

Der Rhein rot, die Fische tot

Brandkatastrophe in Schweizerhalle 1986 – Rückblick und Bilanz

Walter Giger

Eawag: Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs, 8600 Dübendorf, Schweiz, und Giger Research Consulting, 8049 Zürich, Schweiz (giger@eawag.ch)

DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2007.03.165>

Bitte zitieren Sie diesen Beitrag wie folgt:

Giger W (2007): Brandkatastrophe in Schweizerhalle 1986 – Rückblick und Bilanz. UWSF – Z Umweltchem Ökotox 19, Sonderheft Nr. 1, 11–23

Zusammenfassung

Hintergrund. Am 1. November 1986 brannte auf dem Industriegelände der Firma Sandoz in Schweizerhalle bei Basel eine Lagerhalle, in der 1.250 t Agrochemikalien, Hilfsstoffe und Zwischenprodukte gelagert waren. Mit dem Löschwasser gelangten mehrere Tonnen Schadstoffe, vor allem Phosphorsäureester-Insektizide, in den Rhein und verursachten eine sich bis nach Holland auswirkende Umweltkatastrophe. Durch einen roten Farbstoff wurde die in den Rhein eingetragene Schadstoffwelle für jedermann sichtbar markiert. Viele Fische – vor allem Aale und Salmonide – sowie andere Flusslebewesen wurden getötet. Dies passierte wenige Monate nach der Reaktorkatastrophe in Tschernobyl und erschütterte insbesondere auch den Mythos der vor solchen Katastrophen gefeiten Schweiz.

Ziel. In diesem Artikel wird ein Rückblick über die Vorgänge im November 1986 gegeben, und zwei Jahrzehnte nach dieser Umweltkatastrophe eine Bilanz gezogen.

Ergebnisse und Diskussion. Im Anschluss an diesen Jahrhundert-Unfall wurde angestrebt, daraus neue Erkenntnisse für die Umweltwissenschaften abzuleiten und Fortschritte im Gewässerschutz zu erreichen. Unter anderem werden diskutiert: Maßnahmen der chemischen Industrie und der Behörden, Umweltschutzpolitik, Aktivitäten von Umweltschutzinstitutionen, chemisch-analytische Messungen, Biomonitoring, Warn- und Alarmplan, ökologische Schädigungen, ökotoxikologische Effektbeurteilung, Erholung und Änderungen in der Flussbiologie, Rückkehr der Lachse, Trinkwasserversorgung, Forschungsprogramme, Ausbildung von UmweltwissenschaftlerInnen und Zukunftsvisionen.

Schlussfolgerungen. Die verhängnisvolle Verunreinigung des Rheins im November 1986 bewirkte durch die offen zutage getretenen Schädigungen an der Flussbiologie, dass Maßnahmen getroffen wurden, um ähnliche Umweltkatastrophen wesentlich besser verhindern zu können. Die entscheidend wichtigen Risikoreduktions-Maßnahmen in der chemischen Industrie, die gesetzlichen Vorschriften und Kontrollen sowie die chemische und biologische Überwachung der Wasserqualität wurden wesentlich verbessert. Politik und chemische Industrie haben wichtige Lehren gezogen und entsprechend gehandelt.

Empfehlungen. Eine drastische Stoßbelastung, wie sie in Schweizerhalle 1986 auftrat, ist durch ihre akute Schädigung klar erkennbar und kann, wie sich gezeigt hat, zu Gegenmaßnahmen führen, die sich langfristig positiv auswirken. Die weniger offensichtlichen, chronischen Wasserverunreinigungen hingegen

sollten noch stärker beachtet werden, ebenso wie die Veränderung der Zusammensetzung der Biozönosen. Eine hohe Wasserqualität muss vor allem auch gefordert werden im Hinblick auf die Nutzung des Wassers aus dem Rhein für die Trinkwasserversorgung. Dabei verdienen die möglicherweise problematischen, organischen Mikroverunreinigungen eine besonders hohe Aufmerksamkeit.

Ausblick. Der Chemiebrand vor 20 Jahren hat der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit wichtige, neue Impulse gegeben und die Bereitschaft zur internationalen Kooperation deutlich verbessert. Der Großbrand von Schweizerhalle hat Vieles bewirkt – insbesondere für den Rhein – und zwar in einem insgesamt positiven Sinne, wenn die Auswirkungen aus einer langfristigen Perspektive betrachtet werden. Die Einbeziehung eines ganzen Einzugsgebietes hat auch weltweiten Beispielcharakter für andere, noch immer stark beeinträchtigte Flusssysteme.

Schlagwörter: Aal; Fischsterben; Insektizide; Lachs; Phosphorsäureester; Quecksilber; Rhein; Risiko; Sandoz; Schweizerhalle; Störfall

Abstract

'The Rhine Red, The Fish Dead': The Fire Catastrophe at Schweizerhalle 1986 – Review and Assessment of Its Long-Term Impact

Background. On November 1st 1986, a fire at a Sandoz Ltd. storehouse at Schweizerhalle, an industrial area near Basel, Switzerland, resulted in a chemical contamination of the environment. The storehouse, which was completely destroyed by the fire, contained pesticides, solvents, dyes, and various raw and intermediate materials. The majority of the approximately 1,250 tons of stored chemicals was destroyed in the fire, but large quantities were introduced into the atmosphere, into the Rhine river through runoff of the fire-fighting water and into the soil and groundwater at the site. The chemicals discharged into the Rhine caused massive kills of benthic organisms and fish, particularly eels and salmonides. The public and private reaction to the fire and the subsequent chemical spill was very strong. This catastrophe happened only a few months after the Chernobyl accident and destroyed the myth of the immunity of Switzerland.

Aim. This article reviews the damaging events of November 1986 and aims at striking the balance two decades later.

Results and Discussion. In the aftermath of this once-per-century accident, it was the aim was to gain increased knowledge and understanding in the environmental sciences and to achieve progress for water pollution control issues.

The following themes are discussed: Mitigation measures by the chemical industry and by the governmental authorities, activities of environmental protection organisations, chemical and

biological monitoring, alert organisation, ecological damages, ecotoxicological effect assessment, recovery and alteration of river biology, return of the salmon, drinking water supplies, research programs, education of environmental scientists and visions for the future.

Conclusions. The catastrophic pollution of the Rhine in November 1986, and the obvious damages of the river biology, triggered significant progress towards the prevention of such environmental catastrophes. The crucial risk reduction measures in the chemical industry, legal regulations and controls as well as chemical and biological monitoring of the river water quality were substantially improved. Politics and chemical industry learned their lectures and proceeded accordingly.

Recommendations. Such a drastic acute contamination, as happened at Schweizerhalle in 1986, is clearly recognizable by the toxic effects. This led to long-term mitigation activities. However, also the less obvious effects of chronic water pollution should receive more attention as well as the on-going alteration of the biocenosis. A high water quality must be demanded in terms of using the Rhine water for drinking water supply. In that context, micropollutants should also be considered, and particular attention should be paid to emerging contaminants.

Perspectives. The big chemical storehouse fire of 1986 induced the transboundary cooperation and improved the willingness for international cooperation. Overall, the effects of the fire catastrophe are positive in terms of a long-term perspective. The whole-basin approach is, on a global basis, an example for other, even more heavily polluted river systems.

Keywords: Eel; fish kill; insecticides; mercury; ordinance against major accidents; organophosphates; pesticides; Rhine river; risk; salmon; Sandoz; Schweizerhalle

Einleitung

Am 1. November 1986 hat der Großbrand eines Chemikalienlagers in Schweizerhalle am Rhein oberhalb von Basel eine Umweltkatastrophe verursacht, die insbesondere für die Lebewesen im Rhein vernichtende Folgen hatte (Capel et al. 1988, Eawag 2006, Güttinger & Stumm 1990, Rich 1986, Hurni 1988). Zunächst waren die massive, regionale Luftverunreinigung und starke, lokale Bodenverschmutzung augenfällig. Von weit reichender, internationaler Bedeutung war jedoch die durch den Brand verursachte Verschmutzung des Rheins. Das von der Feuerwehr eingesetzte Löschwasser wurde samt den darin enthaltenen chemischen Schadstoffen in den Rhein gespült, wodurch die Flussbiologie stark geschädigt wurde. Die Brandkatastrophe bewirkte in der Folge Änderungen in Herstellung und Lagerung chemischer Produkte und führte zu einem wesentlich bewussteren Umgang mit den Risiken gelagerter Chemikalien.

Im ersten Teil dieses Beitrages wird ein Überblick über die Ereignisse von 1986 und die im Rhein aufgetretenen Schädigungen gegeben. Damals bewirkte diese Umweltkatastrophe große Aufmerksamkeit sowohl in Öffentlichkeit und in Politik als auch in den Umweltwissenschaften (Behr 2002, Capel et al. 1988, Dickman 1988, Güttinger & Stumm 1990, Güttinger 1992). Anschließend wird erläutert, wie schnell und wie gut sich die Flussbiologie erholt und zu welchen Konsequenzen der Sandoz-Unfall geführt hat. Aus der Schweizerhalle-Erfahrung werden einige Lehren abgeleitet,

und es wird beurteilt, welche Fortschritte der Umweltschutz im allgemeinen und der Gewässerschutz im speziellen in den vergangenen 20 Jahren aufzuweisen haben. Diese Ausführungen basieren auf den Berichten der Umweltschutzinstitutionen in Basel und im Rheineinzugsgebiet, auf wissenschaftlichen und Öffentlichkeits-orientierten Publikationen sowie teilweise auf persönlichen Wahrnehmungen und Einschätzungen des Autors, der als Eawag-Wissenschaftler im November 1986 und in den darauf folgenden Monaten aktiv involviert gewesen ist.

