

Originalarbeiten

Untersuchungen zum ökotoxikologischen Schädigungspotenzial und Erosionsrisiko von kontaminierten Sedimenten in staugeregelten Flüssen

Henner Hollert¹, Ingo Haag², Matthias Dürr^{3,5}, Bernhard Wetterauer¹, Roman Holtey-Weber⁴, Ulrich Kern², Bernhard Westrich², Harald Färber⁴, Lothar Erdinger³ und Thomas Braunbeck¹

¹ Zoologisches Institut der Universität Heidelberg, INF 230, D-69120 Heidelberg; <http://www.aquatox.org>

² Versuchsanstalt, Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, D-70569 Stuttgart

³ Hygiene-Institut, Heidelberg, INF 324, D-69120 Heidelberg

⁴ Hygiene-Institut, Bonn, Sigmund-Freud-Str. 25, D-53105 Bonn

⁵ Institut für Hygiene, Universität Halle, J.-A.-Segner-Str. 12, D-06108 Halle

Korrespondenzautor: Dr. Henner Hollert; email: hollert@aquatox.org

DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2002.05.030>

Zusammenfassung. Schwebstoffgebundene Schadstoffe werden durch Sedimentation der Wasserphase und damit der Verfügbarkeit für viele aquatischen Organismen entzogen. Während bei durchschnittlichen hydrologischen Verhältnissen die Freisetzung von Schadstoffen aus stabil gelagerten Sedimenten meist weitgehend unterbunden wird, besteht bei Hochwassereignissen die Gefahr einer Remobilisierung von kontaminierten Ablagerungen. In diesem Beitrag wird ein kombiniertes ökotoxikologisches und hydraulisches Untersuchungssystem zur Untersuchung der ökotoxikologischen Belastung und des Erosionsrisikos von Sedimenten vorgestellt. Der integrierte Ansatz wurde am staugeregelten Neckar angewendet, um das Schädigungspotenzial und die Gefahr einer Remobilisierung an Sedimentbohrkernen der Stauhaltung Lauffen sowie an Schwebstoffen zweier extremer Hochwasser zu überprüfen. Für die Bohrkernsegmente unterhalb einer Erosionsdiskordanz konnte eine sprunghafte Zunahme der ökotoxikologischen Belastung ermittelt werden. Bei Hochwasserereignissen mit einer 5-jährlichen Wiederkehrwahrscheinlichkeit (= HQ₅) können prinzipiell alle Sedimente, auch die stärker kontaminierten und erosionsresistenteren Altsedimente, remobilisiert werden. Während der Hochwasserereignisse (HQ₁₅ bis HQ₂₀) kam es zu einer deutlichen Erhöhung des cytotoxischen und mutagenen Schädigungspotenzials der Schwebstoffe im Vergleich zu einem mittleren Hochwasser im Jahre 1995/96 (HQ₁). Dies schien zumindest teilweise auf die Remobilisierung hochkontaminierter Altsedimente zurückzuführen zu sein.

Schlagwörter: Beobachtungssysteme; Cytotoxizität; endokrine Wirkungen; Erosionsrisiko; Hochwasser; Mutagenität; Neckar; PCB; Schadstoffremobilisierung; Schädigungspotenzial; Schwebstoffe; Schwermetalle; Sedimente

Abstract. Investigations of the Ecotoxicological Hazard Potential and Risk of Erosion of Contaminated Sediments in Lock-Regulated Rivers

Particle-bound pollutants accumulate in river-bottom sediments, a process which results in a significant decrease in the ecotoxicological availability of toxicants for the majority of aquatic organisms. Under normal hydrologic conditions, the release of contaminants from bottom sediments is usually of minor importance. In contrast, flood events may remobilize highly contaminated sediments via in-stream erosion. The objective of this study was to develop a combined ecotoxicological and hydraulic approach to elucidate the ecotoxicological implications associated with the risk of erosion of contaminated sediments. This integrated strategy was applied to the lock-regulated Neckar river in Southern Germany. Both the bottom-sediment cores and suspended matter from two intensive flood events were investigated. Sediment samples below an erosional unconformity showed a sharp increase in the ecotoxicological load. Moreover, it was found that major flood events (HQ₅ and higher) could possibly erode even very old, well-consolidated and highly-contaminated sediments. The suspended matter of the high discharge events investigated (return periods of 15 to 20 years) exerted significantly higher cytotoxicity and mutagenicity than a moderate flood with a 1-year return period. These findings support the conclusion that the observed ecotoxicological effects during major floods may at least in part be due to the in-stream erosion of highly contaminated bottom sediments.

Keywords: Cytotoxic potential; cytotoxicity; endocrine disruption; erosion risks; flood event; heavy metals; mutagenicity; Neckar; observational systems; PCB; pollutant mobility; sediments; suspended matter

1 Sedimente in staugeregelten Flüssen als Senken und Quellen für Schadstoffe

Aufgrund der hohen Affinität zahlreicher Kontaminanten zu mineralischen und organischen Oberflächen sind Sedimente und Schwebstoffe wichtige Determinanten für die ökotoxikologische Belastung von aquatischen Systemen. Gelöste Schadstoffe können an Schwebstoffe adsorbieren und

durch Sedimentation der Wassersäule entzogen werden. Umgekehrt kann das so zwischengelagerte Material durch Resuspension (und Desorption) zur Belastungsquelle für das Wasser werden (Rao et al. 1990, Zimmer und Ahlf 1994). In staugeregelten Flüssen lagern insbesondere in den strömungsberuhigten Rückstaubereichen vor Wehren zum Teil beträchtliche Mengen belasteter, bisweilen ökotoxiko-

logisch brisanter Sedimente, die zumeist aus vergangenen Jahrzehnten mit deutlich höheren Schadstoffemissionsraten stammen. Bei stabiler Lagerung stellen diese Sedimentaltlasten nur eine geringe Gefährdung dar, da die meisten Schadstoffe unter den im Sediment vorherrschenden Milieubedingungen weitgehend immobil sind (Müller 1993). Menschliche Eingriffe (Baggerung, Spülung), aber auch natürliche Hochwasserereignisse können jedoch zur Remobilisierung kontaminierter Sedimente und abrupten Belastung der aquatischen Biozönose führen.

Vor diesem Hintergrund wurde ein integriertes hydraulisches und ökotoxikologisches Untersuchungssystem entwickelt und angewendet, mit dem die ökotoxikologische Belastung und die Erosionsgefährdung von kontaminierten Altsedimenten überprüft werden kann.

2 Der Neckar als Modellsystem für ein Fließgewässer mit stark kontaminierten Altsedimenten

In vielen Flüssen sind heute größere Schadstoffmengen in den Sedimenten gespeichert als aus externen Quellen jährlich eingetragen werden (Power und Chapman 1992). So betragen heute die jährlichen Cadmiumemissionen im gesamten Neckareinzugsgebiet ca. 0,84 t (Fuchs et al. 1999); in den Sedimenten der Stauhaltung Lauffen sind dagegen etwa 11 t Cd gespeichert (Haag et al. 2000). Diese großen Schadstoffmengen sind auf die bis in die siebziger Jahre anhaltend hohen Schwermetallemissionen zurückzuführen (Förstner und Müller 1974). In den letzten 30 Jahren wurde die Schwermetallbelastung nicht zuletzt durch den Bau und Ausbau industrieller und kommunaler Kläranlagen drastisch reduziert (Müller 1992). Ähnlich wie in vielen anderen stau-regulierten Flüssen werden die hochkontaminierten Altlasten daher heute zumeist von weniger belasteten Jungsedimenten überlagert. Im Neckar können die beiden Sedimentpools leicht und eindeutig anhand der Cd-Konzentration unterschieden werden (Müller 1993, Kern 1997, Haag et al. 2001), wodurch der Neckar Modellcharakter für viele andere staugeregelte Fließgewässer Mitteleuropas erlangt (Hollert et al. 2000a).

