



Floodsearch: Hochwasser im Labormaßstab Ökotoxikologie und Wasserbau arbeiten Hand in Hand bei der Hochwasserfolgenbewertung

Markus Brinkmann¹ (markus.brinkmann@bio5.rwth-aachen.de), Sebastian Hudjetz¹ (hudjetz@bio5.rwth-aachen.de), Henning Herrmann¹ (henning.herrmann@bio5.rwth-aachen.de), Catrina Cofalla² (cofalla@iww.rwth-aachen.de), Ulrike Kammann³ (ulrike.kammann@vti.bund.de), Markus Hecker⁴ (markus.hecker@usask.ca), Holger Schüttrumpf² (schuettrumpf@iww.rwth-aachen.de), Andreas Schäffer¹ (andreas.schaeffer@bio5.rwth-aachen.de), Henner Hollert¹ (henner.hollert@bio5.rwth-aachen.de)

¹ Institut für Umweltforschung, RWTH Aachen University, Aachen

² Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University, Aachen

³ Thünen-Institut für Fischereiökologie, Hamburg

⁴ School of the Environment and Sustainability & Toxicology Center, University of Saskatchewan, Saskatoon, Kanada

Zusammenfassung

Kontaminierte Sedimente, die durch Hochwasser oder Unterhaltungsbaggerungen resuspendiert werden, stellen eine bedeutende Sekundärquelle für persistente Schadstoffe in Fließgewässern dar. Die Risikobewertung von Sedimenten ist daher eine zentrale Aufgabe für den Schutz der aquatischen Umwelt, die mit einer Zunahme extremer Hochwasserereignisse infolge des Klimawandels zusätzliche Relevanz erhält. Einen wichtigen Ansatz zur Sedimentbewertung bietet der Projektverbund Floodsearch, bei dem hydrodynamische mit ökotoxikologischen Methoden kombiniert werden. Im Zuge der Forschungsarbeiten wurde eine experimentelle Methodik entwickelt, bei der ein Kreisgerinne zur Simulation von Hochwasserereignissen verwendet (1 und Abb. 2).

Hintergrund

Infolge extremer hydrodynamischer Ereignisse oder anthropogener Aktivitäten, zum Beispiel Hochwasser bzw. Baggertätigkeiten, kann es zur Resuspension von Sedimenten in Fließgewässern kommen. Auch schadstoffbehaftete Sedimente können so wieder in die Wassersäule gelangen, die als sekundäre Schadstoffquelle Auswirkungen auf aquatische Organismen haben können [1]. In den vergangenen Jahrzehnten wurden zahlreiche experimentelle und numerische Untersuchungen sowie in situ Messungen zum Transport- und Erosionsverhalten von Sedimenten durchgeführt. Weiterhin existiert eine Vielzahl von Untersuchungen, die sich mit den schädigenden Wirkungen von kontaminierten Sedimenten auf die aquatische Umwelt beschäftigen [2]. Derzeit ist jedoch nur wenig über die Bedeutung der Sedimentdynamik in direkter Wechselwirkung mit ökotoxikologischen Prozessen für das Toxizitätspotenzial in Gewässern bekannt, insbesondere für die Relevanz von kurzzeitigen Resuspensions-Ereignissen für Organismen in aquatischen Ökosystemen. Im Sinne eines nachhaltigen Sedimentmanagements im Einklang mit der europäischen Wasserrahmenrichtlinie, sowie der europäischen Hochwasserrisikomanagementrichtlinie muss es daher Ziel interdisziplinärer Forschung sein, die ökotoxikologischen Auswirkungen und das Risiko schadstoffbehafteter Sedimente für aquatische Ökosysteme in Abhängigkeit von Hydrodynamik und Sedimentdynamik zu beschreiben und zu bewerten. Dieses neu gewonnene Wissen soll helfen, bestehende Regelwerke und Managementpläne anzupassen und zu erweitern, sowie nachhaltige und kosteneffiziente Maßnahmen im Umgang mit kontaminierten Sedimenten zu entwickeln. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde in dem hier vorgestellten Projektverbund eine interdisziplinäre Methodik entwickelt, bei der Wasserbauingenieure und Ökotoxikologen gemeinsam die ökotoxikologische Relevanz resuspendierter Sedimente unter Berücksichtigung ihres Erosions- und