1 Ablauf der Ereignisse im November 1986

1.1 Großbrand der Chemikalien-Lagerhalle 956 der Firma Sandoz in Schweizerhalle

In der Nacht vom Freitag, den 31. Oktober, auf Samstag, den 1. November 1986, brannte das Lagergebäude 956 der Sandoz AG auf dem Industrieareal in Schweizerhalle bei Basel in der Schweiz. Die Untersuchungen des wissenschaftlichen Dienstes der Stadtpolizei Zürich zeigten später, dass der Brand vermutlich beim Verpacken des anorganischen, blauen Farbstoffes «Berlinerblau» (Eisen(III)-hexacyanoferrat(II) $\text{Fe}^{\text{III}}_4[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]_3$) verursacht worden war (Hurni 1988). Der Farbstoff wurde entsprechend dem damaligen Stand der Verpackungstechnik mit einer Plastikfolie umhüllt, die ihrerseits mit Hilfe eines Gasbrenners verschweißt wurde. Die Lagerarbeiter hatten nicht bemerkt, dass die offene Flamme das verpackte Material zum Glimmen gebracht hatte. Aus diesem Schmelbrand entwickelte sich einige Stunden später der folgenschwere Großbrand (Abb. 1A, s. Farbtafel). Im Nachhinein konnte in Brandversuchen ermittelt werden, dass Berlinerblau "eine sehr leichte Entzündbarkeit" aufweist "und danach ein flammloses, rauchloses, langsam fortschreitendes Glimmen" entsteht. Diese Eigenschaften wären aber auch in den entsprechenden Substanzbeschreibungen nachzulesen gewesen. Der Brand wurde kurz nach Mitternacht entdeckt, und innerhalb sehr kurzer Zeit waren Werk- und Ortsfeuerwehren damit beschäftigt, den Brand zu löschen und die Umgebung zu schützen. Die insgesamt ungefähr 160 Feuerwehrleute leisteten einen beispielhaft aufopfernden Einsatz, trotz erheblicher Risiken, wie der damalige Basel-Korrespondent der Neuen Zürcher Zeitung in seinem Bericht beschrieb: "Der Brand war in seiner Schauerlichkeit außerordentlich eindrücklich. Explodierende Fässer und Feuereruptionen schleuderten immer wieder hohe Feuergarben in den nachtdunklen Himmel, und die mit Schutzmasken gegen das entfesselte Element kämpfenden Feuerwehrleute hatten, vor allem am Anfang, einen schweren Stand." Abb. 1A und 1B (s. Farbtafel) geben einen Eindruck der damaligen Situation.

Am frühen Morgen des 1. November 1986, um zwanzig Minuten vor vier Uhr, war das Feuer gelöscht. Es wäre zwar möglich gewesen, das Lagerhaus ganz niederbrennen zu lassen, unter Aufrechterhaltung von 'kalten Wänden' zu den Nachbarbauten. Doch da in einem benachbarten Lagerhaus unter anderem Phosgen gelagert war und ein Austritt dieses hochwirksamen Atemgifts unter allen Umständen verhindert werden musste, setzte die Feuerwehr alles daran, den Lagerhausbrand so rasch wie möglich zu löschen (Preiswerk 2005). Ein sehr hohes zusätzliches Risiko ging zudem von in

der Nähe gelagertem metallischen Natrium aus (Hurni 1988), weil die hohen Brandtemperaturen den Einsatz von Löschschaum verhinderten und deshalb in großem Umfang Wasser zur Brandbekämpfung eingesetzt wurde. Nach dem Brand war die Lagerhalle in sich zusammengesunken und bot ein chaotisches Bild der Zerstörung (Abb. 1C und 1D s. Farbtafel).

Es hatte sich sehr ungünstig ausgewirkt, dass die 90 auf 50 Meter große Lagerhalle 956 ursprünglich als Maschinenlager gebaut worden und erst später für die Lagerung von Chemikalien umfunktioniert worden war. Daraus kann unter anderem abgeleitet werden, warum keine genügend gut funktionierenden Rauchmeldungs- und Sprinklereinrichtungen und auch nur eine Trennwand vorhanden gewesen waren. Es zeigten sich auch schwerwiegende Mängel in der Lagerbuchhaltung, die dazu führten, dass die von der Firma Sandoz nach dem Brand bekannt gegebenen Lagerlisten mehrmals geändert wurden. Insgesamt waren 1.250 t Agrochemikalien und Zwischenprodukte gelagert. In Tab. 1 sind die in Halle 956 gelagerten Produkte und die wichtigsten Wirkstoffe zusammengestellt. Hauptsubstanzen waren Insektizide des Phosphorsäureester-Typs, namentlich Disulfoton, Thiometon und Etrimfos (Capel et al. 1988, DKRS 1986). Die hochgiftigen Quecksilberverbindungen waren als Fungizide in Saatgutbeizmitteln enthalten und wurden jeweils mit dem rot fluoreszierenden Farbstoff Rhodamin B markiert, der seinerseits dann die Rotfärbung des Löschwassers und anschließend des Rheins verursachte (Abb. 1E, s. Farbtafel).

1.2 Umwelt-Emissionen und Schädigungen

Der Hauptanteil der in Lagerhalle 956 enthaltenen Chemikalien verbrannte bei den vorherrschenden Temperaturen, die auch zum Schmelzen der Stahlträgerkonstruktion führten (s. Abb. 1C). Es konnte nicht ermittelt werden, welche Verbrennungszwischenprodukte dabei entstanden waren. Aufgrund der Geruchsbelästigungen wurde angenommen, dass schwefelhaltige Substanzen (Mercaptane) eine wichtige Rolle spielten.

1.2.1 Luft

Die Bevölkerung von Basel und Umgebung erfuhr von der Brandkatastrophe in den frühen Morgenstunden auf sehr unangenehme Weise. Da sich aufgrund der Feuersbrunst über der Agglomeration eine stark riechende Gaswolke ausgebreitet hatte, mussten die Behörden Katastrophenalarm auslösen. In Kleinbasel und in den Gemeinden des Kantons Basel-Landschaft heulten die Alarmsirenen, und in Großbasel patrouillierte die Polizei mit Lautsprecherwagen durch die Straßen und forderte die Bewohner auf, Fenster und Türen zu schließen und die Häuser nicht zu verlassen. Beängstigend war die Lage nicht zuletzt deshalb, weil die Informationen, die den in ihren Häusern feststehenden Bewohnern über das Lokalradio zukamen, unvollständig und widersprüchlich waren, und weil sie während Stunden nicht wussten, wie gefährlich die übel riechende Luftverunrei-

Tab. 1: In der Lagerhalle 956 der Firma Sandoz gelagerte Chemikalien. Aufgrund der Angaben in der Literatur (Capel et al. 1988, DKRS 1986, Hurni 1988)

Produkte	t	Wirkstoffe	t
Insektizide	829	Organophosphorsäureester-insektizide	
		Dichlorvos	0,1
Rodentizide	0,48	Disulfoton	298
		Etrimfos	67
Herbizide	72	Fenithrothion	9,9
		Formothion	0,3
Fungizide	40	Parathion	9,7
		Propetamphos	64
Formulierungshilfsstoffe	91	Quinalphos	0,6
Emulgatoren		Thiometon	130
Stabilisatoren		Quecksilber-basierte Fungizide	
Lösemittel		Ethoxyethylquecksilberhydroxid	1,4
		Phenylquecksilberacetat	1,5
Zwischenprodukte	207	Zink-basierte Pestizide	
Harnstoff		Zineb	0,7
Dodecylbenzen		Zinkphosphid	0,45
3-Aminoaceanilid		Weitere Pestizide	
Aminosulfonsäure		Captafol	0,16
Monoethanolamin		DNOC	65,9
		Endosulfan	2,0
Total	1.246	Metoxuron	11,5
		Oxadixyl	25,2
		Scillorosid	0,03
		Tetradifon	2,3

nigung tatsächlich war. Erst um sieben Uhr morgens wurde Entwarnung gegeben. Man wusste angeblich, dass die Gaswolke keine giftigen Substanzen enthielt und somit keine nachhaltigen Gesundheitsschäden zu erwarten waren.

Es herrschte am frühen Morgen des 1. November 1986 in der Region Basel für lange Zeit Ungewissheit, ob das Großfeuer bei der Sandoz ähnlich katastrophale Folgen haben würde wie vorher die Unfälle von Bhopal, Seveso oder, im April desselben Jahres, von Tschernobyl. Für den Autor dieses Beitrages ist es jedoch nicht nachvollziehbar, wie das Risiko der Luftbelastung mit genügend großer Sicherheit beurteilt werden konnte.

Die Meldung, dass sich in Halle 956 auch 2,3 Tonnen des Milbenbekämpfungsmittels (Akarazid) Tetradifon befanden, kam erst zu einem späteren Zeitpunkt. Da Tetradifon (4-Chlorphenyl-2,4,5-trichlorphenylsulfon) über das 1,2, 4-Trichlorphenol eine gut erkennbare Vorläufersubstanz für die Bildung von Dioxinen, insbesondere des hochgiftigen 2,3,7, 8-Tetrachlorodibenzo-*p*-dioxins ist, wurden anschließend in einem erweiterten Messprogramm polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane in Bodenproben und in den Aktivkohlefiltern der Schutzmasken der Feuerwehrleute gemessen. Dabei wurden glücklicherweise keine erhöhten Belastungen festgestellt.

Aufgrund der schnellen Dynamik von Luftverunreinigungen war es nicht möglich, ausführliche chemische Analysen in der Luft durchzuführen, wie dies später in Wasser und Sedimenten des Rheins, in Grundwasser und Trinkwasser sowie am Brandplatz und im darunter liegenden Boden erfolgte. Das Risiko der Luftverunreinigung durch einen Industriebrand besteht nach wie vor in einem vergleichsweise hohen Maße, wie dies beispielsweise im Juli 2001 anlässlich eines Chemiereaktor-Brandes bei der Ciba Spezialitätenchemie in Schweizerhalle deutlich zutage getreten ist. Auch dieser Brand verursachte eine stark riechende Rauchwolke und zeigte Schwachstellen der Alarmorganisation auf. Eine zuverlässige, notwendigerweise schnell zu erfolgende Charakterisierung und Beurteilung von solchen Luftverunreinigungen basiert immer noch auf einer relativ schwachen Datenlage.

