

## **Ökotoxikologie am Beispiel der Rheinverschmutzung durch den Chemie-Unfall bei Sandoz in Basel**

Herbert Güttinger und Werner Stumm

Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG),  
CH-8600 Dübendorf

A fire at a chemical manufacturing plant at Schweizerhalle (near Basel) in November 1986 and the subsequent release of toxic agrochemicals into the Rhine river is taken as a basis to discuss some problems and needs in ecotoxicological research. Especially serious is the lack of knowledge about chronic effects of mixtures of chemicals to individuals and whole ecosystems. There is an urgent need for generally applicable principles and concepts. A discussion of the relationship between toxic effects to fish, exposure time, and concentration provides some hints about the direction towards which research should proceed. Finally, eight theses pertaining to ecotoxicology summarize what can be learned from the analysis of a chemical spill.

Ein Forscher bemerkte: „Der Rhein ist zurück von der Intensivstation und wieder im normalen Krankbett.“ Kein Grund zu Beruhigung, man stirbt nicht nur auf Intensivstationen.

Peter Reichenbach (Nebelspalter, Nr. 16, 1988, S. 36)

### **Ökotoxikologie**

Die Ökotoxikologie ist die Lehre von der Schädlichkeit chemischer Stoffe und physikalischer Einwirkungen für lebende Organismen, Populationen und ganze Lebensgemeinschaften. Sie schließt die Untersuchung der Kreisläufe dieser Stoffe sowie ihre Wechselwirkungen mit der Umwelt ein [4]. Mit der Bildung des Begriffes Ökotoxikologie vor mehr als 20 Jahren wurde nicht nur Ökologen und Toxikologen eine gemeinsame Aufgabe gestellt, sondern auch der Schutz von Organismen und ganzen Ökosystemen gegenüber dem ausschließlich auf menschliche Interessen bezogenen Schutzgedanken hervorgehoben.

Es gibt rund 70000 anthropogene Chemikalien im täglichen Gebrauch unserer Industriegesellschaft (insgesamt sind etwa 5 Millionen chemische Substanzen bekannt), ungefähr 1,4 Millionen Tier- und über 400000 Pflanzenarten sind beschrieben (Fig. 1). Sowohl Chemikalien wie auch Lebewesen kommen in einer unermesslichen Vielfalt von zeitlichen und örtlichen Variationen und Kombinationen vor. Die anthropogenen Störungen sind den natürlichen Variationen überlagert und manchmal nur schwer oder überhaupt nicht zu erkennen. Es ist daher schlichtweg unmöglich, auch nur für einen kleinen Teil effektiver und möglicher Schadwirkungen klare Kausalbeziehungen zwischen Ursache und Wirkung herzustellen.

Hervorragende Aufgabe der relativ neuen Gruppierung klassischer wissenschaftlicher Disziplinen unter dem Namen Ökotoxikologie muß es deshalb sein, grundlegende Erkenntnisse und Konzepte herauszuarbeiten, die pragmatische und effiziente Lösungen der verschiedensten Probleme erlauben. Zu diesen Problemen gehört die Bewilligung neuer Stoffe bzw. die Restriktion oder das Verbot anthropogener schädlicher Substanzen. Dazu muß nicht nur die chronische synergistische Wirkung von Einzelsubstanzen und Stoffgemischen in natürlichen Ökosystemen bekannt sein, die Effekte sollten auch bewertet werden können. Die Analyse des Chemie-Unfalls bei Basel soll einige Probleme aufzeigen, wichtige Erkenntnisse herauschälen und Kenntnislücken aufspüren. Ein Versuch also, nicht nur das Feld ökotoxikologischer Forschung abzustecken, sondern auch konkrete Ziele für den Umweltschutz herzuleiten.

Übergeordnete Zielsetzung – und damit Maßstab für die Beurteilung der Relevanz von Aussagen – ist die langfristige Minimierung gesundheitlicher Beeinträch-

