

# Die Bedeutung und die Problematik der schwer abbaubaren Stoffe für die Umwelt

WERNER STUMM, Zürich

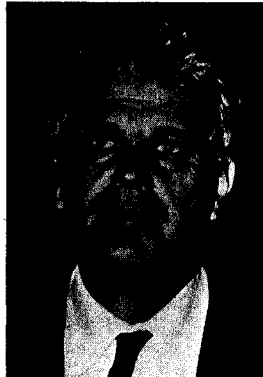
## EINLEITUNG

Letzthin stand in einer Zürcher Tageszeitung: «Wir alle leben in Seveso.» Dieser Satz hat eine gewisse Berechtigung, denn der Fall Seveso hat uns wieder einmal gezeigt, dass wir einerseits alle auf die chemische Technik angewiesen sind, dass aber die chemische Technik den Menschen gefährdet. Wir haben in diesem Fall auch gelernt, dass es extrem giftige Verbindungen gibt, die in Grössenordnungen von 1 Mikrogramm pro Kilo akut toxische Verbindungen hervorrufen können, und dass bei tausend- bis zehntausendmal kleineren Konzentrationen immer noch chronisch toxische Wirkungen hervorgerufen werden können. Ebenfalls haben wir gesehen, dass es nicht einfach für jedes Gift ein Gegengift gibt, und dass es nicht einfach ist, eine verseuchte Umwelt wieder zu reinigen.

Vielleicht könnten wir auch sagen: «Wir alle leben in New Orleans.» New Orleans ist eine grössere Stadt am Mississippi River. Vor wenigen Jahren wurden im Trinkwasser von New Orleans zahlreiche organische Chlorverbindungen gefunden. Eine ausführliche Statistik, die erst kürzlich abgeschlossen wurde, hat nun gezeigt, dass diejenigen Einwohner in der Umgebung von New Orleans (ca. 1/3 von 3 1/2 Millionen Einwohnern), die aufbereitetes Mississippi-Wasser trinken, eine höhere Sterblichkeit an Krebs aufweisen als die Einwohner, die Grund- oder Quellwasser trinken. Wie kürzlich im Science (T. Page et al., Science 193, 55 (1976)) publiziert wurde, ist die Korrelation signifikant (was noch keineswegs einen kausalen Zusammenhang aufzeigen muss) und kann nicht durch andere Faktoren (Einkommensgruppe, städtische oder nichtstädtische Verhältnisse, Beruf usw.) erklärt werden.

### Refraktäre Substanzen

Zehntausende von organischen Verbindungen mit einer globalen Produktionshöhe von 100 bis 200 Mio. t/Jahr werden heute synthetisiert. Viele dieser Verbindungen sind biologisch schwer abbaubar; wir bezeichnen einem Vorschlag von *Wuhrmann* entsprechend diejenigen Verbindungen als refraktär, die in einem aeroben Wassersystem eine Halbwertszeit von mehr als zwei Tagen haben. Bei der Trinkwassergewinnung haben sich viele der xenobiotischen Substanzen als hygienisch bedenklich und gesundheitsschädigend erwiesen. Wir verzichten aber darauf, hier akut-toxische oder humantoxische Effekte solcher Substanzen zu diskutieren. Wir verweisen diesbezüglich auf die erst kürzlich erschienene Publikation der



Weltgesundheitsorganisation: Health Hazards from New Environmental Pollutants, WHO Techn. Rep. 586 (1976). Ferner hat die amerikanische Umweltschutzbehörde eine Liste von verdächtigen krebserregenden Substanzen im Trinkwasser herausgegeben (EPA, Dezember 1975).

## DIE CHEMISCHE BELASTUNG DER GEWÄSSER DER SCHWEIZ

Die Gewässer Nordwest-Europas gehören zu den am stärksten belasteten Gewässern der Welt. An dieser Belastung sind seit wenigen Jahrzehnten neben den häuslichen Abwässern nun auch Industrie und Landwirtschaft massgeblich beteiligt. Im Einzugsgebiet eines Flusses verhält sich die potentielle Belastung  $Q$  proportional zur Bevölkerungszahl im Einzugsgebiet des Flusses und zum Materiefluss (eine Funktion der volkswirtschaftlichen Produktion, des Güterkonsums oder der Energiedissipation) und umgekehrt proportional zum Abfluss des Flusses (Regenmenge im Einzugsgebiet):

$$Q = \frac{(\text{Einw.}) \cdot \frac{\text{wirtschaftl. Produktion}}{\text{Zeit} \cdot (\text{Einw.})}}{\text{Einzugsgebiet} \cdot \frac{\text{Abfluss (m}^3\text{)}}{\text{Einzugsgebiet (km}^2\text{)} \cdot \text{Zeit}}} (1 - \eta) \quad (1)$$

$\eta$  ist der Wirkungsgrad von Umweltschutzmassnahmen (Recycling, Gewässerschutzmassnahmen usw.).