1.2.2 Brandplatz, Boden und Grundwasser

Die Sanierung des Brandplatzes und des verunreinigten Bodens dauerte etwa sechs Jahre. 2.700 t halbverbranntes Material wurden entsorgt. Dazu musste die Sandoz auf dem Lagerplatz eine Halle mit einem speziellen Abluftsystem installieren. Etwa 9 t Pestizide sowie 130 kg organische Quecksilberverbindungen waren in den Boden versickert. Die Schadstoffe konnten bis in eine Tiefe von elf Metern festgestellt werden, wobei die obersten sechs Meter des Bodens am stärksten verunreinigt waren (Munz & Bachmann 1993). Zu den durchgeführten Sofortmaßnahmen gehörten die Absenkung des Grundwassers und die Versiegelung des kontaminierten Bodenbereiches sowie eine Überdachung und Drainageeinrichtungen. In einer gründlichen Risikoanalyse wurde das Ausmaß der Verschmutzung ermittelt und das Umweltverhalten der wichtigsten Schadstoffe beurteilt. Mittels eines aufwändigen Flotationsverfahrens wurde das Gelände dann entgiftet (Hurni 1993, Munz & Bachmann 1993).

1.2.3 Rheinverschmutzung

1.2.3.1 Einträge

Das Industrieareal in Schweizerhalle war mit einem Abwasserkanalsystem ausgerüstet, das für den Fall eines Ölunfalls abgedichtet werden konnte. Die Abdichtungen wurden jedoch in der Brandnacht nicht geschlossen; das Löschwasser in einer Menge zwischen 10.000 und 15.000 m³ hätte allerdings auch bei abgedichtetem Kanalsystem den Weg in den Rhein gefunden. Das rot-gefärbte Löschwasser wurde primär über einen für nicht-verschmutztes Kühlwasser vorgesehenen Ablauf in den Rhein eingetragen (Abb. 1E, s. Farbtabelle). Das Löschwasser enthielt große Mengen der Wirk- und Hilfssubstanzen aus Halle 956, sowie Substanzen, die beim Brand entstanden waren. Dazu gehörten zwar auch ungiftige Hilfschemikalien wie der rote Rhodamin-Farbstoff; doch der größte Teil der Schadstoffe betraf giftige Insektizide, Herbizide und Fungizide. Die frühe Aussage der Firma Sandoz, dass der Rhein mit einem harmlosen roten Farbstoff verunreinigt war, entsprach zwar durchaus den Tatsachen (s. Abb. 1E), war aber leider nicht die vollständige Wahrheit, weil der betreffende Farbstoff tatsächlich eingesetzt wurde, um sehr giftige Quecksilberverbindungen zu markieren. Zum Fischsterben im Rhein siehe Abb. 1F (Farbtabelle) und Abb. 1G.

Abb. 2 (s. Farbtabelle) zeigt für die wichtigsten Pestizid-Wirkstoffe einerseits die in Halle 956 gelagerten Mengen und andererseits die in der Messstation Village-Neuf unterhalb von Basel im Rhein gefundenen Frachten. Die letzteren Werte konnten ermittelt werden, weil in Village-Neuf kontinuierlich flussproportionale Wochensammelproben genommen wurden. Die Station Village-Neuf gehörte zum Schweizerischen Nationalen Programm für die Dauerüberwachung der Fließgewässer (NADUF) und zum Messprogramm der Internationalen Kommission zum Schutze des Rheins (IKSR oder Rheinkommission). Für fast alle Stoffe fanden sich im Rhein Frachten, die ungefähr proportional zu den in Halle 956 gelagerten Mengen waren. Ausnahmen bildeten Oxadi-



Abb. „Die Zeit“, 14.11.1986

Abb. 1G: Fischsterben im Rhein

xyl, DNOC und Atrazin. Die Beobachtung, dass Oxadixyl in späteren Proben immer noch in substantiellen Frachten im Rhein auftrat, wies auf eine chronischer Verunreinigung hin; d.h., diese Substanz wurde sowohl vor und als auch nach dem Schweizerhalle-Brand eingetragen. In Zusammenarbeit mit der chemischen Industrie konnte diese Vermutung überprüft werden, und es gelang in der Folge, die Verunreinigungsquelle zu eliminieren. In Halle 956 war ebenfalls kein Atrazin gelagert; hingegen wurden für dieses Herbizid im Rhein erhöhte Frachten gemessen. Die spezielle Situation, Atrazin betreffend, wurde dadurch verursacht, dass sich bei der Firma Ciba-Geigy im Oktober 1986 ein Störfall ereignet hatte, bei dem Atrazin-verunreinigtes Abwasser in einem Becken zurückgehalten worden war. Wenige Tage vor der Sandoz-Brandkatastrophe wurde damit begonnen, dieses Abwasser in die Kläranlage abzuleiten, in der dann das Atrazin nur teilweise entfernt wurde. Am 31. Oktober und in den Tagen danach gelangten aus der kommunalen Abwasserreinigungsanlage der Stadt Basel und der Industrieabwasserreinigungsanlage Pro Rheno ungefähr 0,4 t Atrazin in den Rhein. Darauf können die erhöhten Atrazinfrachten in Village-Neuf und an den weiteren, flussabwärts-gelegenen Messstellen im Rhein zurückgeführt werden. Anfänglich war vermutet worden, dass sich Ciba-Geigy möglicherweise als 'Trittbrettfahrer' betätigt hatte, um das Atrazin-haltige Abwasser loszuwerden. Der zeitliche Ablauf widerlegte jedoch diesen Verdacht. Die Firma hatte es indessen unterlassen, den Vorfall vorschriftsmäßig zu melden.

1.2.3.2 Die 'Sandoz-Verunreinigungswelle' – Gleichzeitige Messung von chemischen und biologischen Parametern sowie chemodynamisches Verhalten der Verunreinigungen

Abb. 3 (s. Farbtafel) zeigt die für zwei chemische und zwei biologische Parameter bei Bad Honnef (Rhein-Kilometer 640) in Nordrhein-Westfalen gemessenen Werte. Dank des fluoreszierenden Rhodamin-Markierstoffes konnte die Sandoz-Verunreinigungswelle relativ einfach und eindeutig erkannt werden. Die Summe der mittels Gaschromatographie gemessenen Phosphorsäureester-Insektizide stieg bis zu einem Maximalwert von 16 µg/L. Die in den gleichen Proben ermittelten biologischen Wirkungsparameter Daphnientoxizität und Cholinesterase-Hemmung zeigten deutlich die Insektizid-Schadwirkung der Sandozwelle. Diese Ergebnisse stellen einen der seltenen Fälle dar, in denen chemische Konzentrationsmessungen und die Beobachtung von biologischen Schadwirkungen direkt gekoppelt werden konnten. In einem gewissen Sinne kann durchaus von einem Lehrbuchbeispiel gesprochen werden.

Die an vier Messstationen entlang des Rheins gemessenen Disulfoton- und Thiometon-Konzentrationen sind in Abb. 4 (s. Farbtafel) enthalten. Abb. 5 (s. Farbtafel) zeigt eine entsprechende Darstellung der Disulfoton-Frachten und eine Karte des Rheins mit den darin eingezeichneten Messstandorten. Aufgrund der bekannten und teilweise nachgemessenen Substanzdaten und der hydrologischen Verhältnisse im Rhein gelang es, die Sandozwelle mathematisch zu simulieren (Capel et al. 1988, Wanner et al. 1989). Abb. 4B enthält das Ergebnis einer solchen Modellrechnung für Thiometon

und den Vergleich mit den im Rhein gemessenen Konzentrationen. Daraus ist ersichtlich, dass die Modell-Simulation der Sandozwelle durchaus erfolgreich war. Als wichtigste, das Umweltverhalten bestimmende Prozesse, wurden die relativ gute Wasserlöslichkeit (d.h. geringe Sorptionstendenz an den Schwebstoffen und Sedimenten) sowie eine signifikante und relativ schnelle biologische Abbaubarkeit eingesetzt. Die letztere Stoffeigenschaft bewirkte die im Rhein beobachtete Reduktion der Insektizid-Massenflüsse, wie dies in Abb. 5 für Disulfoton dargestellt ist.

1.2.4 Ökologische Schäden im Rhein

Der Deutsche Bericht zum Sandoz-Unfall (DKRS 1986) und später Güttinger und Stumm (Güttinger & Stumm 1990) sowie Burkhardt-Holm et al. (1990) und Spazier et al. (1992) enthalten ausführliche beziehungsweise zusammenfassende Darstellungen der im Rhein aufgetretenen Verunreinigungen und Schädigungen. Die Verunreinigung des Rheins durch die im Löschwasser eingetragenen Schadstoffe hatte im November 1986 in katastrophaler Weise die Flusslebewesen einschließlich der Fische geschädigt. Besonders auffallend war das Aalsterben von Schweizerhalle (km 159) bis hinunter zum Rheinkilometer 560 (Loreley vor Koblenz).

Aber auch andere Fischarten wie Äschen, Bachforellen, Hechte, Zander wurden stark geschädigt. Die Fischnährtiere im unmittelbaren Unfallbereich erlitten akute Vergiftungen, während die Wirkung unterhalb von Bad Honnef (km 640) nur noch schwach nachweisbar war. 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 überdeckte schon wenige Monate später den offensichtlichen Schaden. Eine Diskussion der Änderungen der Artenzusammensetzung folgt in Kap. 5.1 dieses Beitrages. Dass das Ausmaß des Schadens nicht noch größer war, ergab sich daraus, dass der Rhein einer bedeutenden Dauerbelastung mit chemischen Stoffen ausgesetzt und das Flussbett durch bauliche Veränderungen stark gestört war beziehungsweise immer noch ist; daher waren die meisten empfindlichen Arten schon vor dem Unfall nicht mehr vorhanden.

