

Fate and Transport Modeling of Cohesive
Sediment and Sediment-bound HCB in the
Middle Elbe River Basin

Modellierung des Transports kohesiver
Sedimente und des Verbleibs
sedimentgebundenen Hexachlorbenzols
(HCB) im Einzugsgebiet der mittleren Elbe

Dem Promotionsausschuss der Technischen
Universität Hamburg-Harburg

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der Naturwissenschaften

vorgelegte Dissertation von

Kari Moshenberg aus New York, USA

Oktober 2013

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Calmano

Abstract (English)

Chemical contamination of waterways and floodplains is a pervasive environmental problem that threatens aquatic ecosystems worldwide. The Elbe River is the third largest river in Central Europe, starting in the Czech Republic and running through Dresden and Hamburg before emptying into the North Sea. Due to extensive historical contamination and redistribution of contaminated sediments throughout the basin, the Elbe River transports significant loads of contaminants downstream, particularly during flood events. The high mobility of the fine-grained sediments within the basin means that sections of the Elbe River are unlikely to achieve the goals of the Water Framework Directive by 2015 (Zebisch et al., 2005). This study focuses on transport of cohesive suspended sediment and Hexachlorobenzene (HCB), a contaminant of concern in the Elbe River Basin. Sediment-sorbed concentrations of HCB significantly exceed environmental quality criteria and the Elbe River Community (FGG Elbe) has stated that a reduction of 98 % of the sediment-bound HCB load (relative to 2006) would be necessary to achieve all management objectives (FGG Elbe, 2009). To better understand the fate and transport of cohesive sediments and sediment-sorbed HCB, a hydrodynamic and sediment transport model for the reach of the Elbe River basin between Dresden and Magdeburg was developed. An evaluation of impact of the numerous groynes, or spit dykes, along the Elbe, was integrated into the modeling effort.

A quasi-2D model, which includes both a 1D representation of the Elbe between Dresden and Magdeburg and the Elbe's floodplains between Torgau and Magdeburg, was developed. The model was calibrated and validated for hydrodynamics, cohesive suspended sediment and sediment-sorbed HCB. A 2D flexible mesh model was developed between Aken and Barby to evaluate the impacts of groyne fields. The 1D and 2D flexible mesh model allowed for quantification the impact of groyne fields on sediment travel time. Simulations were run to evaluate sediment travel time during high water events.

The impact analysis of Elbe groyne fields showed that they reduce transport times of cohesive material and associated sediment sorbed contaminants approximately 15 % during average hydrodynamic conditions. The quasi 2D model was run under a variety of discharge scenarios to calculate the extent of transport of sediment and sediment-bound HCB to the floodplains (337 km²) between Torgau and Magdeburg during nine high water events exceeding mean high discharge (MHQ) between 1998 and 2011. Results for sediment and HCB accumulation on floodplains are presented and discussed. A discussion of uncertainty and issues in model development is included. In addition, ample evidence that extreme high water events, such as the August, 2002 floods can have long-term implications on the suspended sediment transport regime and contaminant loads is provided.

A worst case analysis of HCB uptake by dairy cows and beef cattle indicate that significant, biologically relevant quantities of sediment-sorbed HCB accumulate on the Elbe floodplains following flood events. Given both the recent high frequency of floods in the Elbe Basin, and the potential increase in flood frequency due to climate change, an evaluation of source control measures and/or additional monitoring of floodplain soils and grasses is recommended.

ii

Abstract (German)

Die Belastung mit Chemierückständen ist ein allgegenwärtiges Umweltproblem und belastet weltweit aquatische Ökosysteme. Aufgrund intensiver Verschmutzung in der Vergangenheit und der Verteilung von belasteten Sedimenten im gesamten Stromgebiet transportiert die Elbe signifikante Mengen an Schadstoffen stromabwärts, insbesondere während Hochwasserereignissen (Heise et al., 2008). Die hohe Mobilität der feinkörnigen Sedimente innerhalb des Stromgebiets wird mit hoher Wahrscheinlichkeit dazu führen, dass

Abschnitte der Elbe die in der Wasserrahmenrichtlinie für 2015 festgelegten Ziele nicht erreichen werden (Zebisch et al., 2005).

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf den Transport von kohäsiven Sedimenten und Hexachlorbenzol (HCB), ein contaminant of concern im Einzugsgebiet der Elbe. Sediment- gebundene Konzentrationen von HCB übersteigen in nahezu allen Stromabschnitten Umweltqualitätskriterien, und die Flussgebietsgemeinschaft Elbe stellt in ihrem Hintergrundpapier von 2009 fest, dass eine Reduktion der HCB-Fracht um 98 % (gegenüber 2006) nötig wäre, um alle Bewirtschaftungsziele zu erreichen (FGG Elbe, 2009). Um die Transportwege und den langfristigen Verbleib von kohäsiven Sedimenten und sedimentgebundenem HCB besser zu verstehen, wurde ein quasi-2D-Modell entwickelt, welches sowohl eine 1D-Repräsentation der Elbe zwischen Dresden und Magdeburg als auch des Stromgebiets zwischen Torgau und Magdeburg enthält. Das Modell wurde kalibriert und validiert für Hydrodynamic, kohäsive suspendierte Sedimente und sedimentgebundenes HCB. Ein 2D flexible mesh-Modell deckt die Strecke zwischen Aken und Barby ab und diente der Evaluation der Auswirkungen von Bühnenfeldern, insbesondere die Quantifizierung ihrer Auswirkungen auf das Transportverhalten der Sedimente.

Die Analyse der Bühnenfelder zeigt, dass diese die Transportzeit von kohäsivem Material und den damit verbundenen sedimentgebundenen Schadstoffen während durchschnittlicher hydrodynamischer Bedingungen um rund 15% reduzieren. Das quasi-2D-Modell wurde für Simulationen einer Vielzahl von Abflussszenarien eingesetzt, um das Volumen des Sedimenttransports und des Transports von sedimentgebundenem HCB auf die Auen der Elbe zwischen Torgau und Magdeburg während der neun Hochwasser, die zwischen 1998 und 2011 den mittleren Hochwasserstand überschritten, zu berechnen. Die resultierenden Ergebnisse der Sediment- und HCB-Ablagerung auf den Flussauen werden diskutiert. Ebenfalls enthalten ist eine Betrachtung

der Unsicherheitsfaktoren und der Schwierigkeiten bei der Modellentwicklung. Nicht zuletzt werden zahlreiche Hinweise vorgestellt, die darauf schließen lassen, dass extreme Hochwasser wie die Flut von 2002 langfristige Auswirkungen auf den Sedimenttransport und die damit verbundenen Schadstoffbelastungen der Auen haben können.

Eine worst-case-Analyse der Belastungen von Milchkühen und Rindern mit HCB läßt darauf schließen, dass signifikante, d.h. biologisch relevante Mengen an sedimentgebundenem HCB während Hochwasserereignissen auf die Auen der Elbe gelangen. Angesichts der recht hohen Frequenz der Hochwasser im Einzugsgebiet der Elbe und einer möglichen Zunahme solcher Ereignisse im Zusammenhang mit dem Klimawandel scheint es angeraten, Maßnahmen zur ständigen Überwachung von Boden- und Vegetationsbelastung in den Elbeauen und/oder Maßnahmen zur Kontrolle der Schadstoffquellen zu evaluieren.