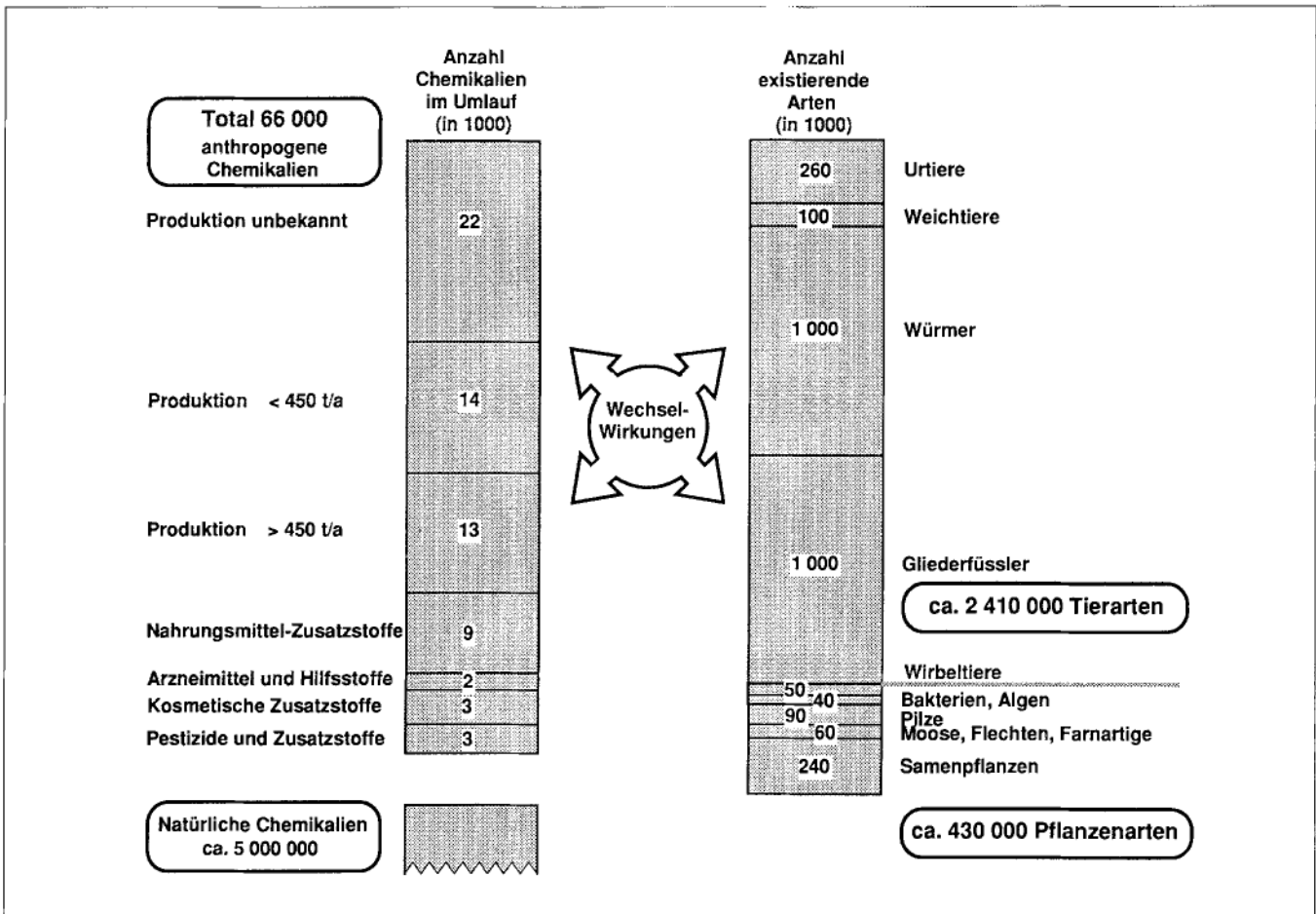


Fig. 1. Geschätzte Anzahl anthropogener und natürlicher Chemikalien [14] sowie weltweit existierender Tier- und Pflanzenarten [12]. In natürlichen Systemen stehen zahlreiche Chemikalien und Organismen miteinander in Wechselwirkung. Zusammen mit der zeit-

lichen und örtlichen Variation ergeben sich daher beinahe unendlich viele Kombinationsmöglichkeiten, und jedes Problem wird zum Spezialfall

tigungen sowohl der Menschen als auch der übrigen Lebewesen. Wo sind die unbedingt einzuhaltenden Grenzen menschlicher Eingriffe in die Natur?

## Der Chemie-Unfall von Schweizerhalle

Beim Brand einer mit Agrochemikalien gefüllten Lagerhalle der Firma Sandoz am 1. 11. 1986 gelangte ein Teil dieser Chemikalien mit dem Löschwasser in den Rhein (Tabelle 1). Die Giftwelle zerstörte auf einer Länge von etwa 400 km die gesamte Aalpopulation (nach [5] ca. 200 000 kg) und schädigte Äschen, Forellen und andere Fischarten sowie deren Nährtiere (*Asellus*, *Hydropsyche*, Chironomidae etc. [2, 18]). Der Verlauf der Schadstoffwelle und die Wirkungen sind in Fig. 2 dargestellt.

Die Welle der Schadstoffe erreichte nach 8 Tagen die holländische Grenze und verteilte sich dort in die Rheinarme, um schließlich in der Nordsee zu enden.

Während des Durchgangs wurden verschiedene Wasserversorgungen präventiv abgeschaltet [17].

Die Medien reagierten heftig auf den Unfall; man sprach von totaler Vernichtung der Rheinfrauna auf Jahrzehnte hinaus. Die sofort aufgenommenen näheren Untersuchungen lieferten ein etwas differenzierteres Bild: Sämtliche Arten wurden kurz nach dem Durchgang der Schmutzwelle wieder gefunden. Die Zerstörung war also nicht total, sondern hatte nur einen Teil der Arten bzw. einen Teil der Populationen erfaßt, was die betroffenen Stellen mit der Schwierigkeit konfrontierte, die Schäden quantifizieren zu müssen.

Der Rhein wird durch die Anliegerstaaten seit vielen Jahren chemisch, physikalisch und biologisch beobachtet, und die Resultate dieser Messungen werden gut dokumentiert [10], und dennoch haben diese Untersuchungen zur Beantwortung der während und nach dem Schweizerhalle-Unfall gestellten Fragen (Tabelle 2) nur wenig beigetragen. In den vorgelegten Untersuchungsberichten werden sie kaum zitiert. Die Messun-

Tabelle 1. In den Rhein eingeleitete Schadstoffe und deren geschätzte Fracht bei Village-Neuf [16]. Gemessene Spitzenkonzentrationen einiger Stoffe bei Village-Neuf und den deutschen Meßstationen [6]. Bei vielen der eingeleiteten Stoffe wurden die effektiven Konzentrationen im Rhein nicht gemessen

Schadstoff	Village-Neuf (km 173)		Maximiliansau (km 362)	Mainz (km 498)	Bad Honnef (km 640)	Lobith (km 862)
	Fracht [kg]	Konz. [ $\mu\text{g/l}$ ]	Konz. [ $\mu\text{g/l}$ ]	Konz. [ $\mu\text{g/l}$ ]	Konz. [ $\mu\text{g/l}$ ]	Konz. [ $\mu\text{g/l}$ ]
Thiomethon	2000 – 3000	500	10,6	8,3	3,5	2
Propethamphos	200 – 300	100	1,1	3,4	1	–
Disulfoton	2200 – 3300	600	24,6	18,3	8,9	5,3
Fenitrothion	1 – 1,5	10	–	–	–	–
Parathion	30 – 45	200	0,4	0,4	0,1	–
Oxadixyl	270 – 405	10	11,5	–	–	–
Etrimphos + Fenitrothion	100 – 150	50	3,1	2,6	1,1	–
Quinalphos (= Ecalux)	50 – 75	–	–	–	–	–
Endosulfan	160 – 240	–	–	–	–	–
Tedion (= Tetradifon)	120 – 180	–	–	–	–	–
Captafol	50 – 75	–	–	–	–	–
Dichlorvos	–	–	–	–	–	–
Total (P-Säure-Ester, ohne Oxadixyl)	5200 – 7800	1450	39,8	33,0	14,6	7,3