Güttinger und Stumm versuchten die aufgetretenen Schädigungen in Beziehung zu den ökotoxikologischen Stoffwerten zu bringen. Die Aalpopulation wurde bei einer Spitzenkonzentration der Phosphorsäureester von 10–20 µg/L (bei km 500–600) akut geschädigt. Aufgrund der bekannten Toxizitätswerte wirkt nur Endosulfan in diesem Konzentrationsbereich akut toxisch. Leider gab es damals aber weder LC50-Werte für Aale, noch wurde die effektive Endosulfan-Konzentration im Rhein gemessen. Tote Äschen und Forellen wurden bis fast hinunter nach Mainz gefunden. Die entsprechende, in 96 h nicht unterschrittene Konzentration der Phosphorsäureester betrug etwa 5 µg/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 Schädigung verantwortlich war, lässt sich nicht sagen. Es ist aber klar, dass akut toxische Wirkungen schon bei wesentlich kleineren Konzentrationen auftraten, als aufgrund der LC50-Werte erwartet werden musste. Die Kombinationswirkung der zusammen eingeleiteten Stoffe muss ebenso berücksichtigt werden wie die Tatsache, dass die durch den Brand eingetragene Verunreinigung sich zur vorhandenen chronischen Belastung addierte. Die Dauer der Exposition nahm flussabwärts trotz der Verdünnung durch die Zuflüsse für die meisten Parameter zu, womit auch erklärt werden kann, warum die kleinen Konzentrationen der Sandoz-Schadstoffe in den Niederlanden immer noch Schadefekte bewirkten. Es geht also darum, die Störung im Verhältnis zu der chronischen Belastung und der natürlichen Variation festzustellen und zu bewerten. Der natürliche Referenzzustand ist jedoch vielfach nicht mehr beobachtbar.

1.2.5 Beeinträchtigung der Trinkwasserversorgungen und des Grundwassers

Als Vorsichtsmaßnahmen mussten die rheinanliegenden Wasserwerke während mehr als 18 Tagen ihren Betrieb teilweise einstellen. Im Nachhinein kann festgehalten werden, dass aufgrund der oben erwähnten biologischen Abbaubarkeit die Sandoz-Schadstoffe bei der Uferfiltration eliminiert worden und somit nicht in das aufbereitete Trink-

wasser vorgedrungen wären. Analoges gilt für die durch Uferfiltrat aus dem Rhein gespeisten Grundwasser. Ebenfalls nicht betroffen wurde der unmittelbar neben Schweizerhalle im Hardwald gelegene Grundwasserkörper mit der damit verbundenen künstlichen Grundwasseranreicherung. Letzteres war im wesentlichen durch die günstige hydrologische Situation im Grundwasserträger begründet.

2 Maßnahmen der Industrie, gesetzliche Verordnungen und Aktivitäten von Umweltschutzinstitutionen

Die durch den Schweizerhalle-Unfall ausgelöste politische Entwicklung des Rheinschutz-Regimes hat sich in einem positiven Sinne auf den Umweltschutz ausgewirkt. In Tab. 2 sind einige wichtige Maßnahmen und Aktivitäten der chemischen Industrie, von Umweltschutzinstitutionen und Behörden zusammengestellt. Ebenfalls aufgeführt sind einige Lehren, die aufgrund der Schweizerhalle-Katastrophe von 1986 gezogen werden können. Im weiteren sind Forschungsprojekte und Entwicklungen im Hochschulbereich angegeben, die durch die Schweizerhalle-Katastrophe zumindest teilweise ausgelöst worden sind.

Nach der Brandkatastrophe von 1986 wurden große Anstrengungen unternommen, um den weithin sichtbaren Schädigungen des Ökosystems Rhein in nachhaltiger Weise entgegenzuwirken. Aufgrund der Katastrophe von 1986 war das Vertrauen in die Selbstkontrolle der chemischen Industrie stark erschüttert worden. In der Schweiz waren Maßnahmen der Behörden wie die Schweizerische Störfallverordnung und die Schaffung von Chemiekontrollstellen unmittelbare Folgen des

Tab. 2: Lehren und mittel- bis langfristige Auswirkungen des Schweizerhalle-Brandes

Lehren	Industrielle und institutionelle Maßnahmen
<ul style="list-style-type: none"> • Bei genügend hohen Temperaturen sind im Prinzip alle Chemikalien brennbar, auch diejenigen, die nicht als direkt brandgefährdet eingestuft werden. • Bei der Brandbekämpfung mit Wasser entstehen große Mengen von verunreinigtem Löschwasser. • Chemisch-analytische Messungen erfassen primär die bekannten Wirkstoffe. • Hydrolytische und pyrolytische Folgeprodukte werden nur sehr selten gemessen. • Die ökotoxikologische Beurteilung von komplexen Schadstoffgemischen ist ausgesprochen schwierig. Es sind nur sehr wenig absehbar, die zur Lösung dieses Problemes für die Gewässerschutzpraxis beitragen könnten. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Sicherheit von Chemikalien- und namentlich Agrochemikalienlagern: Brandschutzwände, Stoffseparierung, Rauchmelder, Sprinkler, Erstellung von Auffangvorrichtungen für Abwasser und verunreinigtes Löschwasser • Verbesserte Überwachung der Kühlwasserströme und Umleiten des Kühlwasserabflusses bei Unfällen • Ausbau der Messstationen am Rhein für die Überwachung der chemischen Wasserqualität und von biologischen Schädwirkungen • Internationale Kommission zum Schutze des Rheins (IKSR): Aktionsprogramm Rhein, Lachs 2000, Rhein & Lachs 2020 • Internationale Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke im Rheineinzugsgebiet (IAWR): Rhein Memorandum 1973, 1986, 1995, 2003
Gesetzliche Maßnahmen in der Schweiz und in der Europäischen Union	Forschungsprojekte, Ausbildung
<ul style="list-style-type: none"> • Schweizerische Störfallverordnung vom 1. April 1991 : Kontrollierte Eigenverantwortung, Deklaration von Gefahrenpotential und Risiko, Risikokataster, Rückhaltebecken für Löschwasser ('Sandozbecken'), Lagerlisten • Kontrollstelle für Chemiesicherheit, Gift und Umwelt, Kanton Basel-Stadt • Sicherheitsinspektorat, Kanton Basel-Landschaft • Chemiedatenbank, Archiv für Chemieunfälle • Überarbeitung der Brandschutz- und Brandbekämpfungsvorschriften • Vorschriften Revisionen der EU-Direktiven über Risiken von gefährlichen Stoffen (Seveso-Direktive) 	<ul style="list-style-type: none"> • Umweltforschungsprogramme: <ul style="list-style-type: none"> – Sandoz-Rheinfonds – Rhine Basin Program der Hewlett-Packard • Projekt 'Mensch, Gesellschaft und Umwelt', Universität Basel • Lehrfach 'Management und Umwelt', Wirtschafts-Hochschule INSEAD (Institut européen d'administration des affaires), Fontainebleau • Stiftungsprofessur für Umweltanalytik, Universität Karlsruhe • Studiengang Umweltnaturwissenschaften, ETH Zürich

Brandes von Schweizerhalle. Die Schweizerische Störfallverordnung schließt auf der gesetzgeberischen Seite die Lücken in den Lagerhaltungsvorschriften. Beispielsweise sind nun Rückhaltebecken für möglicherweise anfallendes Löschwasser vorgeschrieben. Die Störfallverordnung hat das Ziel, das Gefahrenpotenzial zu senken, Störfälle zu verhindern und die Auswirkungen bei einem Unfall zu begrenzen. Aufgrund eines Risikokatasters wurden in der Schweiz ungefähr 200 Unternehmen mit einem chemischen Gefahrenpotenzial identifiziert und der Störfallverordnung unterstellt. Diese Betriebe müssen eine Risikoermittlung durchführen, Störfallszenarien aufzeigen und das damit verbundene Risiko abklären. In den Kantonen Basel-Stadt und Basel-Landschaft wurde die Umweltschutz-Verwaltung ausgebaut. Es wurden spezielle Stellen für die Katastrophenvorsorge und den Katastrophenschutz geschaffen.

Wesentlich verstärkt wurde die Tätigkeit der Rheinschutzkommission (IKSR 1994, 2003). Die Rheinschutzkommission inventarisierte zunächst Lager und Produktionsstätten im Rheineinzugsgebiet und gab Empfehlungen zur 'Störfallvorsorge und Anlagensicherheit'. Brandschutzkonzepte sollten Brände vermeiden, durch bauliche Maßnahmen sollte eine Ausbreitung behindert und durch das Auffangen des Löschmittels sollten Folgeschäden verhütet werden. Alle Behälter, die mit gefährlichen Stoffen gefüllt werden, sollten Überfüllsicherungen haben, die den Füllvorgang selbsttätig unterbrechen oder hörbaren Alarm auslösen.

Die Betriebe müssen Abdichtungssysteme mit Auffangwanne für Leckagen und Störfälle einbauen. Stoffe, die miteinander gefährlich reagieren können, z.B. explosiv, dürfen nicht zusammen gelagert werden. Große Mengen brennbaren Materials sollen getrennt lagern. Abwasserteilströme sind empfehlenswert, die Industrieabwässer, Regenwasser und Kühlwasser trennen. Anzustreben ist die Vermeidung oder Minimierung von Abwasser, beispielsweise durch geschlossene Kreisläufe. Beim Umschlag und Abfüllen der Ladung von Schiffen, Lastwagen oder Bahn in Lagerhallen oder umgekehrt dürfen keine gefährlichen Stoffe in die Gewässer gelangen. Die Anlagenüberwachung in den Betrieben muss rechtzeitig erkennen, wenn gefährliche Stoffe freigesetzt werden. Betriebliche Alarmpläne müssen Rettungsmaßnahmen bei Störfällen genau auflisten.