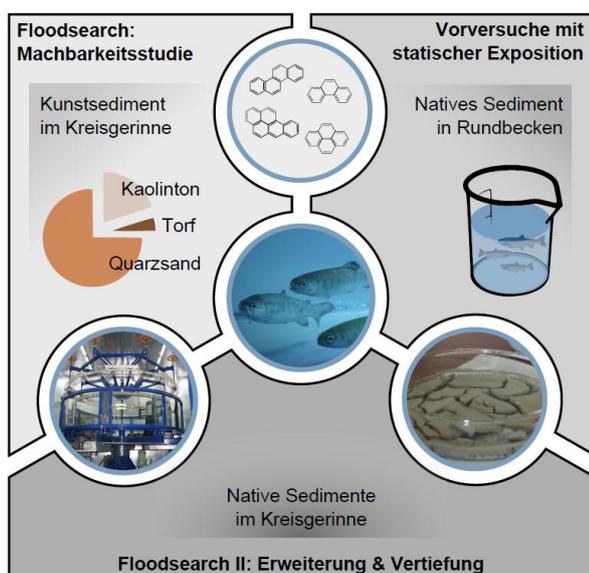


Abb. 1: Konzeptionelle Gesamtübersicht der durchgeführten experimentellen Arbeiten.

Transport-Verhaltens für charakteristische Strömungs-Bedingungen untersuchen und beschreiben [3-4].

Das Projekt Floodsearch: Eine Machbarkeitsstudie

Im Rahmen einer ersten Machbarkeitsstudie im interdisziplinären Projekt Floodsearch –gefördert durch die Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder – wurden zur Abschätzung der Umweltauswirkungen resuspendierter, kontaminierter Sedimente erstmals Methoden des Wasserbaus mit ökotoxikologischen Untersuchungen in einem Kreisgerinne (Abb.2), einem speziellen Versuchsstand zur Untersuchung von Erosions- und Sedimentationsprozessen kombiniert [5]. Zu diesem Zweck wurden Regenbogenforellen (*Oncorhynchus mykiss*) unter simulierten Hochwasserverhältnissen (5 Tage, DIN 4049-3 Hochwasserganglinie mit einer maximalen Sohlschubspannung von $0,3 \text{ N m}^{-2}$) mit einem Kunstsediment (OECD 218) exponiert, das mit einer Mischung verschiedener polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) in umweltrelevanten Konzentrationen dotiert wurde. Ein Experiment ohne Sediment und ein weiteres mit undotiertem Sediment wurden zur Beurteilung des Einflusses der Strömungsverhältnisse bzw. des Schwebstoffes auf die Tiere ebenfalls durchgeführt.



Abb. 2: Kreisgerinne am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen (Foto: Catrina Cofalla, aus Brinkmann et al. 2010)

Neben einer Batterie von Biomarkern zur Abschätzung der toxikologischen Wirkungen auf die Tiere (hepatische Enzymaktivitäten von 7 Ethoxyresorufin-O-Deethylase (EROD), Glutathion-S-Transferase (GST) und Katalase (CAT), Lipidperoxidation in Leberhomogenaten, Induktion von Mikronuklei in peripheren Erythrozyten) wurden ebenfalls analytische Methoden angewandt, um PAK-Metabolite in der Gallenflüssigkeit exponierter Fische zu messen [6].