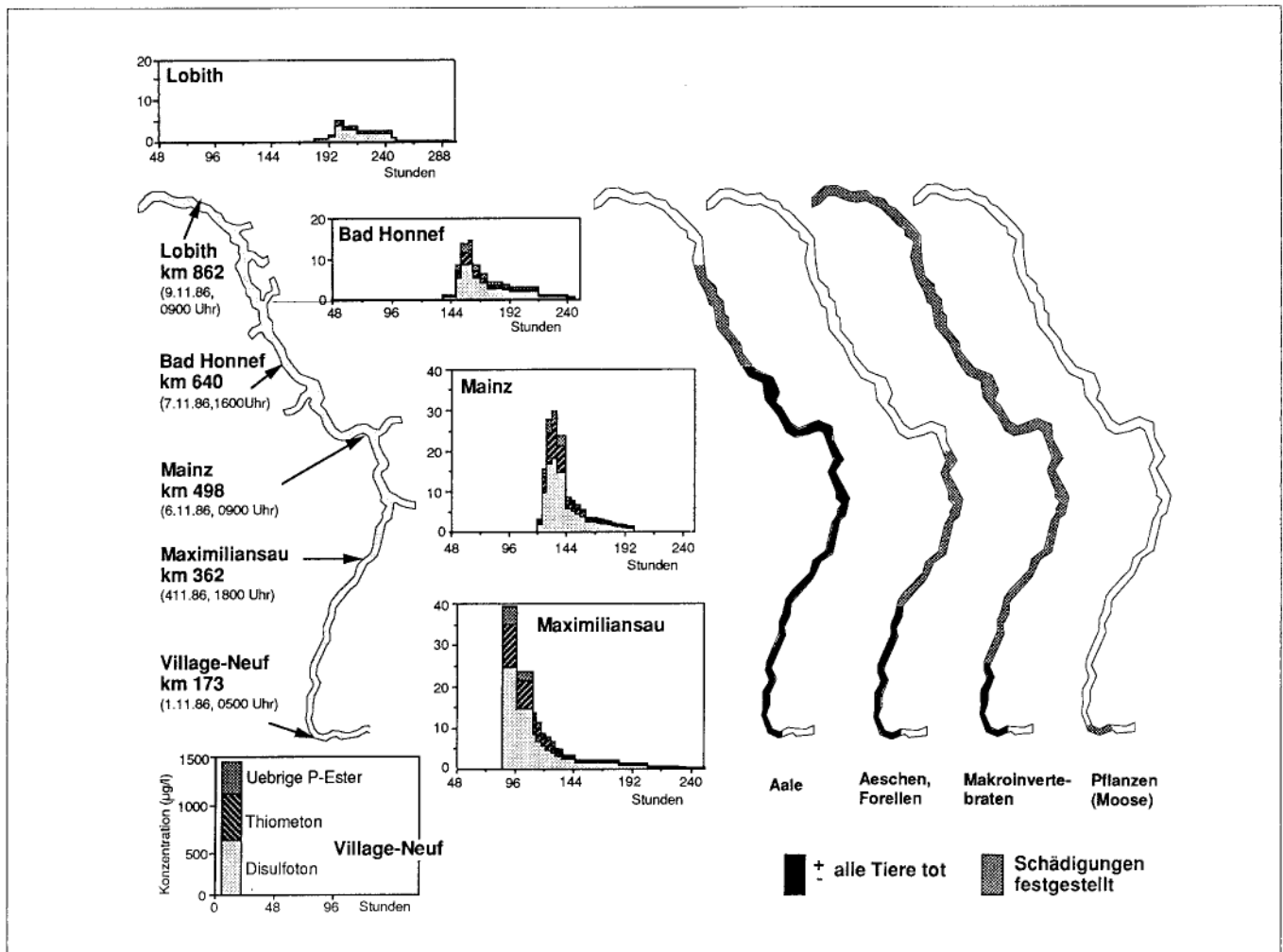


Fig. 2. Fortpflanzung der in der Schadstoffwelle enthaltenen Phosphorsäureester entlang des Rheines bzw. der Zeitachse. Die Schadstoffe wurden mit dem Löschwasser am 1. 11. 1986 ab ca. 01.30 Uhr bei Schweizerhalle eingeleitet. Die Daten geben den ungefähren Zeitpunkt an, an dem die Schadstofffront die Meßstationen erreichte. Die nebenstehenden Darstellungen zeigen die in der Rheinbiozönose hervorgerufenen Schädigungen [6, 9, 15].

gen betreffen vorwiegend konventionelle Parameter, und die biologischen Erhebungen werden nicht quantitativ durchgeführt. Die Registrierung der pH-, Sauerstoff- und Leitfähigkeitswerte zeigte zwar geringe Veränderungen während des Durchganges der Schadstoffwolke [9], wurde aber lediglich zur Feststellung des Zeitpunktes des Eintreffens und der Dauer der Schadstoffwolke verwendet.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Fragen, die während und nach der Katastrophe aufgeworfen wurden. Sie betreffen die akute Störung des Rhein-Ökosystems durch den Unfall von Schweizerhalle, gelten aber generell für Katastrophen. Sie müssen vor dem Hintergrund der chronischen Belastung des Rheines gesehen werden, der sich die akute Verschmutzung überlagert.

## Die Auswirkungen der Verschmutzung

### Chemische Aspekte

Für die Beschreibung der Verteilung von Stoffen in der Umwelt müssen die relevanten chemischen und physikalischen Eigenschaften dieser Stoffe (Tabelle 3) sowie die Struktur (Morphologie, Hydrologie, Chemismus, Biologie etc.) und die wichtigsten Prozesse des empfangenden Ökosystems (Fig. 3) bekannt sein. Um diese Angaben sinnvoll verwerten zu können, müssen aber

Tabelle 2. Fragen, die bei der Bewältigung des Unfalles auftauchen: A) Fragen der ersten Stunde; B) Fragen zur Behebung der Schäden; C) Fragen für die Zukunft

A	1. Welche Stoffe sind in welchen Mengen wann und wo in den Rhein gelangt?
	2. Besteht eine direkte akute Gefährdung für die Menschen?
	3. Besteht eine chronische Gefährdung für die Menschen?
	4. Welche Maßnahmen müssen und können getroffen werden, um diesen Gefährdungen zu begegnen?
	5. Welche Gefährdungen bestehen für die Biozönose?
	6. Welche Stoffe sind in welchen Mengen wann und wo zu erwarten?
B	7. Wie groß ist das Ausmaß des offensichtlichen Schadens?
	8. Wie können die akuten Schäden an der Biozönose bewältigt werden?
	9. Wie lange verbleiben die Stoffe in der Umwelt und wo sind die Senken?
C	10. Welche Folgeschäden sind zu erwarten? Was muß also beobachtet werden, um dies feststellen zu können?
	11. Wie schwerwiegend sind die Schäden? Sind sie irreversibel?
	12. Findet eine Selbsterholung statt oder muß, falls überhaupt möglich, saniert werden? Zu welchem Preis?
	13. Welche Vorkehrungen müssen für die Zukunft getroffen werden?

Tabelle 3. Chemische und physikalische Stoffdaten am Beispiel von Disulfoton [16]. Die Heterogenität dieser Tabelle bezüglich Einheiten und Vollständigkeit der Angaben ist symptomatisch für die Schwierigkeit, rasch relevante Kennzahlen zusammenzustellen. Sie enthält Auszüge aus einem der Berichte zum Unfall