Die chemische Industrie hat in den letzten zwei Jahrzehnten enorme Anstrengungen unternommen, um das Risiko von Umweltverschmutzungen zu verkleinern. Dazu gehören eine rigorose Organisation der Chemikalienlager und ein gut entwickeltes Kühlwasser- und Abwassermanagement. In Betrieben mit gefährlichen Stoffen wurden die Lager verkleinert oder aufgeteilt und Rückhaltebecken für Löschwasser erstellt. Genaue Eingangs- und Ausgangsstatistiken geben nun jederzeit Auskunft über die Menge und den genauen Ort der gelagerten Stoffe.

3 Thesen zu Umweltforschung und Risikobeurteilung – Lehren von Schweizerhalle

Güttinger und Stumm (1990) stellten acht Thesen zusammen, die weitgehend auch mehr als 15 Jahre später immer noch Gültigkeit haben. Einige dieser Thesen wurden in spätere

Entwicklungen umgesetzt (EU-Chemikaliengesetz REACH, Schweizerische Chemikaliengesetzgebung; Vorsorgeprinzip). Drei Thesen, die sich spezifisch auf die Schweizerhalle-Katastrophe von 1986 beziehen, sind im folgenden auszugsweise wiedergegeben.

I. Akute Umweltkatastrophen sind Einzelfälle und in ihrem Ablauf nicht vorhersehbar. Sie müssen daher möglichst vermieden oder in ihren Auswirkungen begrenzt werden. 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.

II. Akute Schädigungen von Biozönosen 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. Dies ist dem Umstand zu verdanken, dass in der Nähe des Unfallortes vor allem nur ein Ufer betroffen war und Zuflüsse sowie Seitenarme des Rheins die Flucht und die Einwanderung von gesunden Tieren ermöglicht hatten.

III. Umweltkatastrophen sind, sofern sie nicht ein großes Ausmaß und eine große Häufigkeit aufweisen, gesamtökologisch weniger gravierend als die chronische Vergiftung der 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 Biozönosen und zu irreversiblen Verlust an genetischer Vielfalt.

In These I enthalten war auch die Aussage, "dass es nichts nützt, 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 verhindert noch ihre Auswirkungen verringert". Dieser Aussage widerspricht der Autor dieses Beitrages, weil die mannigfaltigen Ergebnisse der chemischen Überwachungsstationen Anlass zu einer gegenteiligen Folgerung ergeben. Beim Sandozunfall beispielsweise haben die Sammelproben einer flussabwärts vom Unfallort gelegenen Überwachungsstation sehr wertvolle Analyseergebnisse geliefert, die bei der Aufarbeitung der Rheinverunreinigung eine wichtige Rolle gespielt haben. Es gibt auch eine ganze Reihe von Beispielen dafür, dass die chemischen und biologischen Überwachungsstationen Verunreinigungen aufdeckten, die vorher nicht bekannt oder zumindest nicht gemeldet worden waren (Diehl 2005, Rheinüberwachungsstation ab 2002). Ähnliches gilt für die Überwachungsaktivitäten der Trinkwasserwerke, die mit ihren Analysen die Qualität der für die Trinkwasseraufbereitung genutzten Rohwasser kontrollieren (AWBR 2005, RIWA 2005).

4 Überwachung der chemischen und biologischen Wasserqualität

4.1 Messstationen und Messprogramme

Vor 20 Jahren verfügte die Schweiz am Rhein nur über ein wenig ausgebautes System für die Überwachung der chemischen Wasserqualität. Es gab zwar bereits mehrere gut ausgerüstete Probenahmestationen, die im Rahmen des schweizerischen Flussüberwachungsprogrammes Naduf und als Messstationen der Internationalen Rheinschutzkommission betrieben wurden. Gemessen wurden aber hauptsächlich konventionelle Wasserparameter und einige anorganische Verunreinigungen (Schwermetalle, Phosphat, Nitrat). Spezifische organische Schmutzstoffe wurden nur sporadisch untersucht (z.B. NTA, ein Waschmittelphosphat-Ersatzstoff, und Nonylphenole, Abbauzwischenprodukte einer reinigungsaktiven Substanz). In der Folge der Schweizerhalle-Katastrophe wurde die Naduf-Station bei Village-Neuf durch die internationale Rheinüberwachungsstation in Weil am Rhein ersetzt, die seit 1993 durch die Schweiz und das Land Baden-Württemberg gemeinsam betrieben wird, wobei die Wasseranalysen im chemischen Labor des Basel-städtischen Amtes für Umwelt und Energie durchgeführt werden. Dank der Messstation in Weil am Rhein wird nun unterhalb von Basel auf einem ähnlichen hohen Fachniveau analysiert wie in den deutschen und holländischen Stationen am Mittel- und Niederrhein. Ungefähr 240 einzelne Substanzen werden regelmäßig überwacht, und auch bisher nicht beobachtete Substanzen werden erfasst (Rheinüberwachungsstation ab 2002). Ein Beispiel: Die Wasseranalysen ergaben anfangs 2006 Hinweise auf eine Rheinverschmutzung durch 4,5 t des giftigen Dimethylanilins. Selbst die verursachende Firma hatte vorher keine Kenntnis von dieser Gewässerverunreinigung.

Die Rheingütestation Worms ist ein wichtiger Teil der Überwachungskette entlang des Rheins. In dieser Station werden vor allem auch Online-Biotestverfahren eingesetzt, mit denen es schon gelungen ist, Verunreinigungen zuerst biologisch zu erkennen und anschließend mit Hilfe der chemischen Analytik die Verursacher zu identifizieren (Diehl 2005).

Die Wasserwerke im Rheineinzugsgebiet betreiben ebenfalls aufwändige und umfassende Wasseranalytik und berichten darüber in den Jahresberichten AWBR (Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke Bodensee-Rhein, seit 1969 (AWBR 2005)) und der RIWA (Rhine Water Work Association, Holland (RIWA 2005)). Das Messprogramm wird jährlich evaluiert und, falls erforderlich, angepasst. Mit Hilfe von Trenduntersuchungen wird die Verbesserung oder Verschlechterung der Wasserqualität ermittelt.

Die analytischen Laboratorien der Wasserwerke sind mit modernsten analytischen Geräten ausgerüstet. Zum Beispiel wird die direkt an die Flüssigchromatographie gekoppelte Tandem-Massenspektrometrie eingesetzt, um quantitative Spurenbestimmungsmethoden für sogenannte neu auftauchende Verunreinigungen (Emerging Contaminants) zu entwickeln. Zur Zeit stehen im Vordergrund: Arzneimittelrückstände einschließlich Antibiotika und iodierter Röntgenkontrastmittel, polare Pestizide, MTBE, ETBE, Diglyme und Triglyme, Benzotriazol-Korrosionsschutzmittel und seit kurzem auch perfluorierte Tenside.

In den letzten Jahren studierte eine Arbeitsgruppe an der Eawag (Eawag: Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs) das Umweltverhalten der schwer abbaubaren Chemikalie Benzotriazol, die unter anderem als Silberschutz in Geschirrspülmitteln enthalten ist (Giger et al. 2006, Voutsas et al. 2006). Das Benzotriazol wird in den Kläranlagen nur zu einem kleinen Anteil eliminiert und gelangt deshalb in die Flüsse und Seen. Die in den Rheinwasserproben von Weil am Rhein gefundenen Konzentrationen ergaben Frachten von teilweise über 200 kg pro Woche. Dieses Beispiel zeigt, dass kontinuierliche Einträge von persistenten Haushaltschemikalien auch zu substantiellen Restgehalten in den Gewässern führen können. Eine Stoßbelastung, wie sie in Schweizerhalle vor 20 Jahren erfolgte, ist durch ihre Schädwirkung klar erkennbar. Sie hat deshalb Gegenmaßnahmen bewirkt, die sich langfristig positiv auswirken. Stärker beachtet werden müssen jedoch die nicht offensichtlichen, chronischen Wasserunreinigungen, zu denen jeder Einzelne beiträgt, und zwar je nach Konsumverhalten in unterschiedlichem Ausmaß.

4.2 Warn- und Alarmplan Rhein

Falls trotz aller Vorsorgemaßnahmen ein Störfall passiert und Schadstoffe in erheblichen Mengen in den Rhein fließen, greift der internationale Warn- und Alarmplan Rhein, der alle Rheinanliegerstaaten und vor allem die Unterlieger warnt. Nach Meldung eines Störfalles gibt eine der sieben Hauptwarnzentralen zwischen Basel und Arnhem den Alarm an alle stromabwärts gelegenen Zentralen, örtliche Dienststellen und Wasserversorger weiter. Die Messstationen der IKS und der Rheinanliegerstaaten kontrollieren das Rheinwasser ständig chemisch und teils auch durch Biotests. Ergänzt wird der Warn- und Alarmplan durch das Rhein-Alarmmodell, das alle Warnzentralen einsetzen. Das Computermodell kann den Verlauf der Schadstoffwellen im Rhein vom Bodensee bis zur Nordsee vorhersagen. Auch für die Nebenflüsse Aare, Neckar, Main und Mosel kann es den Durchfluss von Giftwellen bei unterschiedlichen Abflüssen berechnen. Die Anzahl der Meldungen ist seit Ende der 80er Jahre von fast 60 Meldungen auf etwa 15 pro Jahr deutlich zurückgegangen. Genauere Untersuchungen des Unfallgeschehens am Rhein zeigen, dass die Zahl der Stör- und Unfälle in der Industrie stark abgenommen hat, da die innerbetriebliche Vorsorge sehr verbessert worden ist. Wenn heute aufgrund von Unfällen Schadstoffe den Rhein verunreinigen, melden sich die Industriebetriebe in der Regel selbst. Ölverschmutzungen durch Schiffe werden dagegen selten aufgeklärt.

Die Resultate der Rheinüberwachungsstationen ergeben insgesamt ein positives Bild. Deutlich zurückgegangen ist die Belastung mit Nährstoffen vor allem aus häuslichen Abwässern, Schwermetallen und mit in den Kläranlagen abbaubaren organischen Stoffen. Um durchschnittlich 3°C zugenommen hat hingegen die Temperatur des Rheinwassers. Hauptursache dafür ist der allgemeine Anstieg der Temperaturen in den letzten Jahren. Nicht gerade förderlich sind die vielen Kühlanlagen (Atomkraftwerke), die Wasser aus den Flüssen verwenden.