Die Exposition gegenüber kontaminierten Sedimenten führte zu einer signifikanten Induktion der Mikrokernrate, die positiv mit der Konzentration von 3 Hydroxybenzo[α]pyren in der Gallenflüssigkeit korrelierte – einem Metabolit des genotoxischen PAK Benzo[α]pyren[7]. Weiterhin verursachte das simulierte Hochwasserereignis oxidativen Stress (Lipidperoxidation), der überraschenderweise in der PAK-exponierten

Gruppe signifikant verringert war. Die Untersuchungen der Enzymaktivitäten zeigten keine physiologischen Veränderungen an.

Die Machbarkeitsstudie konnte zeigen, dass Kreisgerinne hervorragende experimentelle Möglichkeiten bieten, um gekoppelte Erosions- und Expositionsstudien mit Sediment und Fischen durchzuführen. Weiterhin wurde deutlich, dass die relativ kurze Exposition von 5 Tagen gegenüber belasteten Sedimentsuspensionen während simulierter Hochwasserereignisse relevante Effekte in Regenbogenforellen verursachen kann. Jedoch zeigte sich auch deutlich, dass in künftigen Studien belastete Freilandsedimente mit natürlich gealterten Schadstoffrückständen eingesetzt werden sollten, um die ökotoxikologischen Auswirkungen der Remobilisierung von Schadstoffen im Hinblick auf eine integrierte Gewässerbewirtschaftung im Sinne der EU-WRRRL bewerten zu können.

Das Nachfolgeprojekt Floodsearch II: Auf dem Weg ins Freiland

Vorversuche zum Nachfolgeprojekt unter statischen Bedingungen

Im Kontext der Untersuchungen im Kreisgerinne ist es von entscheidender Bedeutung, die Kinetik der Schadstoff-Aufnahme von suspendierten Sedimentpartikeln und der resultierenden Effekte in den exponierten Fischen genau zu verstehen. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Nachfolgeprojekts Floodsearch II statische Expositionsexperimente mit Regenbogenforellen durchgeführt, die die Planung weiterer Experimente im Kreisgerinne voranbringen sollten [8].

Im Gegensatz zur zuvor vorgestellten Machbarkeitsstudie wurde nun ein natürliches und hervorragend charakterisiertes Rheinsediment aus dem Hafen Ehrenbreitstein in Koblenz verwendet, um die Übertragbarkeit auf Freilandverhältnisse zu gewährleisten [9]. Das Sediment wurde mit der bereits in Floodsearch verwendeten PAK- Mischung dotiert. Das undotierte Sediment, sowie eine unbelastete Kontrolle wurden ebenfalls untersucht. Die nominale Schwebstoffkonzentration in den Experimenten betrug 10 g L^{-1} . Neben der verhältnismäßig niedrigen Optimal-Temperatur für Regenbogenforellen von $12 \text{ }^\circ\text{C}$ wurden die Tiere zusätzlich bei $24 \text{ }^\circ\text{C}$ – einer Temperatur die an Sommertagen im Rhein in Folge des Klimawandels und der Abwärmelast von Kraftwerken heutzutage häufig überschritten wird – exponiert, um ein breites Spektrum möglicher Auswirkungen abbilden zu können. Nach 1, 2, 4, 6, 8 und 12 Tagen Exposition wurden physikalisch-chemische Parameter erfasst. Die Konzentrationen der eingesetzten PAK im Schwebstoff wurden mittels GC/MS bestimmt. In den exponierten Fischen ($n=10$ je Zeitpunkt) wurden die bereits zuvor als sinnvoll identifizierten Biomarker (Metabolite in Galle, EROD-Aktivität und Lipidperoxidation in Lebergewebe, Mikrokern in peripheren Erythrozyten) untersucht.

Im Experiment mit dotiertem Schwebstoff nahmen die Konzentrationen von Pyren und Phenanthren bei 12 °C mit der Zeit exponentiell ab (Halbwertszeiten 18,6 bzw. 1,3 d), während die Dissipation von Chrysen und Benzo[α]pyren weniger stetig verlief. Bei 24 °C erfolgte die Abnahme deutlich rascher, mit Halbwertszeiten von 3,6 bzw. 0,7 d. Die Analyt-Konzentrationen im undotierten Schwebstoff blieben im Verlauf der Versuche bei beiden Temperaturen relativ stabil.