Name	Disulfoton (ISO and BSI)
Chemische Bezeichnung	O,O-Diethyl-S-(3-thiapentyl)-dithiophosphat
Handelsname	Disyston
Hersteller und Vertriebsfirma	Farbenfabrik Bayer AG, Leverkusen
Wirkungstyp	Systemisch wirkendes Insektizid und Akarizid, Cholinesterase-Hemmstoff
Chemische Formel	$\begin{array}{c} \text{C}_2\text{H}_5\text{O} \\ \diagdown \\ \text{P-S-CH}_2\text{-CH}_2\text{-S-C}_2\text{-H}_5 \\ \diagup \\ \text{C}_2\text{H}_5\text{O} \\ \parallel \\ \text{S} \end{array}$
	$\text{C}_8\text{H}_{19}\text{O}_2\text{PS}_3$ Molekulargew. 274,42
Physikalische Beschaffenheit	Farbloses Öl (rein)
Schmelzpunkt	Nicht bekannt
Siedepunkt <sup>1</sup>	128 °C bei 1 Torr; 62 °C bei 0,01 Torr
Dampfdruck <sup>1</sup>	$1,8 \cdot 10^{-4}$ Torr bei 20 °C $5,2 \cdot 10^{-4}$ Torr bei 30 °C $14,0 \cdot 10^{-4}$ Torr bei 40 °C $3,0 \cdot 10^{-5}$ Torr bei 25 °C, GC
n-Octanol-Wasser-Verteilungskoeffizient <sup>2</sup>	6460 (Kenaga 1980) 11 300 (22 °C, Sandoz)
Henry-Verteilungskoeffizient <sup>1,3</sup>	$2,6 \cdot 10^{-6}$ atm·m <sup>3</sup> /mol
Dichte <sup>4</sup>	$d_4^{20}$ 1,144
Stabilität <sup>5</sup>	In Lösung relativ stabil. Langsame Hydrolyse in wäßrigem, saurem und alkalischem Medium
Korrosives Verhalten	Nicht bekannt
Löslichkeit <sup>6</sup>	In Wasser 25 mg/l bei 20 °C. Leicht löslich in den gebräuchlichen organischen Lösungsmitteln
Gebräuchliche Anwendungsform	Granulat (5 %)
Verträglichkeit mit anderen Mitteln	Mischungen nicht gebräuchlich
Analytische Methoden: Makro	Hydrolyse durch Kochen mit alkoholischer Kalilauge und Rücktitration der nicht verbrauchten Lauge. Oder infrarotspektrophotometrische Bestimmung bei 15,2 µm (Zweig, Vol. 11, 189). Elementaranalyse nach Aufschluß nach bekannten Methoden: Ber. 11,29 % P; 35,87 % S
Analytische Methoden: Mikro (Rückstände)	Phosphorbestimmung wie bei Dementon (Systox). Gaschromatographische Bestimmung nach Oxidation zum Phosphat und Sulfon siehe M. C. Bowman und M. Berozy: J. AOAC 52, 1231 (1969)

Anwendung obiger Kennzahlen (vgl. Fig. 3): <sup>1</sup>Abschätzung des Gasaustausches, <sup>2</sup>Bioakkumulation/Adsorption, <sup>3</sup>Verteilung, <sup>4</sup>Sedimentation/Resuspension, <sup>5</sup>Hydrolyse, <sup>6</sup>Verteilung/Lösung

auch Simulationsmodelle und vor allem Fachleute zur Hand sein.

Einmal in das Gewässer gelangt, verhält sich eine Schadstoffwolke nach klassischem Muster (Fig. 2): Die Stoffe werden entsprechend ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften flußabwärts verfrachtet, verdünnt, verflüchtigen sich, adsorbieren an Partikel oder werden abgebaut (Fig. 3). Die Konzentrationsverteilung läßt sich mit spezifischen Modellrechnungen bei bekannten Stoffkennwerten und Ökosystemeigenschaften relativ gut berechnen [8, 9, 13, 21].

Solche zwar genaueren, aber auch schwierigeren Rechnungen konnten im Fall Schweizerhalle erst im Nachhinein gemacht werden; unmittelbar nach dem Unfall mußte man sich mit der Abschätzung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schadstofffront begnügen. Dies reichte allerdings aus, um Präventivmaßnahmen bei den Wasserwerken treffen zu können [22].

Trotz der vergleichsweise billigen und vor allem raschen Modellsimulation konnte bei der Bewältigung des Unfalls nicht auf Messungen an Ort und Stelle verzichtet werden, weil wichtige Prozesse, z.B. die Sedimentation und vor allem die Biodegradation, nicht genau genug bekannt waren. Es wird damit klar, daß neben den für Modellrechnungen unentbehrlichen chemischen und physikalischen Kennwerten von Stoffen auch der Spurenanalytik dieser Stoffe in natürlichen Systemen höchste Bedeutung zukommt.

### Die Folgen für die Biozönose

Spektakulär war das Aalsterben von Schweizerhalle (km 159) bis hinunter zu km 560 (Fig. 2). Aber auch andere Fischarten wie Äschen, Bachforellen, Hechte,

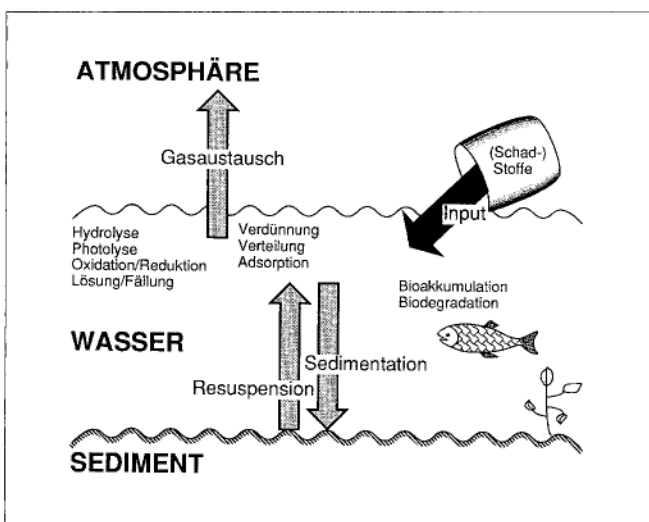


Fig. 3. Transport-, Transfer- und Transformationsprozesse, denen in Gewässer eingeleitete Stoffe unterliegen

Zander etc. wurden stark geschädigt [9]. Die Fischnährtiere im unmittelbaren Unfallbereich erlitten akut Vergiftungen [18], während die Wirkung unterhalb Bad Honnef (km 640) nur noch schwach nachweisbar war [6, 15]. Die Makroinvertebraten reagierten ebenso wie die Fische differenziert auf die Giftwelle. In Basel waren vor allem die empfindlicheren Ephemeropteren und Trichopteren des linken Uferbereiches beeinträchtigt, während Dipteren und Gammariden weniger Schaden nahmen. In den Niederlanden konnten die Effekte der Sandoz-Schadstoffe insbesondere an Tubificiden und Dipterenlarven nachgewiesen werden.

Die Erholung bzw. die Wiederbesiedlung der Rheinsohle hat schon wenige Monate später den offensichtlichen Schaden überdeckt. Eine Ausnahme macht die Aalpopulation, deren Altersstruktur und Dichte nicht so rasch wieder hergestellt sein dürfte; hier wie auch bei den anderen Fischen spielt der künstliche Besatz eine signifikante Rolle. Daß sich das Ausmaß des Schadens in Grenzen gehalten hat, ist nicht zuletzt eine Folge davon, daß der Rhein einer bedeutenden Dauerbelastung mit chemischen Stoffen ausgesetzt und das Flußbett durch bauliche Veränderungen stark gestört ist. Dadurch waren die meisten empfindlichen Arten schon vor dem Unfall gar nicht mehr vorhanden.