Wie Tabelle 1 illustriert, weisen die Einzugsgebiete einiger schweizerischer Flüsse im Vergleich mit anderen Flussläufen nicht nur eine grosse *Bevölkerungsdichte* auf, sondern auch eine grosse Anzahl Einwohner bezogen auf die Wasserführung. Die Vorrangstellung in bezug auf die Belastung wird besonders deutlich, wenn wir im Sinne von Gleichung 1 für verschiedene Flüsse das Bruttosozialprodukt im Einzugsgebiet (die wirtschaftliche Produktion, d. h. die Werte der Waren und Dienstleistungen für pri-

Tab. 1 Art der Belastung der schweizerischen Flüsse im Vergleich zu anderen Flüssen (vgl. Gleichung 1). BSP = Bruttosozialprodukt.

	Einwohner pro km <sup>2</sup>	Einwohner pro m <sup>3</sup> /s	BSP \$ pro m <sup>3</sup>
Glatt (Glattfelden)	710	35 000	9,5
Töss (nach Winterthur)	400	18 000	4,9
Aare (Brugg)	170	6 000	1,6
Rhein (Basel)	140	5 000	1,4
Rhein (Mündung)	140	15 000	3,4
Donau	83	10 400	1,1
Ohio	76	5 800	1,3
Mississippi	19	3 300	0,75
Rhone	63	3 700	0,55
Kemijoki (Finnland)	2,5	250	0,03
Alle Flüsse	27	3 000	0,15

vaten und öffentlichen Konsum) zur Wasserführung in Beziehung setzen. Die Energiefreisetzung in der Schweiz übersteigt den biotischen Energiefluss (Photosynthese) um das Vielfache. Besonders schwerwiegend ist die Tatsache, dass mehr als eine Fünftel der *Chemieproduktion* der westlichen Welt im Einzugsgebiet des Rheins liegt. Dieser ist aber mit nur 0,2% an der Wasserführung sämtlicher Flüsse beteiligt.

Dementsprechend ist die Belastung unserer Flüsse durch industrielle Nebenprodukte besonders gross. Viele dieser Chemikalien gelangen auf indirektem Weg (via Haushaltungen, durch landwirtschaftliche Drainage, durch die Atmosphäre) in die Gewässer. Da Selbstreinigungs- und biologische Abwasserreinigungsvorgänge für einzelne dieser industriellen Nebenprodukte wenig effektiv sind, besteht die Gefahr, dass sich in unseren Gewässern zunehmend refraktäre (biologisch schwer abbaubare) Chemikalien ansammeln. Abbildung 1 (cf. Zobrist, EAWAG 1975) gibt die Konzentration an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) für einige Schweizer Flüsse. Abbildung 2 zeigt, wie die Konzentration an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) von der Einwohnerdichte im Einzugsgebiet oder pro Wasserführung abhängt (Zobrist, EAWAG 1975).

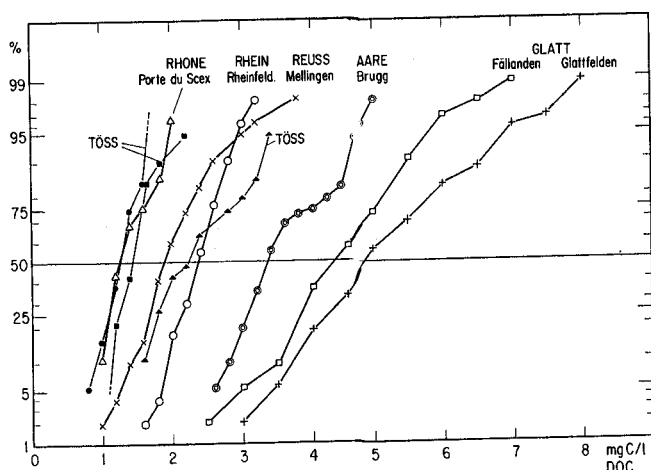
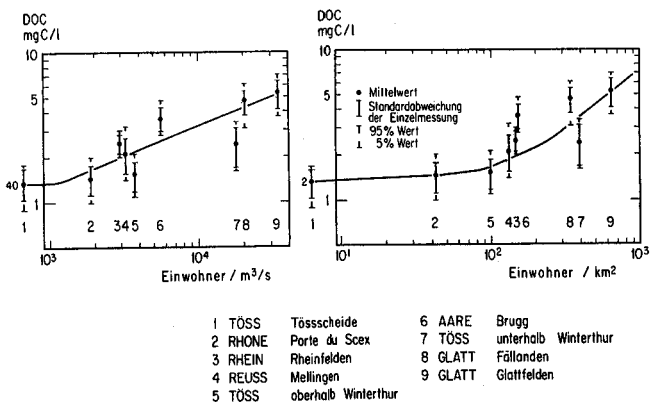