5 Langfristige, biologische Auswirkung

5.1 Erholte, aber teilweise veränderte Flussbiologie

Wie die Fachleute der Eawag vor 20 Jahren richtig vorausgesagt hatten, erholten sich die Organismen im dynamischen Fließgewässer-System in relativ kurzer Zeit. Unterstützt wurde diese Wiederbelebung unter anderem durch (z.T. hochwasserbedingte) Spüleffekte und durch Einwanderung von Organismen aus Oberlauf, Zuflüssen und Seitenarmen. Dank der erstaunlich rasch ergriffenen Maßnahmen der verantwortlichen Behörden und der Wirtschaft scheint sogar das ehrgeizige Ziel der Wiederbesiedlung durch edle Wanderfische, insbesondere durch den Lachs, in nicht mehr ferner Zukunft erreichbar zu sein, auch wenn das ursprüngliche Programm 'Lachs 2000' mittlerweile mit dem neuen Programm 'Rhein & Lachs 2020' zeitlich hinausgezögert worden ist. Die Haupthindernisse sind nicht mehr chemischer, sondern physikalischer Natur, sprich die durch Stauwehre und Turbinen der Elektrizitätswerke behinderte Durchgängigkeit des Rheins.

Der Lachs war früher weit im Rhein verbreitet. Wegen der starken Wasserverschmutzung und baulichen Umstrukturierungen des Flusses (Stauwehre, betonierte Kanäle) verschwand der Lachs Mitte des 20. Jahrhunderts aus dem Rhein. Aufgrund der verbesserten Wasserqualität wird die Wiedereinbürgerung des Lachses durch die zwei oben erwähnten, grenzübergreifenden Programme 'Lachs 2000' und 'Rhein & Lachs 2020' auch politisch vorangetrieben. Inzwischen zeichnen sich erste Erfolge bei der Wiederherstellung der Durchwanderbarkeit einzelner Flussabschnitte ab. In den Jahren 2004 und 2005 konnten in zwei Zuflüssen des südlichen Oberrheins neue Lachslaichgruben nachgewiesen werden.

Eine negative Entwicklung wurde unter anderem durch Wissenschaftler am Institut für Natur-, Landschafts- und Umweltschutz der Universität Basel (Baur & Schmidlin 2006) und durch eine Arbeitsgruppe des schweizerischen Bundesamts für Umweltschutz (Rey et al. 2004) beobachtet. Die Tierwelt erholte sich zwar unerwartet rasch von den Folgen der Brandkatastrophe. Viele Kleintierarten besiedelten den abgestorbenen Teil des Rheins aus Abschnitten, die oberhalb von Schweizerhalle liegen, sowie aus einmündenden Nebenflüssen. Gleichzeitig wurden aber unbeabsichtigt neue, exotische Arten aus anderen Kontinenten, wie der Schlickkrebs und die Körbchenmuschel, mit Schiffen in den Rhein eingeführt. Diese exotischen Arten können gut mit veränderten Umweltbedingungen umgehen, sind sehr konkurrenzstark und verdrängen einheimische Arten. Die auf der Flusssohle lebenden wirbellosen Organismen (Krebse, Muscheln, Schnecken, Würmer) werden zunehmend von nicht einheimischen Arten bedroht. Die Forscher gehen davon aus, dass auch die Schweizerhalle-Katastrophe kurzfristig freie ökologische Nischen geschaffen und dadurch die Ansiedlung exotischer Arten erleichtert hat. Vor allem durch die Schifffahrt werden ständig neue Arten eingeschleppt, die sich insbesondere bei Schwächung der einheimischen Arten erfolgreich gegen diese durchsetzen können. Die Zunahme der exotischen Arten im Rhein zeigt einen ungebremsten exponentiellen Verlauf. So hat sich innerhalb von 10 Jahren die

Artenzusammensetzung der wirbellosen Kleintiere im Rhein bei Basel dramatisch verändert. Mehr als 90% der Biomasse besteht nun aus exotischen Arten. Die Wissenschaft macht sich Sorgen um das längerfristige Überleben der spezialisierten einheimischen Wassertiere. Die Lebensgemeinschaft des Rheins befindet sich in ständiger Suche nach neuen Gleichgewichten und wird dabei immer wieder durch menschliche Eingriffe gestört.

6 Die Situation 20 Jahre danach und Ausblick

Nach 20 Jahren zieht die IKSR eine insgesamt positive Bilanz (siehe IKSR 2003 sowie www.iksr.org). Dabei wird einmal von den unmittelbaren Schäden an den Flusslebewesen und Fischen vom November 1986 abgesehen. Das Rheinwasser ist deutlich sauberer, Störfälle kommen seltener vor, Lachse wandern wieder bis in den Oberrhein und laichen in Nebenflüssen. Es kann auch beobachtet werden, dass der Rhein wieder zu einem Badegewässer geworden ist. Und jetzt, wie geht es weiter? Für die IKSR gibt es eine neue Vision vom Rhein: Über weite Bereiche begleitet ein grünes Band von Auen den Strom, das Hochwasser aufnimmt und viel amphibisches Leben aufweist. Die Artenvielfalt von rheintypischen Tieren und Pflanzen steigt weiter an. Lachse wandern bis in den Raum Basel und erhalten ihren Bestand ohne Besatz. Rheinfische und Rheinmuscheln sind eine begehrte Delikatesse... Um diese Vision zu verwirklichen, stellte die IKSR zu Beginn des 21. Jahrhunderts ein neues Programm vor. Das Programm 'Rhein & Lachs 2020' (IKSR 2004) setzt seine Schwerpunkte in den Bereichen Ökologie, Naturschutz, Hochwasservorsorge und Grundwasserschutz. Daneben soll die Wasserqualität weiter überwacht und verbessert werden. Im Januar 2001 haben die Rheinminister dieses 'Programm zur nachhaltigen Entwicklung' des Rheins verabschiedet. Es wird die Forderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie und der gleichartigen Wasserpolitik der Schweiz im Einzugsgebiet des Rheins umsetzen.

Die Wasserrahmenrichtlinie der EU von 2000 betrachtet ein Flusseinzugsgebiet als Ganzes, fordert eine integrative Bewertung und Bewirtschaftung, stellte eine Liste von prioritären Stoffen auf, setzt einen Schwerpunkt auf biologische Indikatoren, definiert den guten chemischen und ökologischen Zustand und setzt als Frist für das Erreichen des guten Zustandes in allen europäischen Gewässern das Jahr 2015. Wie die Erfahrungen allerdings gezeigt haben, ist es nicht einfach, den guten chemischen und biologischen Gewässerzustand konkret zu umschreiben. Um die Ziele und Visionen zu verwirklichen, nennt das Programm 'Rhein & Lachs 2020' zahlreiche konkrete Aktionen – mit genauen Flächenangaben und zeitlichen Fristen. Die Aktionen ergänzen und verstärken sich gegenseitig. So fördert extensivere Landwirtschaft in den Auen Naturschutz und Wasserqualität, weil weniger Nähr- und Schadstoffe in Grund- und Oberflächenwasser geraten.

Die Europäische Union hat mit der Wasserrahmenrichtlinie im Jahr 2000 ein in den EU-Staaten rechtlich verbindliches Instrument geschaffen, mit dem bis 2015 der gute Zustand aller Gewässer in Europa erreicht werden soll. Für die Rheinkommission stehen zur Zeit die ökologischen Kriterien im

Vordergrund. Eine große Herausforderung für die Staaten im Rheineinzugsgebiet wird der bei der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie anstehende Abwägungsprozess zwischen dem Gewässerschutz auf der einen Seite und den Nutzungen des Rheins für Schifffahrt, Energiegewinnung, Hochwasserschutz usw. auf der anderen Seite sein.

Anders wird die Situation von der IAWR beurteilt, in der sich über 120 Wasserwerke aus den sechs Anrainerstaaten Österreich, Schweiz, Fürstentum Liechtenstein, Frankreich, Deutschland und den Niederlanden zusammengeschlossen haben. In diesem Gebiet sind etwa 30 Millionen Menschen auf das Wasser des Rheins, seiner Nebenflüsse sowie der Seen in seinem Einzugsgebiet für die Trinkwasserversorgung angewiesen. Ungefähr 20 Millionen Menschen nutzen Trinkwasser, das aus Rheinwasser gewonnen worden ist.

Die IAWR fühlt sich einer nachhaltigen Wasserwirtschaft verpflichtet. Ihr Ziel ist es, den Rhein, seine Begleitgewässer und die Voralpenseen so zu schützen, dass die Gewässerqualität es erlaubt, mit lediglich natürlichen Aufbereitungsverfahren Trinkwasser zu gewinnen. Die IAWR setzte in ihrem vierten Rhein-Memorandum 2003 einen deutlichen Kontrapunkt zur Meinung der Rheinkommission und zur EU-Wasserrahmenrichtlinie. Die IAWR fordert mit Nachdruck einen nachhaltigen Gewässerschutz und überarbeitete Zielwerte für Wasserinhaltsstoffe einschließlich Vorsorgewerte für ganze Stoffgruppen. Es ist aus Sicht der IAWR nicht ausreichend, wenn die Beurteilung der Qualität der Gewässer, wie bislang im Rahmen der Bestandsaufnahme praktiziert, bei der Festlegung der Stofflisten und Qualitätsziele überwiegend nach ökotoxikologischen Kriterien erfolgt und die trinkwasserrelevanten Parameter nicht oder nur ungenügend berücksichtigt werden. Trinkwasserrelevante Substanzen müssen, auch wenn sie aus ökotoxikologischer Sicht derzeit noch nicht auffällig sind, in den Gewässern minimiert werden.