### Die ökotoxikologische Interpretation des Unfalls

Für den Menschen bestand zumindest durch die Wasserverschmutzung keine akute Gefährdung, zumal die Trinkwasserversorger entlang des Rheines ihre Was-

Tabelle 4. Ökotoxizität der in den Rhein eingeleiteten Schadstoffe. LC<sub>50</sub> = letale Konzentration, bei der 50 % der Versuchstiere in der angegebenen Zeit getötet werden; EC<sub>50</sub> = Konzentration, bei der 50 % der Organismen einen bestimmten Effekt (z.B. Immobilität) zeigen. Die Werte sind mit den Maximalkonzentrationen von Tabelle 1 bzw. mit den Konzentrationsverläufen in Fig. 2 zu vergleichen

Schadstoff [µg/l]	LC <sub>50</sub> (96 h) <i>Salmo gairdneri</i>	LC <sub>50</sub> (96 h) <i>Cyprinus carpio</i>	EC <sub>50</sub> (96 h) <i>Daphnia magna</i>
Thiomethon	8000	1420 – 13200	8000 (24 h)
Propethamphos	4650	6400 – 8800	–
Disulfoton	6000	11500	13
Fenitrothion	2000 – 24000	–	0,4 – 11
Parathion	2000 (48 h)	–	0,6 – 2,5
Oxadixyl	320000	> 300000	530000
Etrimphos + Fenitrothion	24 – 250	–	3,8
Quinalphos (= Ecalux)	–	741 – 2800	–
Endosulfan	1,4	–	240
Tedion	–	–	–
(= Tetradifon)	–	–	10
Captafol	500	–	0,2 – 66
Dichlorvos	–	–	–

serentnahmen sofort nach Bekanntgabe des Unfalls und während des Durchflusses der Giftstoffwelle vorsorglich eingestellt hatten [17]. Die Entscheidungen zu diesen Maßnahmen wurden nicht aufgrund effektiver Kenntnisse des Gefährdungspotentials, sondern aufgrund einer gefühlsmäßigen Beurteilung der Situation gefällt. Damit sollte und konnte jegliches Risiko vermieden werden.

Eine vorsorgliche Beurteilung der Gefährdung der Biozönose und möglicher Spätfolgen für die Menschen (s. Tabelle 2 A) konnte mangels entsprechender Grundlagen nicht vorgenommen werden. Sieht man von der Schließung bestimmter Kanalsysteme in Frankreich und Holland ab, gibt es übrigens auch keine Möglichkeit zur Verminderung eines Risikos.

Die beobachteten Unfallfolgen, nämlich die Konzentration der Schadstoffe entlang des Rheins (Tabelle 1, Fig. 2) und die Eliminierung von Wasserorganismen, lassen folgende Schlüsse bezüglich der generellen Toxizität zu:

- Die Aalpopulation wurde bei einer Spitzenkonzentration der Phosphorsäureester von 10–20  $\mu\text{g/l}$  (bei km 500–600) akut geschädigt. Der während 96 h nicht unterschrittene Wert beträgt ca. 2,5  $\mu\text{g/l}$ . Nach den Toxizitätswerten in Tabelle 4 wirkt nur Endosulfan in diesen Konzentrationsbereichen

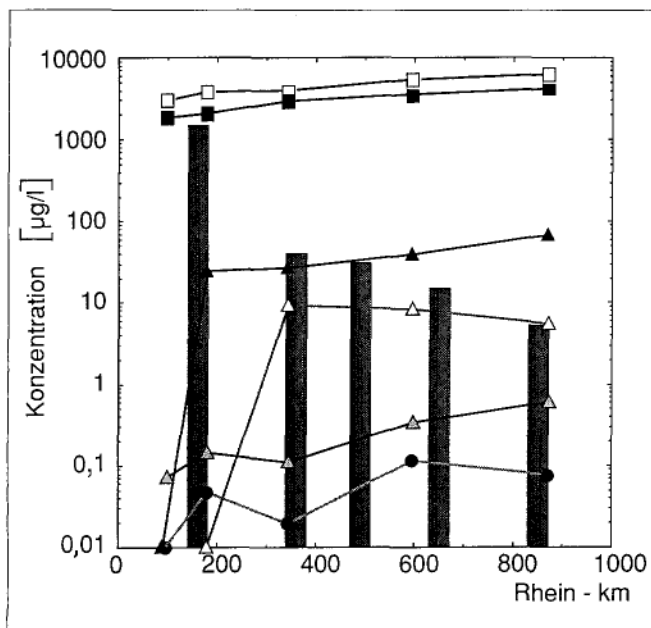


Fig. 4. Chronische Belastung des Rheins mit einigen ausgewählten Schadstoffen im Längsprofil. Die Meßwerte sind Mittelwerte des Jahres 1986 [10]. PS-Ester  $\Sigma$  Phosphorsäure-Ester (des Sandoz-Unfalls), TOC gesamtorganischer Kohlenstoff, DOC gelöster organischer Kohlenstoff,  $\text{NH}_4\text{-N}$  Ammonium, Hg Quecksilber, Zn Zink,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$  Phenole und Homologe. Akut: ■ PS-Ester; chronisch: □ TOC, ■ DOC, △  $\text{NH}_4\text{-N}$ , ● Hg, ▲ Zn, △  $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$

akut toxisch. Leider gibt es aber weder  $\text{LC}_{50}$ -Werte für Aale noch wurde die effektive Endosulfan-Konzentration im Rhein gemessen.

- Tote Äschen und (Bach-)Forellen wurden bis fast hinunter nach Mainz gefunden. Die entsprechende, an 96 h nicht unterschrittene Konzentration der Phosphorsäureester ist ca. 5  $\mu\text{g/l}$ , also immer noch um einen Faktor 1000 kleiner als die Toxizitätswerte.
- Bei der Makroinvertebratenfauna wurden Effekte bei noch kleineren Konzentrationen beobachtet.

Welcher Stoff in welcher Konzentration für die beobachtete biologische Verwüstung verantwortlich ist, läßt sich nicht sagen, aber akut toxische Wirkungen treten schon bei wesentlich kleineren Konzentrationen auf, als die  $\text{LC}_{50}$ -Werte suggerieren. Es muß die synergistische Wirkung der zusammen eingeleiteten Stoffe ebenso berücksichtigt werden wie die Tatsache, daß sie sich zur vorhandenen chronischen Belastung addiert (Fig. 4). Diese nimmt flußabwärts trotz der Verdünnung durch die Zuflüsse für die meisten Parameter zu [10], womit sich auch erklärt, warum die kleinen Konzentrationen der Sandoz-Schadstoffe in den Niederlanden immer noch Auswirkungen hatten. Es geht also darum, die Störung gegenüber derjenigen der chronischen Belastung und der natürlichen Variation festzustellen und zu bewerten. Der natürliche Referenzzustand ist jedoch vielfach nicht mehr meßbar und muß durch Rechnung abgeschätzt werden [23].

