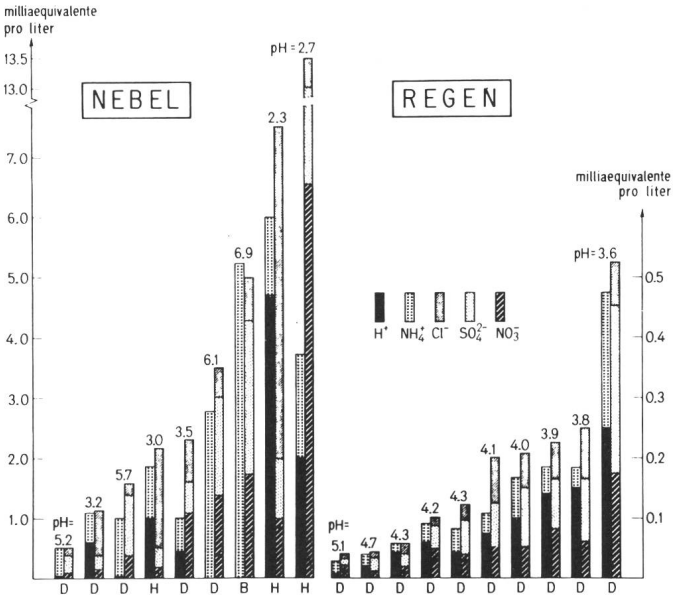


Fig. 3
Konzentration verschiedener Verunreinigungen im Nebel und Regen (verschiedene Messungen an unterschiedlichen Standorten)

konzentrierter Form aufzunehmen, gewissermassen wird also von den Ästen, von den Blättern und Nadeln der Nebel ausgekämmt, und unter dem Einfluss des Sonnenlichtes kann nachträglich eine Konzentration der Schadstoffe stattfinden. Viertens gibt es die Möglichkeit, dass solche Schadstoffe eine Einwirkung auf den Boden haben, dass im Boden durch eine zusätzliche Ansäuerung Basenkationen ausgewaschen werden, dass Schadwirkungen via Wurzeln auftreten können. Und schliesslich gibt es noch die Beeinflussung der aquatischen Ökosysteme.

Figur 3 gibt schliesslich noch ein Beispiel systematischer Messungen in bezug auf die Schadstoffbelastung von Regen und Nebel. Sie soll zeigen, dass sowohl der Regen wie auch der Nebel Träger von grossen Konzentrationen von Schadstoffen sein können. In der Wasserphase des Nebels können die Konzentrationen sogar 10- bis 100mal grösser sein als im Regen. Es gibt auch Nebel, die ausserordentlich sauer sein können, bis hinunter zu einem pH-Wert von 2, also Nebel, in dem man gewissermassen 10^{-2}-molare Salpetersäure oder 10^{-3}-molare Salzsäure vorfindet.

Vielfach wird nun eingewendet, all diese Berechnungen und Überlegungen seien schon recht, aber dies habe es schon immer gegeben, die Situation habe sich nicht verändert. Dem ist entgegenzuhalten, dass es sehr wohl sehr viele klare Beweise dafür gibt, dass sich die Zusammensetzung der Atmosphäre in den letzten 20, 30, 40 oder sogar noch mehr Jahren signifikant verändert hat. Messungen, die diese Veränderungen belegen, sind u.a. die Analyse der Sedimente der Schweizer Seen, von Schneeproben aus Grönland oder auch die Verfolgung der Sichtweite am Flugplatz in Kloten, um nur einige Beispiele zu nennen.

4. Ausblick

Bei der Festlegung von Prioritäten für Umweltschutzmassnahmen stellt sich immer wieder die Frage, ob die Gesundheit des Menschen oder die Gesundheit des Ökosystems im Vordergrund stehen sollte. Bei der Beantwortung dieser Frage sollte man sich im klaren darüber sein, dass die Erhaltung von Ökosystemen mit einer Vielfalt von Organismen eine wichtige Voraussetzung für das Wohlergehen des Menschen bildet. In der lebenden Natur gibt es unzählige Regelkreise. Der Mensch, der auch ein Bestandteil des Ökosystems ist, ist für sein Überleben auf das optimale Funktionieren dieser die Umwelt regulierenden Regelkreise angewiesen.

Zum Schluss noch ein Wort zur Technik. Wir bleiben auch in Zukunft auf die Technik angewiesen, um zu versuchen, unsere Zivilisation und Kultur zu erhalten und weiter zu entwickeln. Wir dürfen aber nicht Sklaven unserer technischen Entwicklung werden. Die politische Gesellschaft muss mit Hilfe von systemischen Evaluationsverfahren unter Berücksichtigung der komplexen Wechselwirkungen entscheiden, welche Entwicklung wünschbar ist und welche vermieden werden muss. Es ist durchaus möglich, dass wir im Laufe der nächsten Jahrzehnte gewisse ökonomische und soziale Systeme in einem vermehrten Mass den ökologischen Randbedingungen anpassen müssen.