Das hohe ökotoxikologische Schädigungspotenzial, das für Altsedimente der Stauhaltung Lauffen mit chemischen und biologischen Untersuchungen nachgewiesen werden konnte (Hollert et al. 1999b, Kern und Westrich 1995, Müller 1993) und die deutliche Erhöhung des cytotoxischen Schädigungspotenzials bei einem einjährigen Hochwasserereignis (Hollert et al. 2000a) lassen eine integrierte Untersuchung des ökotoxikologischen Gefährdungspotenzials von Altsedimenten und der Gefahr einer möglichen Remobilisierung durch Hochwasserereignisse notwendig erscheinen.

3 Das integrierte Untersuchungskonzept

Um die ökotoxikologische Belastung und das Erosionsrisiko umfassend zu bewerten, wurden zum einen Sedimentbohrkerne aus der Stauhaltung Lauffen (A) und zum anderen Hochwasserereignisse (B) mit einer Reihe hydraulischer, chemisch-analytischer und biologischer Endpunkte in einem integrierten Ansatz untersucht (Abb. 1). Mit Hilfe dieser

Kombination kann die aus einer möglichen Erosion von Sedimentaltlasten resultierende Gefährdung des aquatischen Ökosystems umfassend abgeschätzt werden.

3.1 Untersuchung von Sedimentbohrkernen

Jeweils 2 Sedimentbohrkerne verschiedener Probestellen aus der Staustufe Lauffen wurden entnommen und anhand ihrer Lagerungsdichte auf ihre sedimentologische Ähnlichkeit überprüft. Bei gegebener sedimentologischer Ähnlichkeit wurde jeweils ein Kern segmentiert und mit biologischen Wirktests und chemisch-analytischen Methoden auf sein cytotoxisches und mutagenes Schädigungspotenzial sowie den Gehalt an Schwermetallen und PCBs hin untersucht. Der korrespondierende Bohrkern wurde in einem Strömungskanal auf seine tiefenabhängige Erosionsstabilität überprüft. Aus dem Vergleich der ermittelten Erosionsgrenzwerte mit den im Gewässer auftretenden sohnahen Strömungskräften ist es möglich, Aussagen darüber zu treffen, ab welchem Abfluss das Sediment erodiert werden kann (Haag et al. 1999a, 2001).

3.2 Untersuchung von Hochwasserschwebstoffen

Während bereits in zahlreichen Studien Hochwasserschwebstoffe mit chemisch-analytischen Methoden untersucht wurden, gibt es bisher erst wenige Arbeiten zu biologischen Effekten von belasteten Schwebstoffen. Für ein mittleres Hochwasser (HQ₁, etwa 1 jährliche Wiederkehrwahrscheinlichkeit) am Neckar (Stauhaltung Heidelberg) konnte im Dezember 1995 ein (öko)toxikologisches Gefährdungspotenzial durch Schwebstoffe bei relativ niedrigen Schwermetallkonzentrationen nachgewiesen werden, ohne dass für diesen Fall von einer Remobilisierung stark kontaminierter Sedimente ausgegangen werden konnte (Hollert und Braunbeck 1997, Hollert et al. 2000a). Daher wurde in der vorliegenden Studie bei einem stärkeren Neckarhochwasser (HQ₂₀)

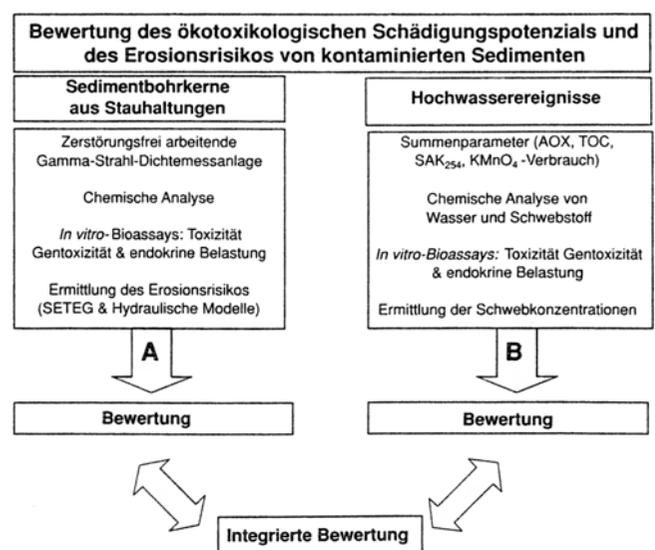


Abb. 1. Übersicht über die angewandte integrierte Untersuchungsstrategie zur Bewertung des Remobilisationsrisikos von Altsedimenten in staugeregelten Flüssen; aus Hollert et al. (2000b)

im Oktober/November 1998 mittels chemischen Analysen und biologischen Wirktests an Schwebstoffen aus den Stauhaltungen Lauffen und Heidelberg untersucht, ob eine Erhöhung des partikelgebundenen Schadstoffpotenzials erfolgte, die auf eine Remobilisierung von stark kontaminierten Altsedimenten schließen lässt. Die Schwebstoffe der Stauhaltung Heidelberg eines weiteren Neckarhochwassers im Februar 1999 (etwa $HQ_{1,5}$) wurden auf ihr bakterientoxisches, cytotoxisches, mutagenes und endokrines Schädigungspotenzial untersucht. Bei dieser Beprobung sollte geklärt werden, ob eine schnelle zeitliche Abfolge von stärkeren Hochwassereignissen zu einer verstärkten Remobilisation von Altsedimenten führen kann.

3.3 Eingesetzte Methoden

Die störungsarme Probenahme der bis zu 1,5 m langen Sedimentkerne erfolgte mit speziell hierfür konzipierten Stoßröhren. Die Tiefenprofile der natürlichen Lagerungsdichte wurden anhand dieser Sedimentkerne mit Hilfe eines zerstörungsfrei arbeitenden Gamma-Strahl-Dichtemesssystems erhoben (Haag et al. 1999a). Die tiefenabhängige Erosionsstabilität der Bettsedimente wurde mit dem SETEG-System ermittelt, einem Strömungskanal, der eigens für die tiefenorientierte Untersuchung des Erosionsverhaltens feinkörniger Sedimente entwickelt wurde (Kern et al. 1999). Die erosionswirksamen sohl nahen Strömungskräfte im Gewässer wurden aus hydraulischen Simulationen mit dem numerischen Modell COSMOS abgeleitet (Kern 1997).