Zu all diesen Schwierigkeiten gesellt sich noch das Problem der zeitlichen und örtlichen Variation der Belastung (vgl. Fig. 2) und der sehr unterschiedlichen Empfindlichkeit der betroffenen Arten.

## Schlußfolgerungen für ökotoxikologische Fragestellungen und Forschung

Angesichts der am Beispiel des Sandoz-Unfalls erläuterten Probleme stellt sich die Frage, welchen Beitrag die Wissenschaft zur Verhinderung und Bewältigung solcher Katastrophen überhaupt beitragen kann und muß. Es stellt sich aber auch die Frage, ob nicht vielmehr die Verhinderung und Bewältigung chronischer Belastungen im Vordergrund stehen sollten.

## Stoff-Eigenschaften

Die chemische und physikalische Charakterisierung von Einzelstoffen ist Grundlage für die Beurteilung ihres Schicksals in der Umwelt. Auch die Anwendung dieser Daten in Modellrechnungen liefert gute Vorausagen über die Verteilung der betreffenden Stoffe im Ökosystem, insbesondere in Seen und Fließgewässern. Schwierigkeiten bieten allerdings noch die vor allem

durch Mikroorganismen verursachten biologischen Degradations- und Akkumulationsprozesse. Sie bedingen außer qualitativer Kenntnis der Vorgänge auch Unterlagen über die Quantität der betroffenen Organismen und Stoffwechselraten im Ökosystem.

Zur Wirkung der Stoffe auf die Biozönose fehlen allgemein anwendbare Kennzahlen weitgehend [19]. Die heute gebräuchlichen, aus der Toxikologie übernommenen ökotoxikologischen Größen (LC = lethal concentration, LD = lethal dose, EC = effect concentration, NOEC = non-observed effect concentration, AF = application factor etc.) liegen nur für einzelne Stoffe und bezüglich weniger Leitorganismen vor. Sie sind mit großen Unsicherheiten behaftet und lassen sich nur schwer auf natürliche Verhältnisse übertragen. Insbesondere aber fehlen Kenntnisse über die chronischen und subletalen Wirkungen von Einzelstoffen und Stoffgemischen auf Individuen, Populationen und ganze Ökosysteme [20].

Figur 5 und 6 zeigen die konzeptuellen Grundlagen der  $LC_{50}$ -Werte und mögliche Beziehung zu chronischer Wirkungsanalyse. Ein einzelner  $LC_{50}$ -Wert kann nicht in Beziehung zu Langzeiteffekten oder NOEC gesetzt werden, da er nichts über die Steilheit der Konzentration-Effekt-Beziehung aussagt und nur einen Punkt in der Zeitskala liefert. Verwendet man jedoch den ganzen Datensatz von Testserien (Fig. 5) und projiziert die verschiedenen Effekte auf die Expositionszeit-Konzentrations-Ebene (Fig. 6), so liefern die erhaltenen „Linien gleichen Effektes“ wertvolle Hinweise für die Extrapolation der Toxizität in chronische Bereiche bzw. höhere Konzentrationen. Der Verlauf der Kurven (s. [7] für konkrete Daten) zeigt, daß sich die wirksamen Konzentrationen für die verschiedenen Effekte mit zunehmender Zeit nähern. Dies läßt den Schluß zu, daß zur Abschätzung der chronischen Wirkung einer Substanz ein beliebiger Effekt untersucht werden kann, wenn dies für genügend lange Expositionszeiten geschieht. Inwiefern und über welchen Bereich eine konstante „Dosis“ (Konzentration mal Zeit) einen gleichen Effekt ausübt, bleibt zu untersuchen.

### *Das Ziel-Ökosystem*

Je nachdem, wohin ein Schadstoff gelangt, richtet er mehr oder weniger großen Schaden an. Um dies beurteilen zu können, müssen genaue Kenntnisse über das „Ziel-Ökosystem“ vorhanden sein. Dazu gehören qualitative und quantitative Bestandsaufnahmen sowohl der chemischen und physikalischen Parameter wie auch der Biozönosen in ihren zeitlichen und räumlichen Variationen. Es gehören aber auch Kenntnisse über Art und Größe der ablaufenden Prozesse (Fig. 3) dazu. Bestehende und zukünftige Störungen durch den

Menschen müssen in einer gesamtheitlichen Sicht beurteilt und bewertet werden können; das bedeutet, daß neben den Abweichungen gegenüber einem Referenzzustand des betroffenen Ökosystems auch absolute Kriterien definiert oder erarbeitet werden müssen, die Aussagen über den Gesundheitszustand erlauben. Ein solches Kriterium ist zum Beispiel die Vermeidung von irreversiblen Schäden, wie sie die endgültige Ausrottung einer Art darstellt. Die Beobachtung des Ökosystems muß also so ausgelegt sein, daß sie negative Veränderungen feststellen und diese wenn möglich auf bestimmte Ursachen zurückführen kann.

### *Forschung*

Die gegenwärtige Bevorzugung von Überwachungsprogrammen (auch als Folge des Sandoz-Unfalls wurden intensivere Messungen gefordert) und der Anwendung toxikologischer Standardtests darf nicht dazu führen, daß die flexible Forschung zum Verständnis der Umwelt und ihrer Umwandlungsprozesse vernachlässigt wird. Disziplinübergreifende Grundlagenforschung über vergleichende Toxikologie, über die vielseitigen Wechselwirkungen sowie über Nahrungs- und Energiekreisläufe in Lebensgemeinschaften, über den Einfluß von Immissionen und anderen Streßfaktoren auf Struktur, Artenhäufigkeitsverteilung und Sukzession der aquatischen Ökosysteme muß die Kriterien liefern, die es gestatten, die Toleranzgrenzen für die Schadwirkung systemfremder Substanzen auf ganze Ökosysteme abzuschätzen.

### **Diskussion**

Im folgenden sollen anhand einiger Thesen mögliche Lehren aus der Betrachtung einer Umweltkatastrophe gezeigt werden.

*These 1:* Akute Umweltkatastrophen sind Einzelfälle und in ihrem Ablauf nicht vorhersehbar. Sie müssen daher vermieden oder in ihren Auswirkungen begrenzt werden.

Es nützt nichts, immer umfangreichere Überwachungsprogramme auf die Beine zu stellen, da die Chance, genau zur richtigen Zeit am richtigen Ort die richtigen Parameter gemessen zu haben, verschwindend klein ist und zudem die Feststellung einer Verschmutzung sie weder verhütet noch ihre Auswirkungen verringert. Methoden zur Erkennung und Bewertung von Risiken müssen gesucht und bereitgestellt werden, damit Umweltkatastrophen mit irreversiblen negativen Wirkungen bzw. mit unverantwortbar großem Ausmaß nicht vorkommen können. Dazu müssen potentielle Emittenten ermittelt und an Ort und Stelle überwacht werden.