Das Rhein-Memorandum 2003 der IAWR (IAWR 2003) stützt sich auf die folgenden zehn Kernaussagen:

1. Trinkwassergewinnung mit natürlichen Verfahren. Vorrangiges Ziel des Gewässerschutzes muss es sein, den Wasserwerken im Rheineinzugsgebiet jederzeit die Gewinnung mit natürlichen Verfahren zu ermöglichen. Solche Verfahren sind beispielsweise die Uferfiltration oder die Sandfiltration.

2. Vorsorge: Aus Vorsorgegründen müssen hohe Anforderungen an die Gewässer, aus denen Trinkwasser gewonnen wird, gestellt werden. Sie orientieren sich neben dem Vorbild intakter ökologischer Gewässer auch an neuesten toxikologischen Erkenntnissen. Die IAWR-Mitgliedsverbände unterhalten ein eigenes Messnetz, bestimmen in wissenschaftlichen Untersuchungen das Verhalten von Schadstoffen und passen gegebenenfalls die Aufbereitungsverfahren an.

3. Vorbild Ökologie. Ökologisch intakte Gewässer sind eine wichtige Voraussetzung für eine langfristig sichere Trinkwasserversorgung; nicht zuletzt aus diesem Grunde wird sehr betont, dass Ökologie und Trinkwassergewinnung durchaus kein Widerspruch sind.

4. Vermeidung von naturfremden Belastungen. Naturfremde Stoffe, die mikrobiell nur schwer abbaubar oder gesundheitlich bedenklich sind, gehören nicht in die Gewässer. Aus

Vorsorgegründen gilt dies für alle naturfremden Stoffe; nicht nur für die, deren toxikologische Relevanz bereits heute nachgewiesen wurde.

5. Vermeidung von punktuellen Belastungen. Punktuelle Einträge aus Industrie und Kläranlagenabläufen müssen weiter reduziert werden. Dies gilt vor allem für kleine und wasserarme Gewässer. Hormonell wirksame Substanzen, Arzneimittel und Biozide sowie andere in Haushalt und Industrie verwendete Stoffe haben nichts im Gewässer zu suchen.

6. Verminderung von diffusen Belastungen. Schadstoffquellen und Abschwemmungen von bebauten Gebieten und landwirtschaftlich genutzten Flächen, Auslaugung von Abfalldeponien und Regenüberläufe müssen reduziert werden. Persistente Pestizide z.B. müssen schnellstmöglich durch mikrobiell abbaubare Stoffe reduziert werden und Randstreifen entlang der Gewässer dürfen weder gedüngt noch mit Pestiziden behandelt werden.

7. Strengere Hygienemaßstäbe. Die Belastung der Gewässer muss auch hinsichtlich hygienischer Parameter verbessert werden und insbesondere die Einleitung von mit Bakterien, Parasiten und Viren belasteten ungereinigtem Abwasser muss unterbleiben.

8. Begrenzung der Störfälle. Störfälle führen zu kurzzeitigen Belastungen der Gewässer mit Schadstoffen und stellen deshalb eine erhebliche Gefahr für die Trinkwassergewinnung dar. Ziel muss es sein, auch für die Störfallvorsorge den besten Stand der Technik einzuhalten.

9. Unverzichtbare staatliche Aufsicht. Die Überwachung der Gewässer ist eine hoheitliche Aufgabe. Die IAWR erwartet, dass aus Vorsorgegründen die Behörden die Gewässer regelmäßig auch auf neue Stoffe untersuchen und die Wasserwerke über das Vorkommen und das Verhalten dieser Stoffe einschließlich deren toxikologischer und trinkwasserrelevanter Eigenschaften zeitnah und umfangreich unterrichten.

10. Gemeinsame Verantwortung. Vorsorgender Gewässerschutz erfordert die Mitwirkung aller; dazu gehört der verantwortungsbewusste Umgang mit Stoffen und Produkten ebenso wie die Anforderung an Behörden und Hersteller, die Bevölkerung über die Auswirkungen von Produkten auf die Umwelt zu informieren.

Zur Konkretisierung dieser Anforderungen sind im Rhein-Memorandum 2003 Zielwerte für Oberflächengewässer definiert für allgemeine Kenngrößen sowie für gelöste anorganische und organische Stoffe.

Zielwerte für anthropogene naturfremde Stoffe wurden festgelegt beispielsweise für Pestizide, endokrin wirksame Stoffe, Arzneimittel, Biozide oder andere organische Halogenverbindungen und synthetische Komplexbildner.

Die IAWR fordert, dass für die Bestimmung der Trinkwasserrelevanz von Stoffen die Faktoren *Persistenz* und *Exposition* gegenüber der *Toxizität* stärker gewichtet werden sollten. Hintergrund ist die Belastung einiger Gewässer mit üblicherweise gut wasserlöslichen und gleichzeitig sehr langlebigen Substanzen mit hoher Exposition für Mensch und aquatische Lebensgemeinschaften, die ansonsten durch das Bewertungsraster fallen würden (z.B. Komplexbildner). Dieses

Ranking ist kongruent mit dem im REACH-Prozesses kürzlich in der Europäischen Union verabschiedeten Vorgehen. Zur Verringerung der in den Gewässern gefundenen Gehalte an Medikamentenwirkstoffen und Röntgenkontrastmitteln sollte nach Auffassung der IAWR wie bei den Pestiziden oder den veterinärmedizinischen Produkten deren Wassergefährdung bei der Zulassung berücksichtigt werden.

Falls im 21. Jahrhundert sich im Rheineinzugsgebiet wieder ein ähnlicher Brand ereignen würde, so wären auf wichtigen Gebieten bessere Vorkehrungen getroffen. Vor allem die nun zur Verfügung stehenden Rückhaltebecken für Löschwasser wären sehr vorteilhaft. Hingegen würde die Erfassung und Beurteilung der Luftverunreinigung nach wie vor große Probleme bringen (vgl. Ciba-Brand im Juli 2001). Der schweizerische Chemieindustrie-Standort Basel verursacht jetzt ein viel kleineres Risiko, unter anderem weil hauptsächlich nur noch Forschung und Entwicklung betrieben sowie Arzneimittel und Spezialitätenchemikalien hergestellt werden. Die Produktion und Lagerung der risikoreicheren Agrochemikalien ist an andere Orte verlagert worden. Eine absolute Garantie für die Verhinderung jeglicher größerer Störfälle kann aber nicht gegeben werden. Beim Gütertransport auf Schiene, Straße und Fluss gibt es nach wie vor beträchtliche Risiken. Was sich hingegen 1986 in Schweizerhalle und am Rhein ereignete, ist 20 Jahre später mit größerer Wahrscheinlichkeit in den Chemiezentren von Osteuropa und Asien zu erwarten. Die chemische Analytik wäre heute dank den Entwicklungen auf dem Gebiete der LC/MS-Methodik an und für sich imstande, auch polarere Metaboliten und Pyrolysenprodukte zu bestimmen. Wegen des Fehlens der entsprechenden Referenzverbindungen wäre die Aussagekraft solcher Analysen aber auch nur sehr beschränkt. Im weiteren haben wir nur äußerst begrenzte Kenntnisse darüber, welche Verbindungen bei der teilweisen Verbrennung und durch biologischen Abbau im Wasser gebildet werden. Betreffend der Beurteilung der ökotoxikologischen Schädigungen gäbe es 20 Jahre nach 1986 einige zusätzliche Kenntnisse über artspezifische Effekte wichtiger Chemikalien, wie zum Beispiel über die akut toxischen Konzentrationen wichtiger Pestizide für Aale (Ferrando et al. 1991). Die Beurteilung der chronischen Wirkung von Spurenkonzentrationen einzelner Verunreinigungen bei niedrigen Konzentrationen sowie von Stoffgemischen bleiben aber nach wie vor ungelöste Probleme.

Eine Gesamtbilanz ergibt, dass die Wasserqualität und der damit verknüpfte biologische Zustand im Rhein sich im Laufe der letzten zwei Jahrzehnte sehr wesentlich verbessert haben. Es gab zwar schon vor 1986 wichtige Gewässerschutzaktivitäten wie zum Beispiel der Bau von kommunalen und industriellen Abwasserreinigungsanlagen oder Vorschriften über den Gebrauch von wassergefährdenden Chemikalien. Der Sandoz-Unfall hat aber substantiell zur Verstärkung der Maßnahmen auf industrieller und behördlicher Seite geführt. Die im Rhein gesammelten vielfältigen Erfahrungen sind als Lehrbeispiele gut dafür geeignet, um in nutzbringender Form auf andere zivilisationsbelastete Gewässersysteme – insbesondere auch in Entwicklungs- und Schwellenländern – übertragen zu werden.

Danksagung. Für die sehr wertvollen Kommentare im Laufe der Manuskriptausrbeitung danke ich Daniel Bürgi, Herbert Güttinger und Jan Mazacek.