Zur Schwermetallanalyse wurde zunächst die Kornfraktion kleiner 20 μm durch Schlämmlung abgetrennt und diese dann einem $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ Nassaufschluss unterzogen. Die resultierenden Metallkonzentrationen wurden am induktiv gekoppelten Plasma Emissionsspektrometer (ICP/OES) bestimmt (Haag et al. 1999b). Die Ergebnisse der Schlämmanalysen dienten zudem der Ermittlung des Kornanteils < 20 μm (Haag et al. 1999c). Die Konzentrationen sedimentgebundener PCBs wurden ohne vorherige Kornabtrennung an den Gesamtproben nach DIN 38414-20 am Gaschromatographen mit Elektroneneinfangdetektor (GC/ECD) bestimmt (Haag et al. 1999b). Die ^{137}Cs -Aktivitäten wurden ebenfalls an Gesamtproben auf Grundlage der Gamma-Strahlung am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg ermittelt (Haag et al. 1999b). Die akute Toxizität wurde im Zelltest mit der permanenten Zelllinie RTG-2 aus der Gonade der Regenbogenforelle (Segner 1998, Hollert et al. 2000a) untersucht. Um eine weitere Annäherung des Zelltests an die Verhältnisse in lebenden Tieren zu erhalten, kann die geringe Biotransformationsfähigkeit der Zellen durch die Zugabe eines sogenannten S9-Mixes erhöht werden. Dieses Enzymgemisch aus dem Homogenat von Rattenlebern enthält unter anderem die Biotransformationsenzyme der P450-Reihe, die im Körper eine Toxifizierung oder eine Entgiftung von Umweltgiften bewirken können (Maron und Ames 1983). Aus den Dosis-Wirkungskurven wurde mittels Regressionsanalysen jeweils die Konzentration ermittelt, bei der im Neutralrottest eine Mortalität von 50% vorlag (NR_{50} -Wert).

Durch die Auswahl der eingesetzten Biotests sollte neben der akuten Toxizität auch die subletale Wirkung der Sedimente und Schwebstoffe ermittelt werden. Zahlreiche Untersuchungen zeigen einen Übergang von Problemen, die aus akuten toxischen Konzentrationen von Schadstoffen erwachsen, zu Problemen in Folge einer meist komplexen Mischung aus zahlreichen Schadstoffen und daraus resultierender sublethaler Schädigungen. Daher wurde die genotoxische Wirkung mit dem Ames-Test (Maron und Ames 1983) und dem Comet-Assay mit der Zelllinie RTG-2 (Fairbairn et al. 1995) sowie die endokrine Wirkung im Dot-Blot/RNase-Protection-Assay mir isolierten Hepatocyten aus der Regenbogenforelle (Islinger et al. 1999) untersucht. Beim Dot-Blot-Assay wird der Biomarker Vitellogenin (eine Vorstufe der Dotterinhaltsstoffe aller eierlegenden Wirbeltiere, das unter normalen Umständen nur bei weiblichen Organismen auftritt) auf Ebene der mRNA nachgewiesen. Die antiöstrogene Wirkung der Umweltproben wurde indirekt über eine Abnahme der Vitellogenin-Induktion in Ansätzen mit 1 nM 17β -Estradiol sowie den Schwebstoff- und Sedimentextrakten bzw. der Positivkontrolle Tamoxifen (Sigma, Deisenhofen) überprüft.

Die genannten Biotestverfahren wurden in dieser Studie ausgewählt, da sie sich für die Untersuchung von Sedimenten als geeignet erwiesen haben (Hollert et al. 1999a, Ahlf et al. 2002) und zahlreiche Referenzdaten aus dem Einzugsgebiet des Neckars vorliegen (Übersichten bei Hollert et al. 2000a, 2002 a,b).

4 Befunde und Diskussion

4.1 Untersuchungen an Bohrkernen aus der Stauhaltung Lauffen

4.1.1 Hydraulische und sedimentologische Parameter

In Abb. 2 ist ein exemplarischer Überblick über verschiedene hydraulische, sedimentologische und ökotoxikologische Parameter eines Bohrkernes aus der Stauhaltung Lauffen zusammengefasst. In einer Tiefe zwischen 5 und 20 cm sind die Lagerungsdichten der Sedimente deutlich erhöht. Dies ist vermutlich auf die Ablagerung von grobkörnigerem Material zurückzuführen, wie sie typischerweise im abfallenden Ast eines Hochwassers auftritt. Die sprunghafte Dichteabnahme nach unten hin weist auf den erosiven Einschnitt eines Hochwassers in ältere, feinkörnige Ablagerungen hin (Schichtlücke bzw. Erosionsdiskordanz; Haag et al. 2001, Müller 1993). Auch die relativen Anteile der Korngröße < 20 μm an dem Gesamtsediment dokumentieren Hochwassereinschnitte in die Sedimente des Bohrkerns: Während unterhalb der Erosionsdiskordanz feinkörnige Partikel dominierten, konnte für die Hochwassereinschnitte eine sprunghafte Abnahme der relativen Häufigkeit von Partikeln < 20 μm nachgewiesen werden, die sich durch die nachlassenden Schubspannungen und beginnende Sedimentation grober Partikel im abfallenden Ast des Hochwassers erklären lässt (Haag et al. 1999a, 2001). Da im Tiefenprofil der ^{137}Cs -Aktivität der 'Tschernobylpeak' nicht zu erkennen ist, kann davon ausgegangen werden, dass der postulierte erosive Einschnitt nach 1986 erfolgte.

4.1.2 Schwermetalle, PCBs und ökotoxikologische Belastung

Schwermetalle. In einer Bohrkerntiefe von etwa 25 cm (der Tiefe der vermuteten Erosionsdiskordanz) konnte ein sprunghafter Anstieg der Konzentrationen von Cd, Cu und Cr nachgewiesen werden, wobei im unterlagernden Sediment Cadmiumkonzentrationen bis zu 75 mg/kg (achtfache Überschreitung des Grenzwertes für die schlechteste LAWA-Güteklasse IV, LAWA 1998) und Kupferkonzentrationen bis zu 518 mg/kg nachgewiesen wurden. Auf Grundlage der von Haag et al. (2001) abgeleiteten Schwellenwerte von 10,8 mg/kg für Cd bzw. 193 mg/kg für Cu, können die Segmente unterhalb von 25 cm eindeutig den hochkontaminierten Altsedimenten zugeordnet werden. Song und Müller (1999) legten für zahlreiche an der Frühdiagenese beteiligte Stoffe Porenwasserprofile aus der Stauhaltung Lauffen vor. Diese Profile verdeutlichen, dass die Sulfatreduktion bereits in einer Tiefe von wenigen Zentimetern einsetzt. Die meisten Schwermetalle – mit Ausnahme des redoxsensitiven Chroms – sind in den anoxischen Sedimenten also unterhalb von 5 bis 10 cm als Sulfide stabil gebunden (Song und Müller 1999). Im oberflächennahen, oxischen Bereich wird in den pH-neutralen bis schwach alkalischen Sedimenten vor allem durch die Fällung von FeIII-Oxiden und -Hydroxiden eine große

Dichte an spezifischen Sorptionsplätzen für Schwermetalle erzeugt. Dadurch entsteht eine effiziente Barriere gegen den diffusiven Transport der Metalle. Bei stabiler Lagerung der Sedimente, ist folglich nicht mit einer signifikanten Freisetzung von Schwermetallen zu rechnen (vgl. Müller 1993, Calmano et al. 1993).