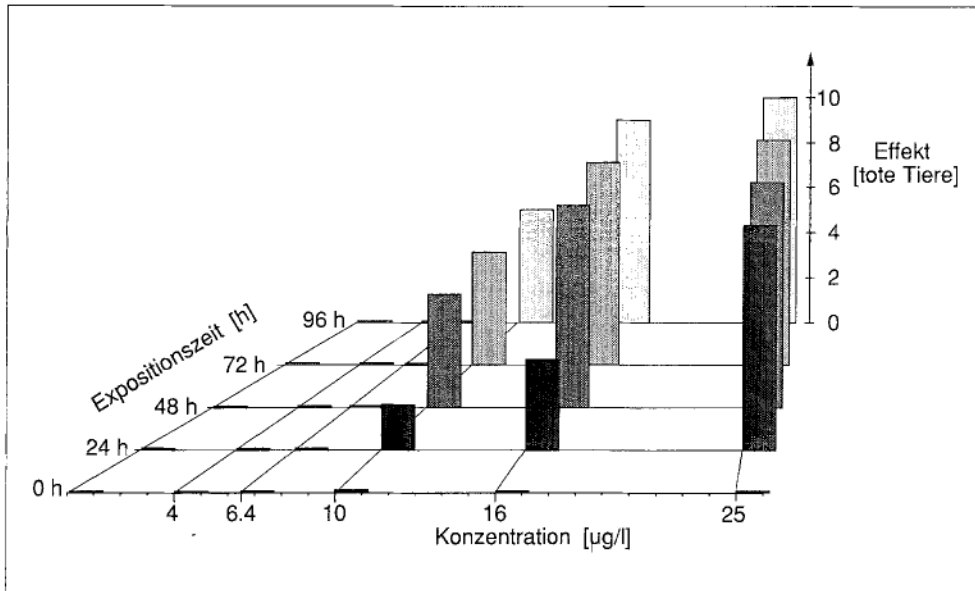


Fig. 5. Konzentrations- und zeitabhängige Effekte (Anzahl tote Tiere von insgesamt je 10) von Schadstoffen auf Organismen am Beispiel der Toxizität von Disulfoton für Karpfen. Die  $LC_{50}$ -Werte liegen für alle untersuchten Expositionszeiten zwischen 10–14  $\mu\text{g/l}$

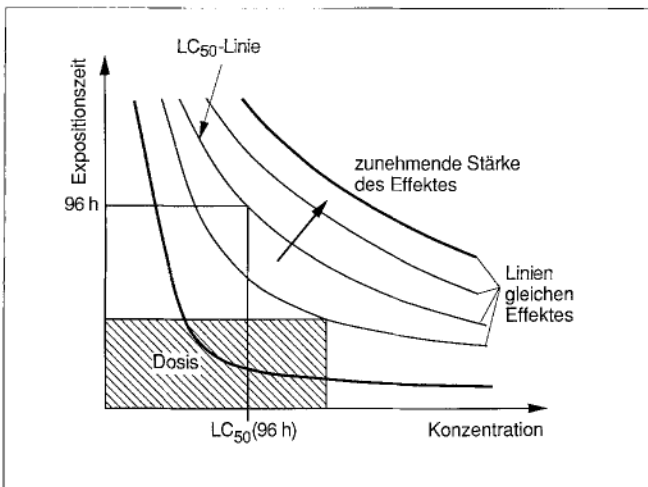


Fig. 6. Linien gleichen Effektes in Abhängigkeit von der Konzentration und der Expositionszeit,  $LC_{50}$ -Werte sind einzelne Punkte auf dieser Darstellung. Tests sollten für klar definierte Effekte einen breiten Bereich von Konzentrationen und Expositionszeiten abdecken, so daß chronische Wirkungen extrapoliert werden können. Das mit „Dosis“ bezeichnete Feld ist der effektiven wirksamen Dosis proportional und dürfte mindestens in einem Teilbereich für einen bestimmten Effekt konstant sein

**These 2:** Alle anthropogenen Stoffe müssen chemisch und physikalisch charakterisiert und bezüglich ihres Verhaltens in der Umwelt bekannt sein. Die Wirkung auf die Biosphäre muß erforscht und verantwortbar sein.

Das bedeutet, daß nur solche neuen Stoffe in der Umwelt freigesetzt werden dürfen, deren umweltrelevante Eigenschaften bekannt sind. Es bedeutet aber in erster Linie, daß Kriterien festgelegt werden, nach denen die Chemikalien bewertet bzw. untersucht werden müssen. Dabei muß davon ausgegangen werden, daß gene-

relle Unschädlichkeit nicht nachgewiesen werden kann und jeder Stoff bei entsprechender Dosierung ein Gift ist (Paracelsus). Bei der Formulierung der Zulassungsbedingungen ist ein angemessener Sicherheitsfaktor einzubeziehen.

**These 3:** Es darf nicht davon ausgegangen werden, daß für festgestellte Wirkungen in der Umwelt rasch einfache Ursachen gefunden werden können. Gegenmaßnahmen müssen daher auch schon aufgrund von Indizien ergriffen werden.

Ist ein in der Umwelt festgestelltes Symptom schädlich und unerwünscht und sprechen plausible Tatsachen für einen Zusammenhang mit einem Schadstoff, so müssen unverzüglich Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Die Zeitverzögerung bis zum stichhaltigen Ursache-Wirkungs-Beweis darf nicht in Kauf genommen werden, da dieser meist schwierig, falls überhaupt, zu erbringen ist. Insbesondere im wohl häufigsten Fall synergistischer Wirkungen ist eine Ursache-Wirkungskette außerordentlich schwierig zu etablieren.

**These 4:** Die Umweltforschungsinstitute und -laboratorien dürfen ihre Kräfte nicht auf die Untersuchung von Spezialfällen verschwenden, sondern müssen sich in exploratorischer Forschungsarbeit auf die Suche nach allgemeingültigen Aussagen konzentrieren.

Besondere Bedeutung erhält dabei die Aus- und Weiterbildung von flexiblen Fachleuten, die in der Lage sind, ihre Kenntnisse den spezifischen Gegebenheiten angepaßt anzuwenden.

**These 5:** Tendenziell ist überall dort eine Störung des natürlichen Gleichgewichts zu erwarten, wo der anthropogene Anteil an den Stoffflüssen und -reservoirs in einer Größenordnung ist, die den natürlichen Variationen entspricht.



Für einen großen Teil der ca. 70000 anthropogenen Chemikalien ist also zu erwarten, daß sie irgendwo und irgendwann zu Störungen führen, die wir früher oder später zu beurteilen und evtl. zu beseitigen haben. Die Kenntnisse bezüglich natürlicher und anthropogener Stoffflüsse sind äußerst mangelhaft und müssen dringend erweitert werden.