Literatur

- AWBR (2005): Jahresbericht 2005 Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein
- Baur B, Schmidlin S (2006): Effects of invasive non-native species on the native biodiversity in the river Rhine. In: Lonsdale WN (ed), Biological Invasions. Springer Verlag, Berlin, pp 257–273
- Behr NA (2002): Die Entwicklung des Rheinschutz-Regimes unter besonderer Berücksichtigung des Sandoz-Unfalls vom 1. November 1986. brain script Nikolai A. Behr Verlag, München, 228 pp
- Berichte der Rheinüberwachungsstation in Weil am Rhein (ab 2002): <<http://www.aue.bs.ch/fachbereiche/gewaesser/rheinberichte/analysen-und-ergebnisse.htm>>
- Burkhardt-Holm P, Braunbeck T, Storch V (1990): Auswirkung der beim Sandoz-Unfall im November 1986 in den Rhein gelangten Chemikalien auf die Ultrastruktur des Darms von Aalen. *Limnologie aktuell* 1, 393–404
- Capel PD, Giger W, Reichert P, Wanner O (1988): Accidental input of pesticides into the Rhine river. *Environ Sci Technol* 22, 992–997
- Dickman S (1988): Science faces a struggle for popularity after Schweizerhalle. *Nature* 336, 331–331
- Diehl P (2005): 'Radarfalle' für Rheinverschmutzer. In: Ökowunder Rhein – 20 Jahre nach Sandoz. 13. Internationale Jahrestagung des Rheinkollegiums eV, Basel, pp 27–28
- DKRS 1986: Deutscher Bericht zum Sandoz-Unfall mit Messprogramm Eawag (2006): Der Rhein rot, die Fische tot – 20 Jahre nach dem Sandoz-Brand. <<http://www.eawag.ch/media/20061101/index>>
- Ferrando MD, Sancho E, Andreu-Moliner E (1991): Comparative acute toxicities of selected pesticides to *Anguilla anguilla*. *J Env Sci Health B26*, 491–498
- Giger W, Schaffner C, Kohler HPE (2006): Benzotriazole and tolyltriazole as aquatic contaminants. 1. Input and occurrence in rivers and lakes. *Environ Sci Technol* 40, 7186–7192
- Güttinger H, Stumm W (1990): Okotoxikologie am Beispiel der Rheinverschmutzung durch den Chemie-Unfall bei Sandoz in Basel. *Naturwissenschaften* 77, 253–261
- Hurni B (1988): The Sandoz accident. In: Angeletti G, Bjørseth A (eds), Organic micropollutants in the aquatic environment. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland
- Hurni B (1993): Bodensanierung Sandoz: Gefahr gebannt, Umweltblatt – Informationsorgan der Bau- und Umweltschutzdirektion des Kantons Basel-Landschaft, pp 11–13
- IAWR (2003): Rhein-Memorandum 2003 <www.riwa.org/e/publikaties/113_iawr_memo_03.pdf>
- IKSR (1994): Lachs 2000. Internationale Kommission zum Schutze des Rheins
- IKSR (2003): Stromaufwärts – Bilanz Aktionsprogramm Rhein. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
- IKSR (2004): Rhein & Lachs 2020. Programm für Wanderfische im Rheinsystem. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
- Munz C, Bachmann A (1993): Dokumentation einer umweltgerechten Bodensanierung. Vierter internationaler KfK/TNO-Kongress über Altlasten, Berlin
- Preiswerk TE (2005): Schweizerhalle nach 20 Jahren. In: Ökowunder Rhein – 20 Jahre nach Sandoz. 13. Internationale Jahrestagung des Rheinkollegiums eV, Basel, pp 9–11
- Rey P, Ortlepp J, Küry D (2004): Wirbellose Neozoen im Hochrhein. Ausbreitung und ökologische Bedeutung. Bundesamt für Umwelt, Bern
- RIWA (2005): Jahresbericht 2005 – Der Rhein
- Spazier E, Storch V, Braunbeck T (1992): Cytopathology of spleen in eel *Anguilla anguilla* exposed to a chemical spill in the Rhine river. *Diseases of Aquatic Organisms* 14, 1–22
- Voutsas D, Hartmann P, Schaffner C, Giger W (2006): Benzotriazoles, alkylphenols and bisphenol a in municipal wastewaters and in the Glatt River, Switzerland. *Env Sci Pollut Res* 13 (6) 333–341
- Wanner O, Egli T, Fleischmann T, Lanz K, Reichert P, Schwarzenbach RP (1989): Behavior of the insecticides disulfoton and thiometon in the Rhine river – A chemodynamic study. *Environ Sci Technol* 23, 1232–1242

Eingegangen: 19. Februar 2007

Akzeptiert: 11. März 2007

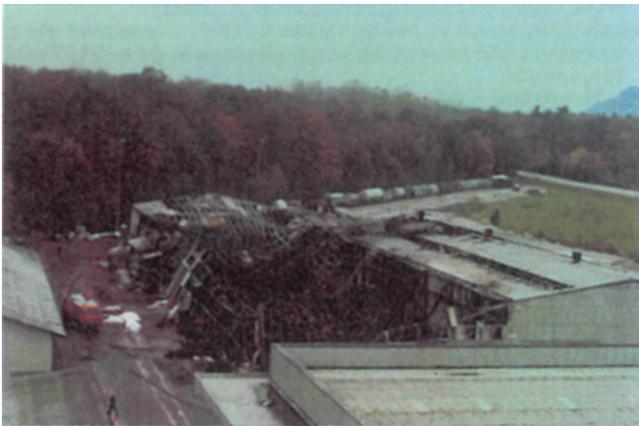
OnlineFirst: 12. März 2007

Farbtafel

Abb. 1 A-F: Bilder von der Brandkatastrophe in Schweizerhalle im November 1986



A, B: Großbrand der Lagerhalle 956 am 1. November 1986



C, D: Lagerhalle 956 nach dem Brand



E: Kühlwasserauslauf in den Rhein – Eintrag von verunreinigtem Löschwasser, markiert mit dem roten Rhodamin-Farbstoff



F: Fischsterben im Rhein

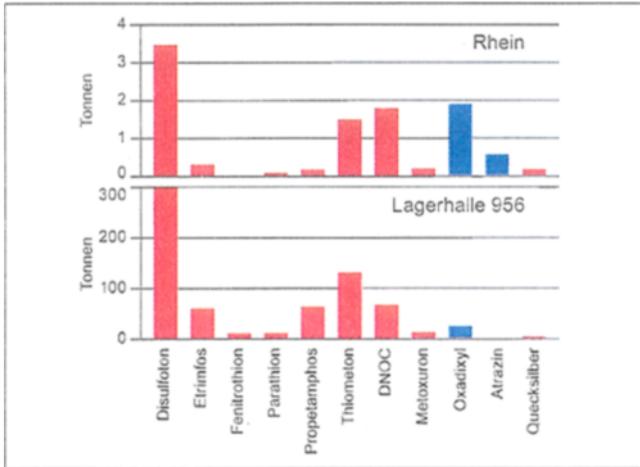


Abb. 2: Mengen der in der Lagerhalle 956 der Firma Sandoz gelagerten wichtigsten Wirkstoffe und im Rhein bei Village-Neuf unterhalb von Basel gefundene Frachten. Die Frachten im Rhein basieren auf der Einzelstoff-Konzentrationsmessung mittels Kapillargaschromatographie mit einem stickstoff-phosphorspezifischen Detektor in einer flussproportionalen Wochensammelprobe vom 27. Oktober bis 2. November 1986. Literaturhinweis (Capel et al. 1988, DKRS 1986)

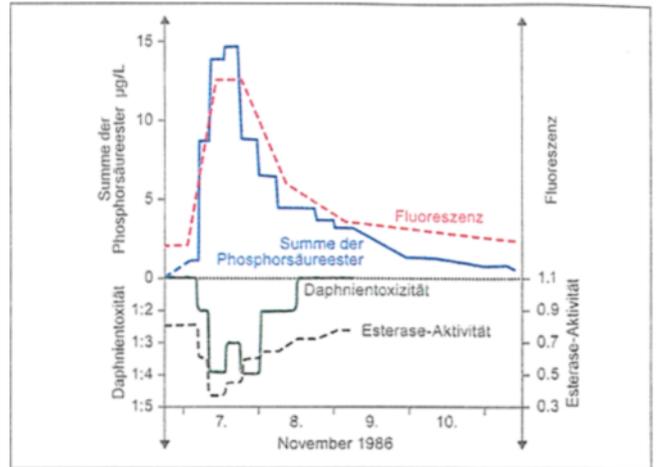


Abb. 3: Durchgang der 'Sandoz-Schadstoffwelle' in Bad Honnef in Nordrhein-Westfalen. Literaturhinweis (DKRS 1986). Die Daphnientoxizitäten sind als Verdünnungsfaktoren angegeben, bei denen die verdünnte Rheinwasserprobe für die Daphnien noch toxisch war

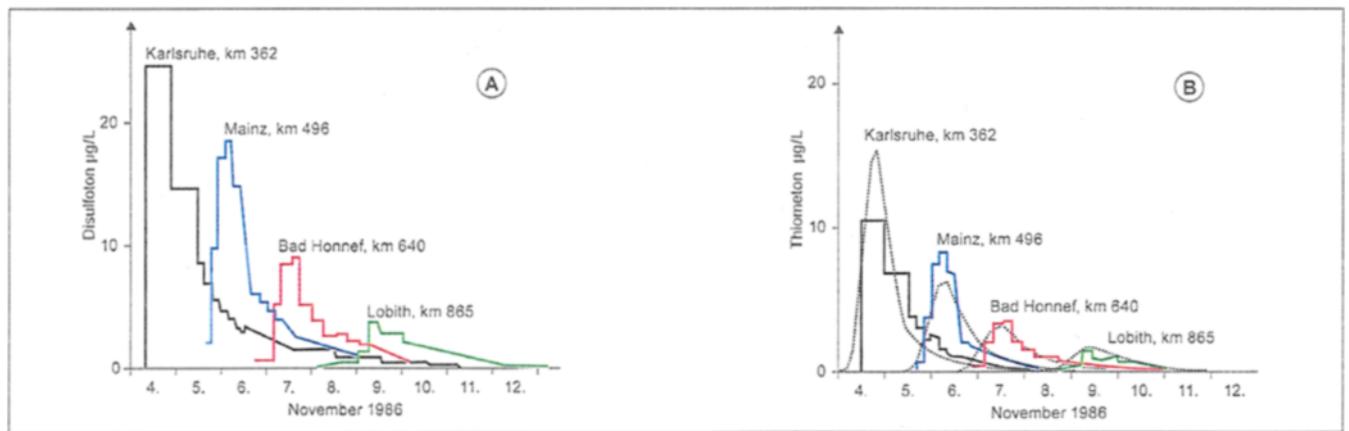


Abb. 4: Im Rhein gemessene und berechnete Konzentrationsprofile für (A) Disulfoton und (B) Thiometon. Literaturhinweis (Capel et al. 1988, DKRS 1986)



Abb. 5: An fünf Messstellen im Rhein gemessene Disulfoton-Massenflüsse (Frachten). Literaturhinweis (Capel et al. 1988)