PCBs. Für den Bohrkern konnten extreme Schwankungen in den Belastungen mit PCBs (bis zu einem Faktor 39) nachgewiesen werden. Für alle untersuchten Kongenere (PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180) wurde ein deutlicher Konzentrationsprung im Bereich der Erosionsdiskordanz ermittelt. Die Grenzwerte für eine Einordnung der Proben in die schlechteste Güteklasse IV des Klassifikationsschemas der Hamburger Umweltbehörde (Neumann-Hensel et al. 2000) wurden bei PCB 138 und PCB 153 vom Median der Messungen mehr als zweifach und von einzelnen Segmenten bis zu fünffach überschritten. Auffällig war bei der Analyse dieses Bohrkernes, dass die höchste gemessene Konzentration Trichlorbiphenyl PCB 28 mit 171 µg/kg (Abb. 2, dreifaches Überschreiten des Grenzwertes der Güteklasse IV), aber auch erhöhte Konzentrationen der PCBs 52 und 101 in der obersten Sedimentschicht nachgewiesen werden konnten. Im Gegensatz dazu ergab sich für die höher chlorierten Biphenyle

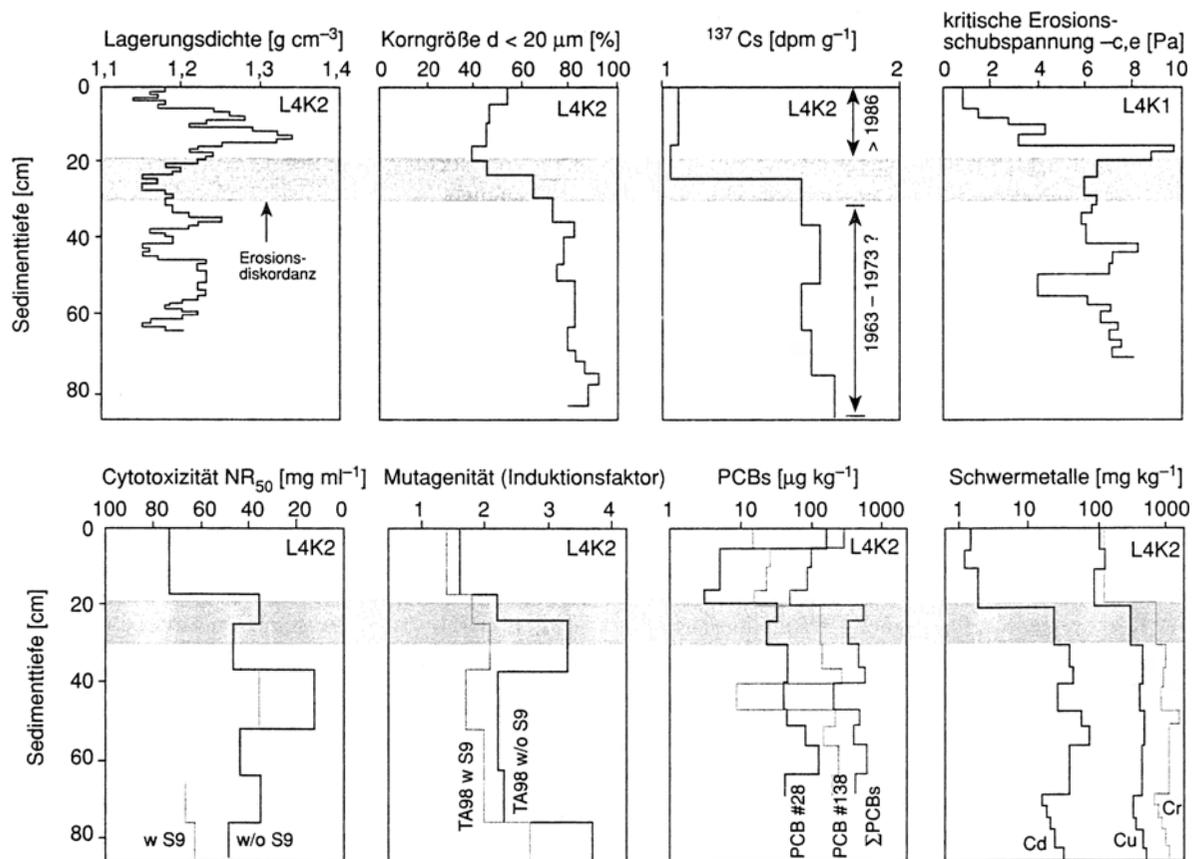


Abb. 2: Tiefenprofile verschiedener Untersuchungsparameter an einem Bohrkern (L4K2) aus der Stauhaltung Lauffen am Neckar. Die Dichteprofile, der relative Anteil der Korngröße $d < 20 \mu\text{m}$ am Gesamtsediment, die Befunde aus radiometrischen Messungen des Isotops ^{137}Cs , die kritischen Erosionsschubspannungen (an L4K1) aus dem Strömungskanal (SETEG), die Cytotoxizität im akuten Zelltest mit RTG-2-Zellen (NR_{50}), die Mutagenität im Ames-Test sowie die Konzentrationen von ausgewählten PCBs und Schwermetallen (in μg bzw. mg pro kg Trockengewicht des Sedimentes) sind in Abhängigkeit von der Sedimenttiefe des Bohrkerns dargestellt

PCB 138, 153 und 180 eine deutliche Trennung in gering kontaminierte Sedimente oberhalb der Erosionsdiskordanz und hochkontaminierte, darunter liegende Altsedimente. Ein unterschiedliches Verhalten von PCB-Kongeneren in Abhängigkeit vom Chlorierungsgrad konnte auch von Müller (1993) nachgewiesen werden.

Cytotoxizität. Unterhalb der Erosionsdiskordanz konnte ein sprunghafter Anstieg der Cytotoxizität im Ansatz ohne S9-Supplementierung (polarere Schadstoffe, die keiner Aktivierung durch P450-abhängige Enzymsysteme bedürfen, Hollert et al. 2000a) von einem NR_{50} von 74 mg Sedimentäquivalent/ml Testansatz auf einen Mittelwert von 37 mg/ml nachgewiesen werden. Die höchste Toxizität wurde bei diesem Bohrkern mit einem NR_{50} von 20 mg/ml für das Segment 36–51 cm ermittelt. Die hohe Cytotoxizität an der Erosionsdiskordanz korreliert sehr gut mit den Befunden aus der Schwermetall- und PCB-Analytik (Abb. 2). Die detektierte toxische Wirkung kann allerdings nicht alleine aus den gemessenen Schwermetall- und PCB-Konzentrationen erklärt werden. So konnte beispielsweise durch die Untersuchung ökotoxikologisch wichtiger Monosubstanzen im Konzentrationsbereich der Sedimentbelastungen gezeigt werden, dass weniger als 10% der Toxizität von stark Cadmium belasteten Sedimenten (40 mg/kg) auf die Wirkung des Schwermetalls zurückgeführt werden können (Hollert und Braunbeck 2001). Vielmehr können weitere, in chemischen Routineprogrammen oftmals nicht analysierte Schadstoffe für die Wirkung verantwortlich gemacht werden. Eine Identifizierung der biologisch wirksamen Schadstoffe kann durch Bioassay-dirigierte Fraktionierungen und nachfolgende chemische Analytik erfolgen. Die untersuchten Schwermetalle und PCBs können jedoch als Indikatursubstanzen dienen, da in der Regel hohe Korrelationen mit anderen organischen Schadstoffen vorliegen.