*These 6:* Akute Schädigungen von Biozöten können durch das Vorhandensein von Fluchträumen und Reserve-Biotopen wesentlich verringert werden.

Entgegen den ursprünglichen Befürchtungen hat sich die Biozönose des Rheins relativ rasch wieder erholt. Dank dem Umstand, daß in der Nähe des Unfallortes vor allem ein Ufer betroffen war und Zuflüsse und Seitenarme des Rheins die Flucht und die Einwanderung von gesunden Tieren ermöglicht hatten. Es ist daher nicht unbedingt ein Nachteil, Abwassereinleitungen so zu gestalten, daß sich die Abwasserfahne möglichst lange nicht mit dem sauberen Wasser durchmischt.

*These 7:* Umweltkatastrophen sind, sofern sie nicht ein großes Ausmaß und eine große Häufigkeit aufweisen, gesamtökologisch weniger gravierend als die schleichende chronische Vergiftung unserer Umwelt.

Anthropogene Umweltkatastrophen dürfen nie ein Ausmaß erreichen, bei dem die Biozönose eines ganzen Ökosystems irreversibel zerstört wird. Werden (kleinere) Katastrophen nicht zur Gewohnheit, so kann sich die Lebewelt im allgemeinen wieder erholen. Ganz anders verhält es sich mit chronischen Dauerbelastungen, die systematisch Lebensraum zerstören und die Vitalität einzelner Arten herabsetzen. Dies führt zu Veränderungen in der Zusammensetzung von Biozöten und zu irreversiblen Verlust an genetischer Vielfalt.

*These 8:* Die durch den Menschen verursachten Energie- und Stoffflüsse müßten im Idealfall in sich geschlossen und so gut wie möglich von den natürlichen Kreisläufen getrennt werden.

Die Existenz des Menschen und noch viel mehr seine Aktivitäten haben Einfluß auf die Umwelt. Dieser ist auch global längst nicht mehr vernachlässigbar und erfolgt in einem Tempo, dem die evolutive Anpassung nicht mehr folgen kann. Es ist also unabdingbar, daß ökologische Freiräume erhalten oder geschaffen werden, die möglichst wenigen Störungen unterworfen sind.

Unser Dank gilt Dr. R. Behra für die wohlwollend kritische Durchsicht der Arbeit und wertvolle Anregungen sowie Dr. W. Giger, Dr. R. Müller, F. Stössel und Dr. O. Wanner für die tatkräftige Unterstützung bei der Suche nach Unterlagen und die Überlassung von Manuskripten. H. Bolliger verdient unsere Anerkennung für die kunstfertige Ausführung der Figuren und L. Schwarz für die souverän gemeisterte Textverarbeitung.

1. Brauch, H.-J., Sontheimer, H.: Auswirkungen einer Periode mit länger anhaltender niedriger Wasserführung auf die organische Belastung des Oberrheins bei Karlsruhe. AWBR-Bericht 1985, S. 61
2. Bundesanstalt für Gewässerkunde: Faunistische Erhebungen an der Rheinsohle zur Feststellung und Bewertung der Schädigung der Benthosbiozönose durch den Brand bei der Firma Sandoz in Basel. Nr. 106 07 073 (1988)
3. Bundesanstalt für Gewässerkunde: Schädigung von Kleintieren. Umwelt 3, 116 (1988)
4. Butler, G. C. (ed.): Principles of ecotoxicology. SCOPE 12. Chichester: Wiley 1978
5. Capel, P., D., Giger, W., Reichert, P., Wanner, O.: Environ. Sci. Technol. 22, 992 (1988)
6. Deutsche Kommission zur Reinhaltung des Rheins: Deutscher Bericht zum Sandoz-Unfall mit Meßprogramm (1986)
7. Dill, D. C., Mayes, M. A., Mendoza, C. G., Boggs, G. U., Emmitte, J. A., in: Fifth Conference, ASTM STP 766, p. 245 (J. G. Pearson, R. B. Foster, W. E. Bishop, eds.). American Society for Testing and Material 1982
8. EAWAG: Bestandaufnahme, ökologische Beurteilung, empfohlene Maßnahmen und Absichten für weitere Untersuchungen nach dem Schadenfall Sandoz, Erster Zwischenbericht an die Regierung des Kantons Basel-Landschaft, 12. Dez. 1986
9. EAWAG: Verhalten der Chemikalien im Rhein, biologischer Zustand und Wiederbelebung des Rheins nach dem Brand in Schweizerhalle, Auftrag Nr. 4727 (1987)
10. Internationale Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigung: Zahlentafeln der physikalisch-chemischen Untersuchungen des Rheinwassers (1986)
11. Internationaler Warn- und Alarmdienst „Rhein“, Gewässerschutzamt Basel-Stadt, Schoch, K.: Warnung: Brand Chemikalienlager Schweizerhalle 1.11.1986, 0130 Uhr Telex vom 2. 11. 1986, Gewässerschutzamt Basel-Stadt
12. May, R. M.: Science 241, 1441 (1988)
13. Mossman, D., Schnoor, J. L., Stumm, W.: J. WPCF 60, 1806 (1988)
14. National Research Council: Toxicity Testing. Strategies to Determine Needs and Priorities. Washington, D. C.: National Academy Press 1984
15. Nota, D. B. W.: Niederländischer Bericht über den Sandoz-Unfall. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag, Dez. 1986, TV1526/66 (1986)
16. Schweiz Del. in der Internat. Rheinschutzkommission: Erster Bericht über die Auswirkungen des Brandfalles Sandoz AG in Schweizerhalle auf den Rhein, 3. Dez. 1986, Mr/hn/0444h
17. Sontheimer, H.: Sichere Trinkwasserversorgung trotz Tschernobyl und Sandoz. Versuch einer Bilanz über die Unfälle im Jahre 1986. AWBR Bericht 1986, S. 27
18. Stössel, F., in: Biologie des Rheins (Kinzelbach, Friedrich, Hrsg.). Limnologie Aktuell, Band 1. Stuttgart-New York: G. Fischer, 1989
19. Stumm, W., Schwarzenbach, R., Sigg, L.: Angew. Chem. 95, 245 (1983)
20. Vouk, V. B., Butler, G. C., Upton, A. C., Parke, D. V., Asher, S. C. (eds.): Methods for Assessing the Effects of Mixtures of Chemicals. SCOPE 30. Chichester: Wiley 1987
21. Wanner, O., et al.: Environ. Sci. Technol. 23, 1232 (1989)
22. Winter, H., Lindner, K.: gwf Wasser-Abwasser 128, 525 (1987)
23. Zobrist, J., Stumm, W.: Workshop on River Inputs to Ocean Systems (RIOS), SCOR Working Group 46, FAO, Rome 1979