Abb. 1 Summenhäufigkeitsverteilung des DOC.



- 1 TÖSS Tössseide
- 2 RHONE Porle du Scex
- 3 RHEIN Rheinfelden
- 4 REUSS Mellingen
- 5 TÖSS oberhalb Winterthur
- 6 AARE Brugg
- 7 TÖSS unterhalb Winterthur
- 8 GLATT Fällanden
- 9 GLATT Glattfelden

Abb. 2 DOC-Konzentration in Abhängigkeit der Einwohner pro Abflussmenge. DOC-Konzentration in Abhängigkeit der Einwohnerdichte.

## DIE ANTHROPOGENE CHEMISCHE BELASTUNG DER GEWÄSSER

Natürliche Gewässer sind Bestandteile des komplexen globalen Kreislaufsystems. Ein ökologisches System (Ökosystem) können wir definieren als eine Einheit der Umwelt, in welcher eine biologische Gemeinschaft von Produzenten, Konsumenten und Zersetzungsorganismen aufrecht erhalten wird.

Der Gewässerzustand wird durch das Zusammenwirken verschiedenster Faktoren bestimmt. Die Stoffimporte in die Gewässer (Frachten; z. B. Gewicht pro Zeit) bestimmen weitgehend (Verdünnung und allfällige Selbstreinigungseffekte) den chemischen Gewässerzustand, d. h. die Konzentration (z. B. Gewicht pro Volumen) der verschiedenen chemischen Bestandteile (Abb. 3, 4). Sie sind es, welche primär und kausal die Lebensgemeinschaft beeinflussen. Dementsprechend sollte auch primär der chemische Gewässerzustand analytisch erfasst werden.

*Die analytische Chemie* hat in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht. So ist es heute in einem schnellen, billigen und präzisen Verfahren möglich, die Gesamtkonzentration an gelöstem organischem, gebundenem Kohlenstoff zu erfassen. Die moderne Analysetechnik

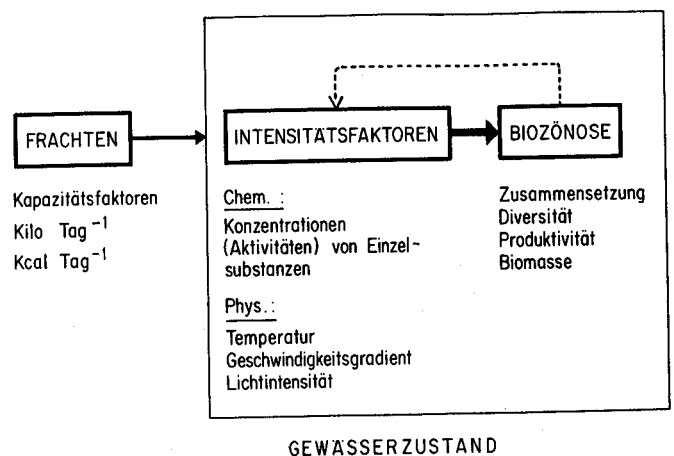


Abb. 3 Gewässerzustand.