Das etwas frühere Ansteigen der Cytotoxizität gegenüber den Konzentrationsprüngen aus der Analytik liegt darin begründet, dass im Cytotoxizitätstest Mischproben mehrerer Sedimentsegmente untersucht werden mussten und daher die Befunde dieses Bohrkerns eine weniger präzise stratigraphische Auflösung besaßen als die chemische Analytik. Hollert und Braunbeck (2001) konnten an 64 Sedimentproben aus der Stauhaltung Lauffen eine ähnliche bimodale Verteilung der cytotoxischen Wirkung dokumentieren wie für die Indikatorverunreinigungen Cd und Cu. Die höher belasteten Proben ($NR_{50} < 50$ mg/ml) liegen eindeutig im Cluster der hochbelasteten Altsedimente.

Mutagenität. Unterhalb der Erosionsdiskordanz konnte ein sprunghafter Anstieg der mutagenen Wirksamkeit von 1,7 auf einen Induktionsfaktor von 3,2 nachgewiesen werden. Die höchste Induktion (3,7 im Ansatz ohne S9) bewirkte das Sediment einer Entnahmetiefe von > 76 cm (Abb. 2).

4.1.3 Gefahr einer Remobilisation

Abb. 2 zeigt das Vertikalprofil der kritischen Erosionsschubspannung des Bohrkernes für das Einsetzen der Massenerosion. Es ist zu erkennen, dass die Sedimente unterhalb

der Erosionsdiskordanz eine deutlich höhere Erosionsstabilität als die jüngeren Sedimente besitzen, was vor allem auf die Langzeitkonsolidierung der Altsedimente zurückzuführen sein dürfte. Im Neckar bei Lauffen treten ab Abflüssen von ca. 1100 m³/s, was einem 5-jährlichen Hochwasser entspricht, Sohlschubspannungen von über 10 Pa auf (Haag et al. 2001). Bei extremen Hochwassern können somit selbst die sehr erosionsstabilen Altsedimente prinzipiell resuspendiert werden. Allerdings ist zu beachten, dass die Altsedimente nahezu flächendeckend von jüngerem Material überdeckt werden, so dass auf dieser Grundlage nicht eindeutig prognostiziert werden kann, ob es im Hochwasserfall tatsächlich zu einer nennenswerten Remobilisierung hochkontaminierter Ablagerungen kommt. Dies hängt insbesondere von der zukünftigen Häufigkeit und zeitlichen Abfolge der Hochwasserereignisse ab (Haag et al. 1999a).

4.2 Untersuchungen zweier extremer Hochwasserereignisse am Neckar

Abb. 3 zeigt die Abflussganglinien des Hochwassers im Oktober/November 1998 in Heidelberg und Lauffen und Spitzenabflüsse von Hochwasserereignissen ausgewählter Wiederkehrwahrscheinlichkeiten. Das untersuchte Hochwasser besaß mit fast 2000 m³/s einen mehr als dreimal höheren Scheitelabfluss als das 1995/96 untersuchte Winterhochwasser, für das bereits ein deutliches Schädigungspotenzial festgestellt werden konnte (Hollert und Braunbeck 1997, Hollert et al. 1999). Das untersuchte Hochwasser entsprach in Heidelberg in etwa einem 20-jährlichen Hochwasser und in Lauffen einem 5-jährlichen. Mit Hilfe von experimentellen Frachtbilanzen konnten Haag et al. (2002) zeigen, dass während diesem Hochwasser bis zu 50.000 t Sediment aus der Stauhaltung Lauffen mobilisiert wurden. Schwebstofffrachtbilanzen für die Winterhochwasser der Jahre 1993 und 1994 erbrachten ähnliche Ergebnisse (Kern und Westrich 1997). Experimentelle Schadstoffbilanzen dieser beiden Hochwasser verdeutlichten, dass infolge der Nettoerosion auch enorme Mengen an Schwermetallen aus der Stauhaltung Lauffen mobilisiert wurden (Kern 1997). Eine genauere Analyse des Hochwassers von 1994 zeigte jedoch, dass nur ein sehr geringer Anteil der mobilisierten Feststoffe den hochkontaminierten Altsedimenten zuzuordnen ist (Haag et al. 2000).

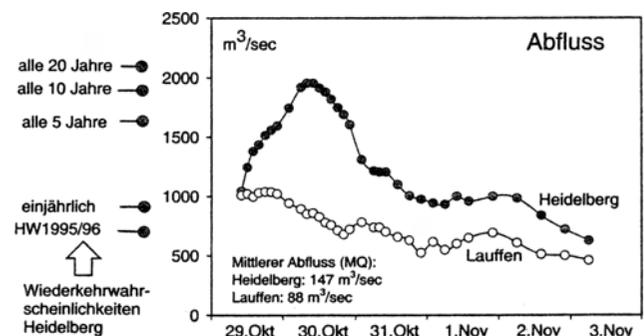


Abb. 3: Abflüsse während des Neckarhochwassers im Oktober/November 1998 in Heidelberg und Lauffen. Recurrence intervals: Statistische Wiederkehrwahrscheinlichkeiten für Heidelberg. MQ: Mittlerer Abfluss

4.2.1 Cytotoxizität des untersuchten Hochwassers

Abb. 4 zeigt den Gang der Cytotoxizität von Neckarschwebstoffen bei Heidelberg während des Hochwassers im Oktober 1998. Die höchste Zelltoxizität konnte mit einem NR_{50} von 20 mg Schwebstoffäquivalent pro ml Testansatz für den 29.10.1998 (ansteigender Hochwasserast) nachgewiesen werden. Im Ansatz ohne S9-Supplementierung pendelte sich der NR_{50} auf einem Niveau von 40–60 mg/ml ein. Mit S9-Mix (zum Ausgleich geringer Biotransformationskapazitäten der RTG-2-Zellen) veränderte sich das Cytotoxizitätsprofil der Schwebstoffe stark: Nach einer hohen Zelltoxizität zu Beginn des Hochwassers (NR_{50} von 20–150 mg/ml), wurden die Extrakte des Hochwasserpeaks durch S9 detoxifiziert (NR_{50} um 200 mg/ml) und im Bereich des abfallenden Hochwasserastes und des Tailings wieder toxisiert (NR_{50} : 100 mg/ml).

Die unterschiedlichen Verhältnisse der Cytotoxizität mit und ohne S9 deuten auf eine große Heterogenität der cytotoxisch wirksamen Substanzen hin (Hollert und Braunbeck 1997, Hollert et al. 2000a): Die höchste zelltoxische Wirkung wurde jeweils im Bereich der ansteigenden Ganglinie detektiert. Aufgrund der Befunde von Schwermetallanalysen (Hollert und Braunbeck 2001) scheint eine Remobilisation von Altsedimenten während dieses Abschnittes nicht stattgefunden zu haben oder von untergeordneter Bedeutung gewesen zu sein. Die hohe Toxizität der Schwebstofffracht zu Beginn des Hochwasserereignisses könnte durch den zu diesem Zeitpunkt sehr hohen Anteil an stark kontaminiertem Oberflächenabfluss (Hellmann 1996, Maltby et al. 1995) bestimmt sein. Partikulär gebundene Luftschadstoffe mit einer hohen Toxizität (Clonfero 1997) oder Ablagerungen in Mischwasserkanalisationsnetzen (Kraut und Bondareva 2000) können remobilisiert werden und aufgrund von Kläranlagenentlastungen oftmals unbehandelt in den Vorfluter gelangen. Auch kommunale Abwässer, die nicht zurückgehalten werden können und Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen können für die hohe Toxizität beim ansteigenden Ast des Hochwassers verantwortlich gemacht werden (Hollert et al. 2000a).

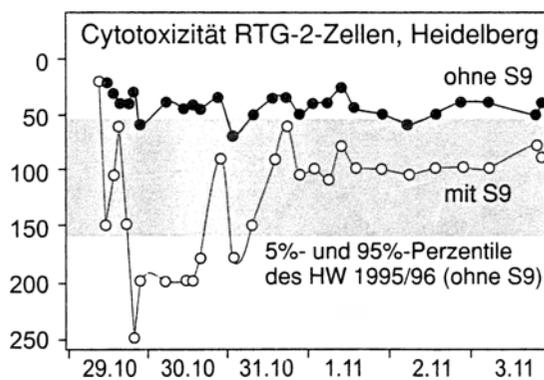


Abb. 4: Cytotoxische Wirkung von Schwebstoffextrakten des Hochwassers im Oktober/November 1998, mit und ohne S9-Supplementierung. Der grau markierte Bereich zeigt zum Vergleich die 5- und 95% Perzentile der Cytotoxizität von Schwebstoffextrakten des mittleren Hochwassers im Dezember 1995/96 (Hollert et al. 2000a)

Im Vergleich zum mittleren Winterhochwasser 1995/96 (Hollert und Braunbeck 1997, Hollert et al. 2000a) konnten beim hier untersuchten Hochwasser im Oktober 1998 signifikant stärkere cytotoxische Wirkungen festgestellt werden: Fast alle NR_{50} -Werte (ohne S9-Mix) lagen jenseits des 95%-Perzentilwertes des Hochwassers von 1995/96. Da partikulär gebundene Luftschadstoffe und Mischwasserentlastungen bereits bei einjährigen Ereignissen unbehandelt eingeleitet werden, weist die erhöhte Cytotoxizität aber auch die zum Teil sehr hohe Schwermetallbelastung im Bereich des Tailing (Hollert und Braunbeck 2001) auf eine Remobilisierung von stärker kontaminierten Altsedimenten hin. Bei einer Klassifikation der ermittelten Cytotoxizitätswerte in die bimodale Verteilungsfunktion der Zelltoxizität von Sedimenten der Stauhaltung Lauffen würden fast alle Schwebstoffe des Hochwassers in das Cluster der hochkontaminierten Sedimente eingeordnet werden (Abb. 2, Kapitel 4.1.2).

4.2.2 Mutagenität

Während für das mittlere Hochwasser im Dezember 1995 keine Mutagenität im Ames-Test nachgewiesen werden konnte, wirkten die Schwebstoffe beider hier untersuchten Hochwasserereignisse mutagen, so dass auch diese Biotestbefunde eine Remobilisation aus biologischer Sicht als wahrscheinlich erscheinen lassen. Abb. 5 zeigt die Mutagenität der Schwebstoffextrakte des Hochwassers vom Februar 1999 im Ames-Test mit dem Stamm TA98. Hier konnten mit Induktionsfaktoren bis zu 3,2 eine deutlich höhere mutagene Wirkung als für das Hochwasser im Oktober 1998 (Hollert und Braunbeck 2001) festgestellt werden. Im Vergleich zum vorangegangenen Hochwasser im Oktober 1998 wirkten insbesondere die Ansätze ohne S9-Supplementierung stärker mutagen. Die höchste Mutagenität im Ansatz ohne S9 konnte während des ansteigenden Asts kurz vor dem Scheitelpunkt und später im Bereich des Tailing nachgewiesen werden und korrelierte sehr gut mit den Maxima der Cytotoxizität.

Die Befunde zeigen, dass aus ökotoxikologischer Sicht die rasche Folge zweier extremer Hochwasserereignisse als äü-

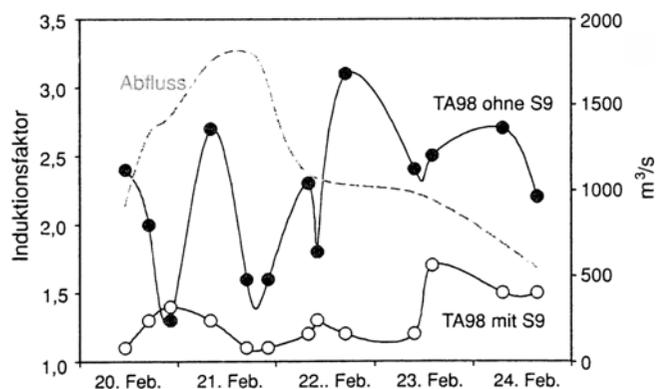


Abb. 5: Gang der mutagenen Wirkung von Schwebstoffextrakten des Hochwassers im Februar 1999 aus der Stauhaltung Heidelberg im Ames-Test mit dem Stamm TA98. In grau ist die Abflussganglinie des Hochwassers dargestellt

berst problematisch bewertet werden muss. Setzt man einen wesentlichen Beitrag remobilisierter Altsedimente voraus, so kann dies darauf zurückgeführt werden, dass das erste Hochwasser vermehrt Altsedimente freigelegt hat, die dann beim zweiten Hochwasser erodiert werden konnten. Insbesondere die starken zeitlichen Schwankungen der mutagenen Wirkung weisen jedoch auf ein komplexes Wirkungsmuster hin, das nicht alleine durch die Erosion von Altsedimenten zu erklären ist. Vielmehr scheinen auch in diesem Fall externe Quellen (Oberflächenabfluss, Abwasser, etc.) zu der beobachteten Wirkung beizutragen.

4.2.3 Endokrine Wirksamkeit

Im Dot Blot-Assay an isolierten Hepatocyten aus der Regenbogenforelle konnte im Oktober 1998 für acetonische Schwebstoffextrakte des ansteigenden Asts des Hochwassers eine signifikante Vitellogenin-Induktion nachgewiesen werden (Detaillierte Darstellung bei Hollert und Braunbeck 2001). Diese ließ sich mit stark erhöhten Konzentrationen an Nonylphenol (> 1000 µg/kg), Octylphenol (> 80 µg/kg), Diethylhexylphthalat (> 1000 µg/kg) und Dibutylphthalat (> 300 µg/kg) korrelieren. Bei dem zweiten untersuchten Hochwasser überwog dagegen eine antiöstrogene Wirkung der Sedimentextrakte.

5 Bewertung der Befunde vor dem Hintergrund einer möglichen Remobilisierung

Die hier vorgestellte integrierte Untersuchungsstrategie ermöglicht es, die Gefährdung des Gewässers durch eine mögliche Remobilisierung kontaminierter Sedimente zu beurteilen. In der vorliegenden Fallstudie konnte gezeigt werden, dass der interdisziplinäre Ansatz wesentlich tieferen Einblick in die maßgebenden Prozesse gewährt als dies durch Einzelstudien möglich wäre. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der überwiegende Transport des partikulär gebundenen Schadstoffpotenzials während kurzer Hochwasserereignisse stattfindet (Kern 1997, Hollert et al. 2000a, b). Die Untersuchungen an Sedimentkernen zeigen, dass hochkontaminierte Altsedimente erodiert werden können, die Remobilisierung dieser sedimentären Altlasten also möglicherweise zu dem bei Hochwasser beobachteten Schädigungspotenzial beiträgt. Auch die Befunde aus den Hochwasseruntersuchungen legen eine Beteiligung interner Quellen am beobachteten Schädigungspotenzial nahe, wobei mit der hier eingesetzten Untersuchungsstrategie eine exakte Zuordnung des Schädigungspotenzials zu remobilisierten Sedimenten bzw. externen Quellen nicht möglich ist. Hier ist ein großer Forschungsbedarf hinsichtlich des Beitrages verschiedener Quellen zur Belastung festzustellen. Geeignete Probenentnahmestrategien während Hochwasserereignissen (ober- und unterstrom von Stauhaltungen, unterhalb von Einleitungen von Kläranlagen und Wasserentlastungseinleitungen) würden in Kombination mit der Analyse von Daten aus Bioassays und chemischen Analysen in einer Quellkomponenten-Mischungsanalyse (Haag et al. 2000) Aufschluss über alle beteiligten Quellen und insbesondere den Beitrag kontaminierter Altsedimente erlauben. Die durchgeführten Untersuchungen

dokumentieren ein hohes ökotoxikologisches Schädigungspotenzial der Hochwasserschwebstoffe in den *In vitro*-Biotests, die eine Indikatorwirkung für die Belastung von Organismen im Ökosystem besitzen. Inwiefern die kurzfristige Exposition mit hochkontaminierten Schwebstoffen während Hochwasserereignissen nachhaltige Schädigungen der Organismen im Ökosystem und der Biozönose bewirkt, kann mit der hier durchgeführten Untersuchungsstrategie nicht bewertet werden. Die hier dargestellten Befunde verdeutlichen den großen Forschungsbedarf bezüglich einer Abschätzung der Wirkung von Hochwasserereignissen gegenüber Organismen im Fließgewässer. Weitgehenden Aufschluss hierüber könnte mit Hilfe von *In situ*-Experimenten erlangt werden, indem Organismen in einem experimentellen Ersatzsystem exponiert und erosiv mobilisierten Schwebstoffen ausgesetzt werden. Durch ein aktives Biomonitoring der Organismen könnte die unmittelbare Wirkung der kontaminierten Schwebstoffe zuverlässig abgeschätzt werden.

Danksagung. Die vorliegende Studie wurde durch das Projekt 'Lebensgrundlage Umwelt und ihre Erhaltung', Forschungszentrum Karlsruhe, Programm BW-Plus des Landes Baden-Württemberg (AZ Ö 97 004) und durch ein Stipendium an H. Hollert der Studienstiftung des Deutschen Volkes finanziell gefördert. Unser Dank gilt Frau Natalie Winn und Herrn Volker Garke für die Mitarbeit bei Probenahme und im Labor sowie der AG Prof. Dr. Mangini des Instituts für Umweltphysik der Universität Heidelberg für die radiometrischen Messungen. Frau Mechthild Stauder sei für die Hilfe bei Schwermetallanalysen, Frau Blanka Novak und Frau Ute Riffler-Kleis für die Durchführung zahlreicher Ames-Tests gedankt.

Literatur

- Ahlf W, Hollert H, Neumann-Hensel H, Ricking M (2002): A Guidance for the Assessment and Evaluation of Sediment Quality. *JSS* 2, 37-42
- Calmano W, Hong J, Förstner U (1993) Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential. *Water Science and Technology* 28, 223-235
- Clonfero E (1997): Genotoxicity of urban air particulate matter. *Med Lav* 88, 13-23
- Fairbairn DW, Olive PL, O'Neill KL (1995): The comet assay: a comprehensive review. *Mutat Res* 339, 37-59
- Förstner U, Müller G (1974): Schwermetalle in Flüssen und Seen. Springer-Verlag, Heidelberg, 225 S
- Fuchs S, Butz J, Holz A (1999): Schwermetallbilanz für Neckar und Lahn. In: Fuchs S, Hahn HH (Hrsg): Schadstoffe im Regenabfluss. IV Abschlusspräsentation des BMBF-Verbundprojektes NIEDERSCHLAG – Schriftenreihe des ISWW
- Haag I, Kern U, Westrich B (1999a): Kombinierte Bewertung kontaminierter Gewässersedimente: Tiefenabhängige Messung von Erosionsrisiko und Sedimentqualität. *Wasser & Boden* 51, 42-47
- Haag I, Kern U, Westrich B (1999b): Mobilität von Schadstoffen in Sedimenten staugeregelter Flüsse – Dynamik und Bilanzierung von Schwebstoffen und Schwermetallen in einer Stauhaltung. Wissenschaftlicher Bericht Nr.99/11 (VA 21) für das Projekt Wasser-Abfall-Boden, Forschungszentrum Karlsruhe (PW 96 182). Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, Stuttgart. <http://www.fzk.de>
- Haag I, Kern U, Cakir T (1999c) Schlämmanalyse zur Abtrennung von Kornfraktionen für weitergehende Untersuchungen. In: DVWK, Kern U, Westrich B (Hrsg): Methoden zur Erkundung, Untersuchung und Bewertung von Sedimentablagerungen und Schwebstoffen in Gewässern. DVWK-Schriften, Band 128, Bonn, S 231-234

- Haag I, Kern U, Westrich B (2000): Erosive Freisetzung von partikulären Stoffen aus Gewässersedimenten – Quantifizierung mit Hilfe der Quellkomponenten-Mischungsanalyse. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 44, 235–244
- Haag I, Kern U, Westrich B (2001): Erosion investigation and sediment quality measurements for a comprehensive risk assessment of contaminated sediments. *Sci Total Environ* 266, 249–257
- Haag I, Hollert H, Kern B, Braunbeck T, Westrich B (2002): Flood event sediment budget for a lock-regulated river reach and toxicity of suspended particulate matter. Proceedings of the 3rd International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRE), Dresden, July 2002, (accepted for publication)
- Hellmann H (1996): Organische Spurenstoffe in Gewässerschwebstoffen. In: Steinberg C, Calmano W, Klapper H, Wilken R-D (Hrsg): *Handbuch Angewandte Limnologie*. ecomed Verlag, Landsberg am Lech, S 5–46
- Hollert H, Braunbeck T (1997): Ökotoxikologie *in vitro* – Gefährdungspotential in Wasser, Sediment und Schwebstoffen. Veröff. PAÖ, 21. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, 189 S
- Hollert H, Grätzer H, Ahlf W, Braunbeck T (1999a): Einleitung – Kapitel Ökotoxikologie. In: DVWK, Kern U, Westrich B (Hrsg): *Methoden zur Erkundung, Untersuchung und Bewertung von Sedimentablagerungen und Schwebstoffen in Gewässern*. DVWK-Schriften, Band 128, Bonn, S 36–51
- Hollert H, Dürr M, Geier V, Erdinger L, Braunbeck T (1999b): Ökotoxikologie *in vitro*: Gefährdungspotenzial von Neckarsedimenten. In: Oehlmann J, Markert B (Hrsg): *Ökosystemare Ansätze in der Ökotoxikologie*. ecomed Verlag, Landsberg am Lech, S 444–462
- Hollert H, Dürr M, Erdinger L, Braunbeck T (2000a): Cytotoxicity of settling particulate matter (SPM) and sediments of the Neckar river (Germany) during a winter flood. *Environ Tox Chem* 19, 528–534
- Hollert H, Dürr M, Haag I, Winn N, Holtey-Weber R, Kern U, Färber H, Westrich B, Erdinger L, Braunbeck T (2000b): A combined hydraulic and *in vitro* bioassay approach to assess the risk of erosion and ecotoxicological implications of contaminated sediments in a lock-regulated river system. In: BfG (Hrsg): *Sediment assessment in European River Basins*. Reihe: *Mitteilungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde*, Koblenz, Berlin, S 156–160
- Hollert H, Braunbeck T (2001): Identifizierung und Bewertung (öko)toxikologisch belasteter Gewässer in Baden-Württemberg. Abschlussbericht an das Forschungszentrum Karlsruhe, Projekt BW-Plus (Förderkennzeichen O97 004), 206 S. <http://bwplus.fzk.de/>
- Hollert H, Dürr M, Olsman H, Halldin K, Bavel Bv, Brack W, Tysklind M, Engwall M, Braunbeck T (2002a): Biological and chemical determination of dioxin-like compounds in sediments by means of a sediment triad approach in the catchment area of the Neckar River. *Ecotoxicology*, accepted for publication
- Hollert H, Heise S, Pudenz S, Brüggemann R, Ahlf W, Braunbeck T (2002b): Application of a sediment quality triad and different statistical approaches (hasse diagrams and fuzzy logic) for the comparative evaluation of small streams. *Ecotoxicology*, accepted for publication
- Islinger M, Pawlowski S, Hollert H, Völkl A, Braunbeck T (1999): Measurement of vitellogenin-mRNA expression in primary cultures of rainbow trout hepatocytes in a non-radioactive dot blot/RNase protection-assay. *Sci Total Environ* 15, 109–122
- Kern U (1997): Transport von Schweb- und Schadstoffen in staueregelten Fließgewässern am Beispiel des Neckars. Universität Stuttgart. *Mitteilungen des Institutes für Wasserbau* 93, 1–209
- Kern U, Haag I, Schürlein V, Holzwarth M, Westrich B (1999): Ein Strömungskanal zur Ermittlung der tiefenabhängigen Erosionsstabilität von Gewässersedimenten: das SETEG-System. *Wasserwirtschaft* 89, 72–77
- Kern U, Westrich B (1995): Sediment contamination by heavy metals in a lock-regulated section of the river Neckar. *Mar. Freshwater Res.* 46, 101–106
- Kern U, Westrich B (1997): Sediment Budget Analysis for River Reservoirs. *Water Air and Soil Pollution* 99, 105–112
- Kraut KH, Bondareva O (2000): Anwendung von Flockungsverfahren bei der Regenwasserbehandlung. *Berichtreihe BWPLUS*. <http://bwplus.fzk.de/>
- Maltby L, Boxall ABA, Forrow DM, Calow P, Berton CI (1995): The effects of motorway runoff on freshwater ecosystems: 2. Identifying major toxicants. *Environ Tox Chem* 14, 1093–1101
- Maron DM, Ames BN (1983): Revised methods for the Salmonella mutagenicity test. *Mut. Res.* 113, 173–215
- Müller G (1992): Untersuchung der Neckar-Altsedimente und Bewertung ihres möglichen Einflusses auf die Gewässergüte und auf das Grundwasser. Institut für Sedimentforschung, Heidelberg
- Müller G (1993): Altsedimente in den Stauhaltungen des Neckars. In: Regierungspräsidium Stuttgart, Abteilung V-Wasserwirtschaft (1993): *Altsedimente in den Stauhaltungen des Neckars*, Regierungspräsidium, Stuttgart
- Neumann-Hensel H, Ricking M, Hollert H, Ahlf W (2000): Empfehlung zur Bewertung von Sedimentbelastungen. *Bodenschutz* 3, 111–117
- Power EA, Chapman PM (1992): Assessing sediment quality. In: Burton GA (Ed): *Sediment toxicity assessment*. Lewis-Publishers, Boca Raton, pp 1–18
- Rao SS, Kwan KK, Dukta BJ (1990): Toxicity associated with fluvial suspended particulates. *Ger J Appl Zool* 78, 78
- Segner H (1998): Fish cell lines as a tool in aquatic toxicology. In: Braunbeck T, Hinton DE, Streit B (Eds): *Fish ecotoxicology – Experientia Supplement*, Vol. 86. Birkhäuser, Basel/Switzerland, pp 1–38
- Song Y, Müller G (1999) *Sediment-water interactions in anoxic freshwater sediments*. Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 81. Springer-Verlag, Berlin, 111 pp
- Zimmer M, Ahlf W (1994): Erarbeitung von Kriterien zur Ableitung von Qualitätszielen für Sedimente und Schwebstoffe. UBA-Texte 69/94, Umweltbundesamt, Berlin

Eingegangen: 21. 11. 2001 · Akzeptiert: 11. 04. 2002
 OnlineFirst: 17. 05. 2002

Dr. rer. nat. Henner Hollert: Leitung lokales Organisationskomitee SETAC-GLB 2003

- Studium der Biologie und Geographie an der Universität Heidelberg von 1990 bis 1997. Februar 1997: Diplom in Biologie, Oktober 1997: Erstes Staatsexamen für das höhere Lehramt in Biologie/Geographie.
- Von November 1997 bis April 2001: Promotion über die 'Entwicklung eines kombinierten Untersuchungssystems für die Bewertung der ökotoxikologischen Belastung von Fließgewässersedimenten und -schwebstoffen'.
- Forschungsaufenthalte 1999 und 2000 an den Universitäten Uppsala und Örebro (Schweden) zur Untersuchung der Dioxin-ähnlichen Wirksamkeit von Sedimenten in embryonaler Hühnerleberkultur.
- In der Lehre seit 2000 als Wissenschaftlicher Angestellter am Zoologischen Institut (Abt. Morphologie/Ökologie) mit den Schwerpunkten Ökotoxikologie, Ökologie und Zoologie tätig.
- Leitung der Arbeitsgruppe Sediment- und Bodentoxikologie
- Forschungsschwerpunkte: Sediment- und Bodentoxikologie, Hochwasseruntersuchungen, Bioassay-dirigierte Fraktionierungstechniken, Statistische Bewertungsmethoden, Integrierte Sedimentuntersuchungen (Kombination aus Makrozoobenthosanalysen, *In vitro*-Biotests und chemischer Analytik)
- Vizepräsident der deutschsprachigen Sektion der Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC-GLB)
- Organisationskomitee der europäischen Jahrestagung der SETAC und des Club of Rome in Hamburg-Harburg 2003