Die Konzentrationen der PAK-Metabolite in Fischgalle waren nach Exposition mit dem undotierten Sediment im Vergleich zu unbehandelten Fischen bereits signifikant erhöht. Nach Exposition mit dem dotierten Sediment stiegen die Konzentrationen von 1-Hydroxypyren und 1-Hydroxyphenanthren auf sehr hohe Maximalwerte von 144 bzw. 15 $\mu\text{g ml}^{-1}$ bei 12°C und 166 bzw. 17 $\mu\text{g ml}^{-1}$ bei 24°C an, gefolgt von einer Quasi-Eliminationsphase durch die Dissipation der Substanzen aus dem Schwebstoff. Während die Ausgangskonzentrationen von Pyren und Phenanthren im Schwebstoff sich 4,5- bzw. 7-fach zwischen undotiertem und dotiertem Schwebstoff unterschieden, waren die Unterschiede bzgl. Aufnahme und Biotransformation deutlich höher: Für Pyren 120- und für Phenanthren 29-fach bei 12°C. Diese drastischen Unterschiede bezüglich der Verfügbarkeit können durch Alterungsprozesse der bereits in der Freilandprobe enthaltenen PAK erklärt werden.

Dem Maximum der PAK-Metabolite folgte mit einer Latenz von etwa zwei Tagen bei 24°C eine stark erhöhte Lipidperoxidation. Bei 12°C blieb die Reaktion aus, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass oxidativer Stress durch Metabolismus der PAK erst in Kombination mit Temperaturstress auftritt. Bei 12°C folgte weitere zwei Tage später auch eine signifikant erhöhte Mikrokernrate nach Exposition mit dem dotierten im Vergleich zum undotierten Schwebstoff. Die EROD-Aktivität im Lebergewebe zeigte erneut keine eindeutigen physiologischen Veränderungen an.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigten bereits unter statischen Bedingungen eine komplexe Dynamik der Biomarker-Antworten in Regenbogenforellen, die durch ein Kaskaden-artigen Verlauf beschrieben werden kann, in dem die verschiedenen Maxima zeitlich versetzt aufeinander folgten. Die Ergebnisse weiterer Biomarker-Untersuchungen nach Exposition in simulierten Hochwasserereignissen sollten daher stets vor diesem Hintergrund geprüft werden.

Hauptversuche im Kreisgerinne

Im Rahmen des noch laufenden Projektes Floodsearch II – ebenfalls gefördert durch die Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder – sollen Erkenntnisse aus den vorherigen Studien genutzt werden, um das Risiko und die Bioverfügbarkeit der partikelgebundenen Schadstoffe auf aquatische Organismen unter realistischen hydrodynamischen Strömungsbedingungen und unter definierten Umweltbedingungen abzuschätzen und auf diese Weise das Systemverständnis zu erweitern. Der in der Machbarkeitsstudie erarbeitete interdisziplinäre Forschungsansatz wurde methodisch verfeinert:

Die automatische Mess- und Probenahmetechnik des Gerinnes wurde erweitert und das Versuchsprogramm optimiert. Zur Steigerung der Aussagekraft weiterer Expositionsexperimente wurde die Dauer der Versuche im Kreisgerinne von 5 auf 7 Tage erhöht. Zur Reduktion der Komplexität und im Sinne der Vergleichbarkeit mit wasserbaulichen Experimenten zur Sedimentstabilität wurde die Simulation der vollständigen Hochwasserganglinie nach DIN 4049-3 durch eine gestufte Erhöhung der Sohlschubspannung ersetzt.

Ein wesentlicher neuer Aspekt ist der Einsatz natürlicher kohäsiver Sedimente unterschiedlichen Belastungsgrades aus den Flüssen Mosel und Rhein (Abb. 3), die in enger Kooperation mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde entnommen wurden. Solche kohäsiven Feinsedimente können aufgrund ihrer Oberflächeneigenschaften große Schadstoffmengen binden und stellen somit bei der Resuspension ein besonders hohes Risiko für die aquatische Umwelt dar [10].