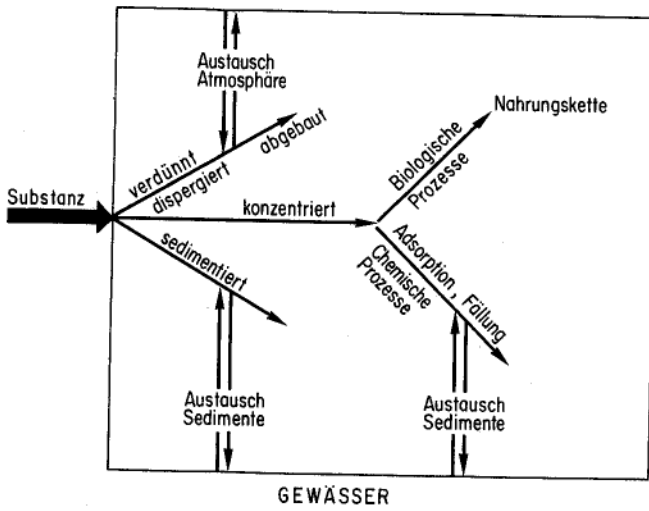


Abb. 4 Die in das Gewässer eingebrachten Substanzen werden durch verschiedene chemische, biologische und physikalische Prozesse modifiziert.

gestattet aber auch die genaue Ermittlung kleinster Mengen von Einzelsubstanzen. Abbildung 5 illustriert die Entwicklung der Analytik in drei Richtungen:

1. Verbesserung der Nachweis-Empfindlichkeit: einzelne Verbindungen können bis hinunter zu Konzentrationen von  $1:10^{13}$  ( $0,0001 \mu\text{g/l}$ ) im Wasser bestimmt werden (Grob 1975).

2. Verbesserung der Bestimmungs-Spezifität; die Umweltreaktion oder die physiologische oder toxische Wirkung beruht auf den strukturspezifischen Eigenschaften der Einzelverbindungen. So ist z. B. Benz-a-pyren kanzerogen, während das isomere Benz-b-pyren nicht kanzerogen ist. Ähnlich hängt die Toxizität der Metalle von der Erscheinungsform (freies Metallion, hydroxo complex, Methylverbindung, Ionenpaar, Chelat usw.) ab.

3. Umweltmässige Beurteilung.

In bezug auf die flüchtigen Stoffe, die wahrscheinlich auch physiologisch, ökologisch und toxikologisch von

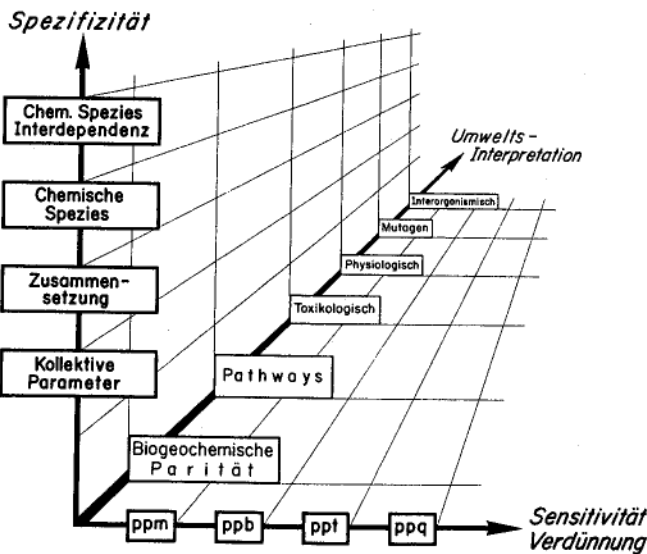


Abb. 5 Entwicklung der Umweltanalytik, Verbesserung der Nachweisempfindlichkeit, der Bestimmungsspezifität und der umweltmässigen Beurteilung.

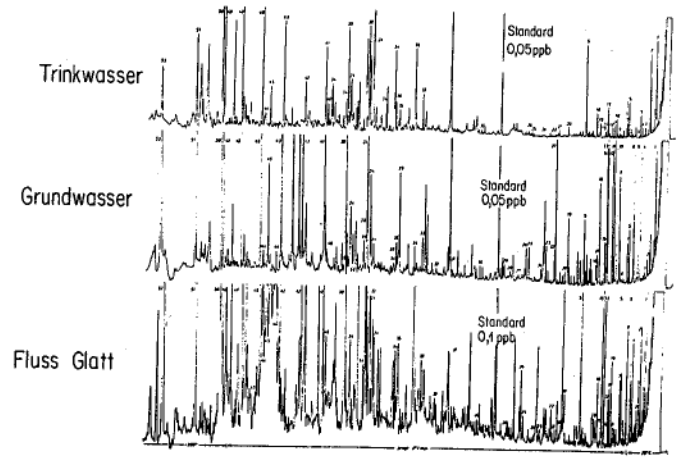


Abb. 6 Nachweis einzelner organischer Verbindungen (nicht-polare flüchtige Substanzen) in der Glatt (Zufluss zum Rhein) in verunreinigtem Grundwasser und in Trinkwasser mit Hilfe von hochauflösender Glaskapillaren-Gaschromatographie. Jeder Peak bedeutet mindestens eine Verbindung. Die mit Nummern versehenen Peaks werden mit Hilfe von Massenspektrometrie identifiziert. Analyse durch Dr. E. Romann, Kantonschemiker Zürich; Aus K. Grob, K. Grob, Jr. and G. Grob, J. Chromatogr. 106, 299 (1975).

grösserer Bedeutung sind als weniger flüchtige polare Substanzen, besitzen wir schon ausgezeichnete Möglichkeiten zur empfindlichen und spezifischen analytischen Erfassung dieser Substanzen (Abb. 6). Es kann sich nicht darum handeln, alle Tausende und Tausende von Verbindungen einzeln zu analysieren, aber solche Untersuchungen in Forschungslaboratorien exemplifizieren das Schicksal einzelner Verbindungen und können zeigen, welche Verbindungen allfälligerweise besonders refraktär oder besonders gefährlich sind.

Auch die im Wasser vorhandenen «harmlosen» Substanzen wie Huminsäure usw. können bei der Chlorung des Wassers zur Bildung der Haloforme (Chlorophorm usw.) führen (Abb. 7).

Die Sicherstellung von Trink- und Brauchwasser und die Erhaltung der Gewässer als Lebenserhaltungssysteme sind die wesentlichsten Zielsetzungen beim Gewässerschutz. Aquatische Ökosysteme reagieren viel empfindlicher als terrestrische Ökosysteme auf chemische Immissionen verschiedenster Art. Das erklärt sich teilweise durch die Unterschiede ihrer Nahrungsketten. Landsysteme sind in der Regel durch eine grosse Biomasse mit wenig trophischen Ebenen, aquatische Systeme durch eine eher kleine Biomasse und häufig durch mehrere «verzweigte» trophische Ebenen charakterisiert. Auf dem Land dominiert die pflanzliche Biomasse, während im Wasser Tier- und Pflanzenbiomasse von ähnlicher Grössenordnung sind. Beim aquatischen Ökosystem wird die Primärproduktion zu einem viel grösseren Teil durch Herbivoren verzehrt als beim terrestrischen System, wo der grösste Teil der pflanzlichen Produktion durch Mikroorganismen zersetzt wird. Die Tendenz zur Akkumulation von wesensfremden und giftigen Substanzen in der Futterkette ist somit viel grösser beim aquatischen als beim terrestrischen System.

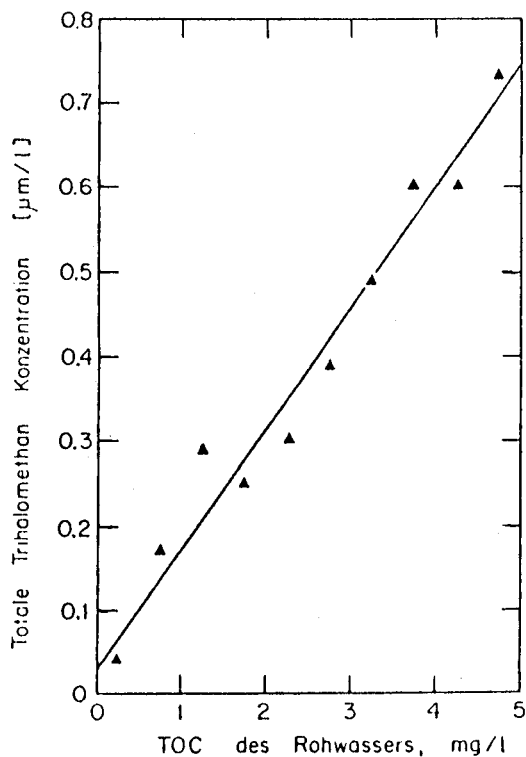


Abb. 7 Die Konzentration der bei der Chlorung gebildeten Trihalomethane vs. totaler organischer Kohlenstoff des Rohwassers (aus Symons et al.).