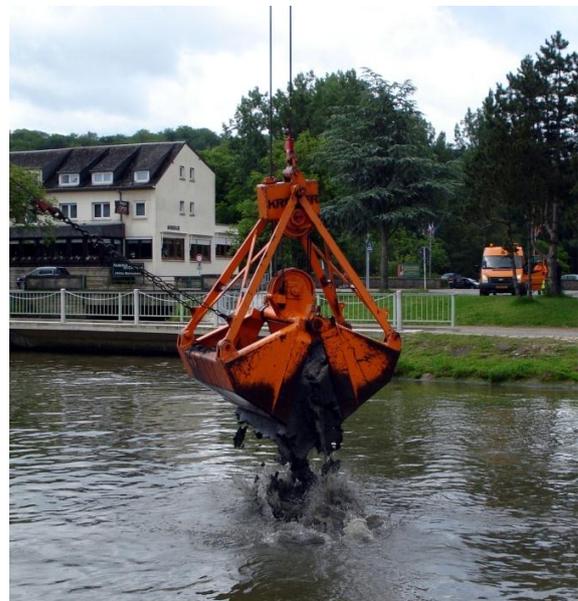


Abb. 3: Probenahme natürlicher Sedimente an der Mosel im Rahmen des Projektes Floodsearch II.

Wie bereits in der Machbarkeitsstudie wird derzeit das Erosions- und Sedimentationsverhalten in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit und Sohlschubspannung dieser Sedimente experimentell im Kreisgerinne untersucht. Analog werden Regenbogenforellen exponiert und biologische Proben mit Hilfe der bewährten Biomarker-Batterie untersucht. Sedimente und Schwebstoffproben, die während der Versuche im Kreisgerinne gewonnen wurden, werden derzeit chemisch-analytisch untersucht. Besonderes Interesse gilt hierbei der Stoffgruppe der PAK. Als zusätzlicher Parameter zur Beurteilung des Schädigungspotentials wird die freie Verfügbarkeit dieser Substanzgruppe in der Wasserphase mit Hilfe von Passivsammlern untersucht.

Schlussfolgerung und Ausblick

Die Ergebnisse des Projektverbundes verdeutlichen die übergeordnete Wichtigkeit von Studien unter realistischen Expositionsbedingungen zur Einschätzung und Bewertung von toxikologischen Hochwasserfolgen. Insbesondere der hier vorgestellte interdisziplinäre Ansatz ist dabei erfolgreich und besitzt das Potenzial wichtige Beiträge für das Management kontaminierter Sedimente zu liefern – auch im Kontext der EU-WRRL.

Danksagung

Die Autoren dieses Beitrags bedanken sich beim Exploratory Research Space (ERS) an der RWTH Aachen University für die Bewilligung und Finanzierung des Projekts durch Zuschüsse der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder, sowie dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) und dem Undergraduate Research Opportunities Program (UROP) für die Bereitstellung von Reisemitteln.

Kurzlebenslauf: M.Sc. Markus Brinkmann

Der Autor dieses Artikels wurde auf der diesjährigen gemeinsamen Jahrestagung der GDCh-Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie und der SETAC GLB mit dem Preis für die beste Masterarbeit 2011 ausgezeichnet.

- 2006-2009: Studium der Biologie in Heidelberg, später RWTH Aachen (B.Sc.)
- 2009-2011: Ökotoxikologie (M.Sc.) an der RWTH Aachen. Beutruer der Arbeit: Prof. Dr. Henner Hollert und Prof. Dr. Andreas Schäffer
- Seit 2012: Promotionsstudium und Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Hollert im Lehr- und Forschungsgebiet Ökosystemanalyse, Institut für Umweltforschung, RWTH Aachen

Literatur

- [1] Hollert H, Haag I, Dürr M, Wetterauer B, Holtey-Weber R, Kern U, Westrich B, Färber H, Erdinger L, Braunbeck T, 2003. Investigations of the ecotoxicological hazard potential and risk of erosion of contaminated sediments in lock-regulated rivers. *Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung* 15:5-12.
- [2] Wölz J, Fleig M, Schulze T, Maletz S, Lübcke-von Varel U, Reifferscheid G, Kühlers D, Braunbeck T, Brack W, Hollert H, 2010. Impact of contaminants bound to suspended particulate matter in the context of flood events. *Journal of Soils and Sediments* 10:1174-1185.
- [3] Cofalla C, Hudjetz S, Roger S, Brinkmann M, Frings R, Wölz J, Schmidt B, Schäffer A, Kammann U, Hecker M, Hollert H, Schüttrumpf H., 2012. A combined hydraulic and toxicological approach to assess re-suspended sediments during simulated flood events - part II: an

interdisciplinary experimental methodology. *Journal of Soils and Sediments* 12:429-442.

- [4] Schüttrumpf H, Brinkmann M, Cofalla C, Frings R, Gerbersdorf S, Hecker M, Hudjetz S, Kammann U, Lennartz G, Roger S, Schäffer A, Hollert H., 2011. A new approach to investigate the interactions between sediment transport and ecotoxicological processes during flood events. *Environmental Sciences Europe* 23:39.
- [5] Wölz J, Cofalla C, Hudjetz S, Roger S, Brinkmann M, Schmidt B, Schaffer A, Kammann U, Lennartz G, Hecker M, Schüttrumpf H, Hollert H., 2009. In search for the ecological and toxicological relevance of sediment remobilisation and transport during flood events. *Journal of Soils and Sediments* 9:1-5.
- [6] Kammann U, 2007. PAH metabolites in bile fluids of dab (*Limanda limanda*) and flounder (*Platichthys flesus*) - spatial distribution and seasonal changes. *Environmental Science and Pollution Research* 14:102-108.
- [7] Brinkmann M, Hudjetz S, Cofalla C, Roger S, Kammann U, Giesy JP, Hecker M, Wiseman S, Zhang X, Wölz J, Schüttrumpf H, Hollert H., 2010. A combined hydraulic and toxicological approach to assess re-suspended sediments during simulated flood events. Part I - multiple biomarkers in rainbow trout. *Journal of Soils and Sediments* 10:1347-1361.
- [8] Brinkmann M, Hudjetz S, Kammann U, Hennig M, Kuckelkorn J, Chinoraks M, Cofalla C, Wiseman S, Giesy JP, Schäffer A, Hecker M, Wölz J, Schüttrumpf H, Hollert H, 2012. How flood events affect rainbow trout: Evidence of a biomarker cascade in rainbow trout after exposure to PAH contaminated sediment suspensions. *Aquatic Toxicology*. Accepted for publication (minor revisions)
- [9] Höss S, Ahlf W, Fahnenstrich C, Gilberg D, Hollert H, Melbye K, Meller M, Hammers-Wirtz M, Heininger P, Neumann-Hensel H, Ottermanns R, Ratte HT, Seiler TB, Spira D, Weber J, Feiler U. 2010. Variability of sediment-contact tests in freshwater sediments with low-level anthropogenic contamination: Determination of toxicity thresholds. *Environmental Pollution* 158:2999-3010.
- [10] Gerbersdorf S, Hollert H, Brinkmann M, Wieprecht S, Schüttrumpf H, Manz W., 2011. Anthropogenic pollutants affect ecosystem services of freshwater sediments: the need for a "triad plus x" approach. *Journal of Soils and Sediments* 6:1099-1114.

Korrespondenzadresse:

Markus Brinkmann
Institut für Umweltforschung
RWTH Aachen
Worringerweg 1
52074 Aachen

Tel.: 0241 / 80-26686

E-Mail: markus.brinkmann@bio5.rwth-aachen.de