## DIE BEEINFLUSSUNG DER STRUKTUR DES ÖKO-SYSTEMS

Abbildung 8 gibt ein Beispiel, wie eine Lebensgemeinschaft durch Pollution gestört werden kann, ohne dass akute Effekte beobachtet werden (Patrick et al. 1954). Die Häufigkeitsverteilung von Kieselalgen wird durch die Verunreinigung verschoben. Die Anzahl der Arten, die jede in geringer Häufigkeit (wenig Individuen pro Spezies) vorlagen, wird reduziert, während einige wenige Arten nun mit sehr grosser Häufigkeit vertreten sind. In einem «gesunden» Gewässer sind die Lebensbedingungen so, dass viele Mikrohabitats vorliegen und damit zahlreiche Arten überleben können. Die meisten Arten aber sind infolge der kompetitiven Bedingungen mit geringer Populationsdichte vertreten. Die Pollution vernichtet Mikrohabitats, verkleinert die Überlebenschance eines Teils der Spezies und verringert damit den Wettbewerb; die toleranten Arten verbreiten sich und können ihre Populationsdichte vergrössern.

Diese Art der Verschiebung in der Häufigkeitsverteilung der Arten wird allgemein als Folge von Gewässerbeeinträchtigung, also auch bei Protozoen, Fischen usw. beobachtet; sie exemplifiziert, dass durch die Verunreinigung im aquatischen Ökosystem die diversifizierte Lebenserhaltungsfunktion geschmälert wird.

Obschon das aquatische Ökosystem durch vollständig unterschiedliche Ursachen (Immissionen von abbaubaren oder nichtabbaubaren Abwasserkomponenten, Einwir-

kung von Fremd- oder Giftstoffen, Wärmeschocks usw.) beeinträchtigt werden kann, haben diese verschiedensten anthropogenen Einwirkungen einige gemeinsame Konsequenzen: die Organisation des Ökosystems und die Diversität werden herabgesetzt. Die Struktur des Beziehungsgefüges wird vereinfacht, zum Beispiel durch Ausmerzung einzelner Organismen, entweder durch toxische Effekte oder durch wettbewerbsmässige Verdrängung durch tolerantere Arten, durch Beeinträchtigung von Regelmechanismen (wie etwa durch die Störung chemotaktischer Signale), durch Unterbrechung homöostatischer Mechanismen und durch Beschleunigung der Nährstoffkreisläufe.

## EINIGE SCHLUSSFOLGERUNGEN

1. Alle Substanzen, die in grösseren Mengen in Haushalt und Gewerbe (z. B. Detergentien) gebraucht werden und in die Gewässer gelangen können, müssen biologisch abbaubar sein.
2. Industrielle Abwässer, die refraktäre Stoffe enthalten, sollen nicht den öffentlichen Kläranlagen zur Reinigung überlassen werden. Durch innerbetriebliche Massnahmen und durch die Anwendung gezielter Adsorptionsverfahren können industrielle Abgänge viel besser vom Gewässer ferngehalten werden, als dies nach grösster Verdünnung mit unspezifischen Reinigungsmethoden in der öffentlichen Kläranlage geschehen kann.
3. Die Industrie muss bereit sein, auf die Produktion von wasserbeeinträchtigenden Stoffen (Produkte oder Nebenprodukte), deren Beseitigung nicht oder nur unter hohen sozialen (Umwelts-) Kosten möglich ist, zu verzichten.

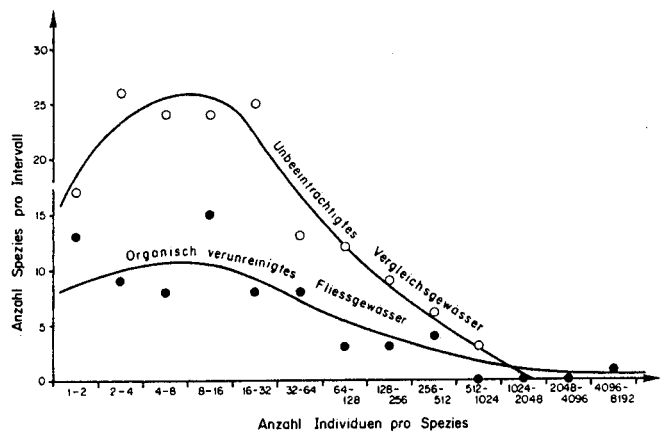


Abb. 8 Verschiebung in der Häufigkeitsverteilung von Kieselalgen durch subtile organische Verunreinigung (aus Patrick et al.).

Adresse des Verfassers:

Dr. Werner Stumm, Professor für Gewässerschutz, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich