

**KLIWAS Schriftenreihe
KLIWAS-48/2014**

**Schlussbericht
KLIWAS-Projekt 5.01**

**Klimaprojektionen für den Sedimenthaushalt
und Risiken durch kohäsive Sedimente**

Koblenz, im September 2014



KLIWAS

KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-48/2014

Schlussbericht
KLIWAS-Projekt 5.01

Klimaprojektionen für den Sedimenthaushalt
und Risiken durch kohäsive Sedimente

Autoren:

Gudrun Hillebrand
Thorsten Pohlert
Vera Breitung

Zitiervorschlag:

HILLEBRAND, G., POHLERT, T., BREITUNG, V. (2014): Klimaprojektionen für den Sedimenthaushalt und Risiken durch kohäsive Sedimente. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.01. KLIWAS-48/2014. BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas_48/2014_5.01

URL: http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_48_2014_5.01.pdf

Seite

Kapitel

Inhaltsverzeichnis

04		TABELLENVERZEICHNIS
04		ABBILDUNGSVERZEICHNIS
05	1	KURZFASSUNG
08	2	ZIELE
09	3	STAND DER FORSCHUNG
12	4	METHODEN
15	5	DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN
20	6	VERNETZUNG DES PROJEKTES, KOOPERATIONSPARTNER
22	7	ERGEBNISSE
22	7.1	ERREICHTER METHODISCH-WISSENSCHAFTLICHER FORTSCHRITT
26	7.2	KERNAUSSAGEN ZU DEN ERGEBNISSEN
27	7.2.1	NAHE ZUKUNFT
28	7.2.2	FERNE ZUKUNFT
29	7.3	EINSCHÄTZUNG ZUM GRAD DER BETROFFENHEIT DES SYSTEMS WASSERSTRAßE UND DES OPERATIVEN GESCHÄFTS DER WSV IM VERANTWORTUNGSBEREICH DES BMVI
30	7.4	KERNAUSSAGEN ÜBER MÖGLICHE ANPASSUNGSOPTIONEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN
32	8	DISKUSSION UND AUSBLICK
34	9	DANKSAGUNG
35	10	LITERATUR
40	11	ABKÜRZUNGEN

Seite

Tabelle

Tabellenverzeichnis

17	1	FÜR DIE BODENEROSIONSMODELLIERUNG VERWENDETE KLIMAPROJEKTIONEN
19	2	FÜR DIE SCHWEBSTOFFTRANSPORTMODELLIERUNG VERWENDETE ABFLUSSPROJEKTIONEN
21	3	PROJEKT 5.01 - KOOPERATIONEN UND AUFTRÄGE

Seite

Abbildung

Abbildungsverzeichnis

12	1	EINBINDUNG DES PROJEKTS IN KLIWAS
19	2	ÜBERSICHT ÜBER DEN MIT SOBEK MODELLIERTEN ABSCHNITT DES ELBESYSTEMS
22	3	BODENEROSION FÜR DEN REFERENZZEITRAUM (1961-1990) IM RHEINEINZUGSGEBIET BERECHNET MIT PESERA
23	4	BODENEROSION (T/HA/A) FÜR DEN REFERENZZEITRAUM (1961-1990) IM ELBEEINZUGSGEBIET BERECHNET MIT PESERA
29	5	ÄNDERUNGSSIGNALE DER MITTLEREN SCHWEBSTOFFJAHRESFRACHT BEI HITZACKER (ELBE-KM 522,6)

1 Kurzfassung

Der Klimawandel hat einen Einfluss auf den Sedimenthaushalt der schiffbaren Flüsse. Extreme Niederschlagsereignisse können dem Fluss beispielsweise innerhalb weniger Tage Schwebstoffe in Höhe einer gesamten mittleren Jahresfracht zuführen. Zum anderen sind die feinkörnigen Sedimente in den Flusstauhaltungen, in Hafenbecken, Buhnenfeldern und im Vorland örtlich stark mit Schadstoffen belastet. Ihr Remobilisierungsverhalten bestimmt neben aktuellen Schadstoffeinträgen entscheidend die Baggergutqualität weiter unterstrom gelegener Wasserstraßenabschnitte bis hin zu den Küstengewässern. Mit zunehmender Häufigkeit und Intensität der Hochwasser steigt das Risiko der Remobilisierung dieser schadstoffbelasteten Altsedimente und ihrer Verlagerung nach unterstrom.

Ziel des Projektes war es, in Projektionen bis zum Jahr 2100 die klimatisch bedingten Veränderungen bezüglich der quantitativen und damit verbundenen qualitativen Aspekte der Sedimentbewirtschaftung zu untersuchen. Ein weiteres Ziel war es, der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung belastbare Informationen über die mit einem veränderten Oberwasserabfluss verbundenen Einträge kontaminierter Sedimente aus dem Binnenbereich in die Tide- und Küstengewässer bereitzustellen. Untersuchungsgebiete sind der Oberrhein und die deutsche Binnenelbe.

Im Projekt wurden Modellsysteme auf unterschiedlichen Skalen eingesetzt (Einzugsgebietsskala, großräumiger Transport im Flussschlauch, lokale Betrachtung bis zur Kornskala). Die Ergebnisse der unterschiedlichen Modelle sind widerspruchsfrei. Soweit mit verschiedenen Modellen in Projektionsrechnungen Änderungssignale für dieselben Zielparameter ermittelt wurden, stimmen diese gut überein.

Das Systemverständnis wurde im Rahmen des Projekts in verschiedenen Bereichen verbessert. So wurden die Kenntnisse über die räumliche Verteilung der Schadstoffgehalte von Sedimenten an Belastungspunkten an Oberrhein und Elbe durch Kartierungen verbessert. Es wurden Beiträge zur Optimierung der Methodik des Schwebstoffmonitorings an BWaStr geleistet. Die Schwebstofffrachten von Rhein und Elbe wurden mit statistischen Methoden auf längerfristige und saisonale Trends sowie auf Korrelationen mit dem Abfluss und weiteren Parametern untersucht. Für ausgewählte Schadstoffe wurden die Frachten im Schwebstoff von Rhein und Elbe zur Validierung der Schadstofftransportmodelle und als Referenzzustand für die Projektionsrechnungen zu zukünftigen Klimabedingungen berechnet. Es wurde erstmals für Rhein und Elbe ein Einzugsgebietsmodell zur Berechnung der großskaligen Bodenerosion durch fließendes Wasser und des daraus resultierenden Sedimenteintrages entwickelt. Das dreidimensionale Feststofftransportmodell in der Staustufe Iffezheim liefert ein besseres Verständnis der Sedimentationsdynamik des Verlandungsbereichs.

Die in der Oberrheinstaufenkette beobachtete positive Korrelation zwischen Korngrößen und HCB-Belastung ist ungewöhnlich und bisher nicht erklärt. Im Rahmen des Projektes wurden Hypothesen zu dieser unerwartet positiven Korrelation geprüft und konnten ausgeschlossen werden, wodurch die Ursache dieser Korrelation eingegrenzt werden konnte. Nach der im Rahmen des Projektes durchgeführten Sedi-
menterkundung am Oberrhein befindet sich insbesondere im Oberwasser der Wehrbereiche der Stauhaltungen ein großes Reservoir an Sedimenten, die oberflächennah mit HCB hoch bis sehr hoch belastet sind (sekundäre Quellen). Ohne Maßnahmen zur Sicherung und Beseitigung dieser schadstoffbelasteten Sedimente ist das kurz- bis mittelfristige Erreichen der für den Rhein formulierten Umweltqualitätsziele zur Schwebstoffgüte bereits unter derzeitigen Klimabedingungen gering wahrscheinlich.

In den Projektionsrechnungen der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 bzw. 2071-2100) für Oberrhein und Binnenelbe wurde im Vergleich zum Referenzzeitraum (1961-1990) keine eindeutige großräumige Tendenz in den Schwebstofffrachten durch den Klimawandel beobachtet. Die Änderungssignale aufgrund des Klimawandels liegen in derselben Größenordnung wie anthropogene Einflüsse (beispielsweise Landnutzungsänderungen oder Frachtrückgang durch Querverbauung). Die Projektionen der Jahresfrachten des Schwebstoffs folgen im Trend der Entwicklung der mittleren Abflüsse (MQ). Die Änderungssignale der Schwebstoffjahresfrachten sowohl nach oben als auch nach unten sind in der Regel stärker ausgeprägt als die Änderungssignale des MQ. Eine signifikante Änderung im Abflussregime der Elbe ließe also signifikante Änderungen in den Schwebstofffrachten und damit auch im Schwebstoffeintrag in die Tideelbe erwarten.

Während in den Projektionsrechnungen keine eindeutige großräumige Tendenz in den Schwebstofffrachten durch den Klimawandel beobachtet wurde, zeigte sich regional für Teileinzugsgebiete zum Teil eine deutliche Sensitivität hinsichtlich klimatischer Änderungen. So zeigen die Projektionen zur Bodenerosion und zum Sedimenteintrag mit fünf Ensemble-Mitgliedern eine klimabedingte Zunahme des Feinsedimenteintrags aus dem Alpenraum, was zu erhöhten Unterhaltungsbaggerungen im staugeregelten Oberrhein führen könnte. Für den Feinsedimenteintrag in Main, Mosel und Neckar ist dagegen keine klimabedingte Änderung erkennbar. Eine regionale Betrachtung ist deshalb notwendig. Die Ergebnisse können nicht direkt von einem Gebiet auf ein anderes übertragen werden.

Im Rahmen des Projektes wurde für die Binnenelbe ein eindimensionales numerisches Feststofftransportmodell aufgebaut und sowohl hydrodynamisch als auch für den quantitativen Schwebstofftransport kalibriert. Aufbauend auf diesen Arbeiten können Berechnungen des partikelgebundenen Schadstofftransportes für ausgewählte Schadstoffe entlang des Elbehauptstroms durchgeführt werden. Da das Modell szenarienfähig ist, können sowohl Fragen zur Klimaänderung (veränderte Abflussbedingungen und Schwebstoffkonzentrationen im Gewässer), als auch Fragen zur Effizienz von Sanierungsmaßnahmen untersucht werden.

Im Hinblick auf Anpassungsoptionen können aufgrund der großen Bandbreite an projizierten Änderungssignalen der Schwebstofffrachten derzeit keine spezifischen Maßnahmen empfohlen werden. Generell sind Maßnahmen zu empfehlen, die einerseits bereits heute positive Effekte erzielen können und/oder die andererseits flexibel genug sind, um auf etwaige künftige Änderungen reagieren zu können. Hierzu gehört die Fortführung der Aktivitäten zum umweltgerechten und wirtschaftlichen Umgang mit der HCB-Belastung am Oberrhein, um Maßnahmen zur Förderung der Sedimentdurchgängigkeit zu ermöglichen und die wirtschaftliche Beseitigung von Mindertiefen zu gewährleisten.

Klimaprojektionen
für den Sediment-
haushalt und
Risiken durch
kohäsive
Sedimente

2 Ziele

Die Wirkungszusammenhänge zwischen Eingriffen in den Sedimenthaushalt und der Schadstoffbelastung der Sedimente sind bislang nicht umfassend verstanden und beschrieben. Das Verständnis dieser Zusammenhänge ist jedoch Grundlage für effektive Monitoringstrategien belasteter Sedimente und der Abschätzung ihres Remobilisierungspotenzials. Maßnahmenvorschläge für die risikoorientierte nachhaltige Bewirtschaftung der Sedimente und des Baggergutes erfordern daher erweiterte Kenntnisse der Prozesse auf Flusseinzugsgebietsskala.

Die aus Klima- und Abflussszenarien ermittelten Veränderungen des Sedimenthaushalts werden im Hinblick auf deren Wirkungen auf die Unterhaltung der BWaStr und auf die Umwelt untersucht. Dabei wird die Sedimentqualität als wesentliche Rahmenbedingung berücksichtigt.

Ziel ist es, die klimatisch bedingten Veränderungen bezüglich der quantitativen und damit verbundenen qualitativen Aspekte der Sedimentbewirtschaftung zu untersuchen. Durch eine an veränderte klimatische Verhältnisse angepasste Bewirtschaftung soll ein ausgeglichener Sedimenthaushalt und dauerhaft eine gute Sedimentqualität gewährleistet werden. Ein weiteres Ziel ist es, der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung wissenschaftlich fundierte Informationen über die mit einem veränderten Oberwasserabfluss verbundenen Einträge kontaminierter Sedimente aus dem Binnenbereich in die Tide- und Küstengewässer bereitzustellen. Untersuchungsgebiete sind der Oberrhein und die deutsche Binnenelbe.

3 Stand der Forschung

Der Aufteilung folgend in die qualitativen und die quantitativen Aspekte, aus denen sich ein integrales Sedimentmanagement zusammensetzt, wird zunächst auf den Kenntnisstand zu den Fragestellungen der Schwebstoff- und Sedimentgüte in den betreffenden Wasserstraßenbereichen und dann auf den Feststoffhaushalt eingegangen.

Für den Oberrhein stellt entsprechend der Datengrundlage der IKS (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins) und den Erfahrungen aus den Sedimenträumungen der Stauhaltung Iffezheim derzeit das partikelgebundene Hexachlorbenzol (HCB) für das Sedimentmanagement und die zu erreichenden Ziele der Wasserrahmenrichtlinie bzw. der Tochterrichtlinie die problematische Kenngröße dar.

Aus eigenen Voruntersuchungen zur Schwebstoffgüte ist ein Anstieg der partikelgebundenen HCB-Belastung in Schwebstoffen zwischen Weil am Rhein und Karlsruhe/Maxau zu beobachten. So steigt der Median der HCB-Konzentration im Schwebstoff zwischen Kembs (Rhein-KM 175) bis Marckolsheim (Rhein-KM 240) von 3 µg/kg TS auf 30 µg/kg TS an. Dies lässt vermuten, dass es in diesem Streckenabschnitt zu einer mehr oder weniger kontinuierlichen Freisetzung von HCB belastetem Sediment aus sekundären Quellen kommt, was nun im Rahmen des Projektes durch eine Identifizierung und Kartierung belasteter Sedimentbereiche und der Auswertung von langen Datenreihen aus dem Schwebstoff-Gütemessprogramm näher untersucht wurde. Die zu erhebenden Daten zur Sedimentbelastung ergänzen die vorliegenden Daten aus dem IKS-Forschungsprojekt „Untersuchungen zum Resuspensionsrisiko von Sedimentablagerungen in ausgewählten Staustufen des Rheingebietes“ aus den Jahren 2000-2002 und dienen ebenso zur Erstellung eines 1D-Strömungs- und Transportmodells.

Ferner weisen die in eigenen Voruntersuchungen erhobenen Daten zur Sedimentgüte auf eine stark inhomogene Verteilung von HCB innerhalb einer Sedimentprobe und eine positive Korrelation zwischen Korngröße (ermittelt durch Nasssiebung) und der HCB-Konzentration im Feststoff hin, was in dieser Weise bisher in der Literatur nicht beschrieben wurde. Die Sorption des hydrophoben HCB in Sedimenten sollte in erster Linie durch den Gehalt an organischer Substanz kontrolliert werden (Sorption an organischen Oberflächen oder Lösung in Fulvo- und Huminsäuren), was durch den Verteilungskoeffizienten zwischen organischer Substanz und Wasser (log KOC-Wert) mathematisch beschrieben werden kann. Nur bei sehr geringen Gehalten organischer Substanz sei nach dem Stand des Wissens die mineralische Zusammensetzung des Sedimentes bedeutsam für die Sorption von HCB. Deshalb sollten durch weitere Sedimentgüte-Untersuchungen in unterschiedlichen Kornklassen die Beobachtungen

zur positiven Korrelation zwischen HCB-Konzentration und Korngröße statistisch abgesichert und Sorptionsexperimente durchgeführt werden, um die maßgeblichen Sorbenten für HCB zu identifizieren und Ansätze zur Erklärung für die stark inhomogene Verteilung von HCB in Sedimentproben zu finden.

Im Rahmen der Untersuchungsprogramme durch die IKSr wurden u. a. Untersuchungen zur Erosionsstabilität von Sedimenten in Stauhaltungen ausgewählter Flüsse (WITT ET AL. 2003, WITT 2004) durchgeführt. Ähnliche Untersuchungen zur Erosionsstabilität wurden auch für Buhnenfeldsedimente der Elbe vorgenommen (SCHWARTZ & KOZERSKI 2004). In dieser Studie wurde die durch das Augusthochwasser 2002 bewirkte Erosion feinkörniger, belasteter Sedimente in einem Buhnenfeld beschrieben, die die Bedeutung der Buhnen als (Inter-)Aktionsraum des Sedimenttransportes hervorhebt.

Aus der Schadstoffbelastung kohäsiver Sedimente resultierende Risiken wurden für Rhein (HEISE ET AL. 2004) und Elbe (HEISE ET AL. 2005, 2008) nach einem dreistufigen Ansatz abgeschätzt. Die Ausweisung und Charakterisierung erfolgte nach:

1. den im Einzugsgebiet relevanten Schadstoffen;
2. den durch diese Schadstoffe kontaminierten Gebieten, die potenzielle Quellen darstellen
3. den Gebieten, von denen durch Ausmaß, Qualität und Lagerung des kontaminierten Materials in Abhängigkeit von der Abflusssituation ein Risiko für stromabwärts gelegene Gebiete ausgeht.

Es liegen weiterhin Ergebnisse zum Feststoffhaushalt aus vergleichenden Betrachtungen zu Frachten, Baggerungen und Peilungen im Bereich der Staustufenkette des Oberrheins vor, die Ursachen und Entwicklungen der Baggermengen und Frachten aufzeigen (Bericht der UAG SuBedO (STÄNDIGE KOMMISSION hrsg. 2008)). Die vorhandenen Peilungen mit einer engen zeitlichen Auflösung stellen eine aussagekräftige Grundlage auch für das Verständnis der Sedimenttransportvorgänge bei unterschiedlichen Abflüssen dar. Die Peilergebnisse und Auswertungen der Frachten bei besonderen Abflussereignissen geben darüber hinaus Hinweise darauf, dass Anlandungsvorgänge vor den Wehren erhöhten Abflüssen mit erheblicher Schwebstoffführung zuzuordnen sind. Das extreme Niederschlagsereignis im August 2005 in den Schweizer Zentralalpen hat dem Oberrhein innerhalb weniger Tage Schwebstoffe in Höhe einer gesamten Jahresfracht zugeführt (VOLLMER & GÖLZ 2006).

Bezüglich der zurückliegenden extremen Abflussereignisse im Elbegebiet kann davon ausgegangen werden, dass innerhalb kurzer Zeit hohe Anteile einer durchschnittlichen Jahresfracht partikulär gebundener Schadstoffe mobilisiert wurden bei hydraulischen Belastungen, wie sie z. B. im August 2002 und im Frühjahr 2006 vorlagen. Auswertungen zum langfristigen Verhalten der Suspensionsfracht an der Elbe und der Nebenflüsse liegen z. B. in NAUMANN ET AL. (2003) und VOLLMER & SCHRIEVER (2004) vor.

Für beide Flussgebiete bieten die Sedimentdatenbank SedDB und die Schwebstoffdatenbank SchwebDB konsistente langjährige Datengrundlagen zu Sedimentzusammensetzung, Feststofffrachten und Suspensionstransport. Für Projektionsrechnungen wird im Projekt ein eindimensionales hydrodynamisch-numerisches Feststofftransportmodell der Binnenelbe aufgebaut. Der Modellaufbau an der Elbe mit der Software SOBEK-River (Deltares) entspricht den Anforderungen der relativ feinkörnigen Flusssohle und des Suspensionstransportes durch den erweiterten Advektions-/Dispersionsansatz. Die konsistenten Daten- und Prognosewerkzeuge wurden auf dem aktuellen Stand der Technik und des Wissens entwickelt und decken die erforderlichen großen (räumlichen und zeitlichen) Skalen ab.

Auf Prozessskala (Abbildung sedimentologisch/chemisch dominierender bzw. ereignisbezogener Prozesse) weisen verschiedene komplexere Modellierungswerkzeuge Eignung und Anwendungserfahrung aus. Beispielsweise wurde u. a. mit dem Programmpaket SSIIM (NTNU Trondheim, OLSEN 2013) komplexe ereignisbezogene Berechnungen mehrfach durchgeführt (RÜTHER & OLSEN 2005, OLSEN & ALFREDSEN 1994). Die Software SSIIM verfügt über die entsprechende physikalische Grundlage (Advektions-/Dispersionsansatz) und Erweiterungsmöglichkeiten für die Anlagerung bzw. den Transport sedimentgebundener Stoffe.

Vergleichbare Fragestellungen wurden in BWaStr in den Jahren 2001 und 2005 durch Untersuchungen begleitet und sind umfangreich dokumentiert (KÖTHE ET AL. 2004, BREITUNG 2005). Der Stand der technischen Hilfsmittel (Daten- und Prognosewerkzeuge) ermöglicht die Integration von Prozessuntersuchungen (insbesondere Transport- und Schadstoffverhalten) in großskalige, systemare Betrachtungen auf Flussgebietskala.

4 Methoden

Die Einbindung des Projektes 5.01 in die KLIWAS-Modellkette ist in Abbildung 1 dargestellt. Im Rahmen der KLIWAS-Modellkette werden projizierte Abflussganglinien als Modellinput für Strömungs- und Transportmodelle verwendet, um die klima- bedingte Ablagerung, Erosion sowie den Transport schadstoffbelasteter Sedimente abzuschätzen. Ferner werden mittels geeigneter Erosionsmodelle die Bodenerosion in den Einzugsgebieten des Oberrheins und der Elbe sowie der daraus resultierende Se- dimenteintrag in die Fließgewässer abgeschätzt und in Schwebstofffrachten umge- setzt. Der Transfer der Schwebstoffe durch das System wird mit Hilfe von numeri- schen Feststofftransportmodellen verfolgt. Als Eingangsdaten in die Modelle dienen vorhandene Datenreihen (vgl. Kapitel 3). Die vorhandenen Datenreihen werden ana- lysiert und bewertet, Datenlücken identifiziert und nach Möglichkeit geschlossen.

Veränderungen in den Sedimenteinträgen, in Sedimenttransportverhältnissen oder der Sedimentqualität werden vor dem Hintergrund der aktuellen Verhältnisse (Sediment- haushalt und -qualität) in Bezug auf ihre Relevanz für die Unterhaltung der BWaStr bewertet.

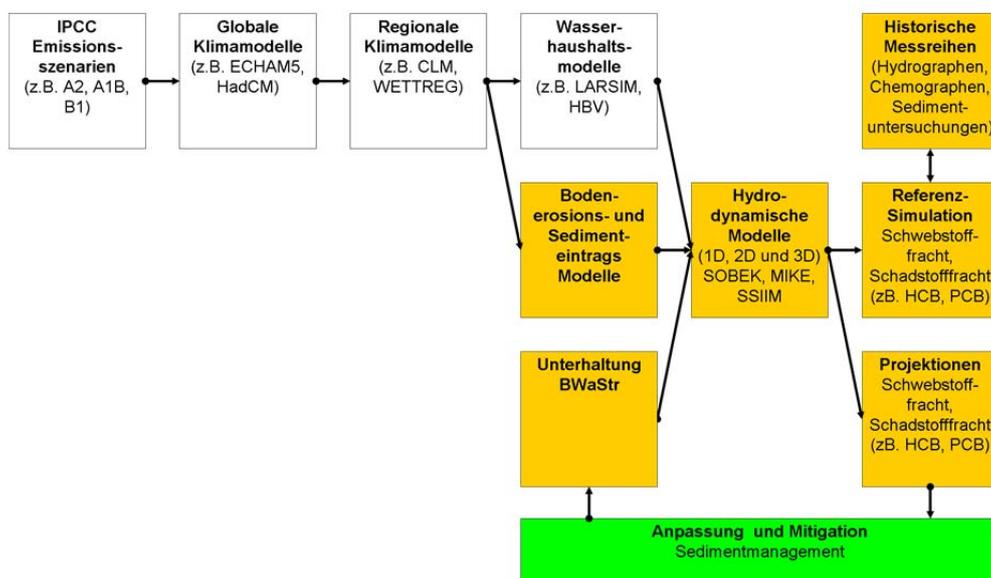


Abbildung 1: Einbindung des Projekts in KLIWAS.

Hierzu wurden u. a. folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

Kartierung belasteter Sedimente

Zur Verdichtung der räumlichen Informationen über belastete Flusssedimente am Oberrhein aus den Datengrundlagen der IKSr wurden in Abstimmung mit dem Se-

dimentkataster der WSV chemische Untersuchungen von Sedimenten des Oberrheins (gezielt in Stauhaltungen, im Grand Canal d'Alsace und in strömungsberuhigten Zonen) und der Binnenelbe (an speziellen Belastungspunkten wie Bühnenfeldern, Vorländern, Häfen und Mündungsbereichen von Zuflüssen) auf HCB, PCB und Schwermetalle geplant und durchgeführt. Diese Ergebnisse (POHLERT ET AL. 2011 A) sind wesentlich für die Parametrisierung der Modelle für den Schadstofftransport in großen Fließgewässern.

Evaluation und Optimierung des Schwebstoffmonitorings

An Schwebstoffdauermessstellen der BWaStr wird derzeit die Schwebstoffkonzentration als werktägliche Stichprobe ermittelt, indem gravimetrisch das Filtrat einer 5L-Schöpfprobe bestimmt wird. Die Schwebstoffdauermessstellen im Bereich des Oberrheins wurden sukzessive durch Trübungssonden erweitert, die nach entsprechender Kalibrierung eine zeitlich hochaufgelöste Messung der Schwebstoffkonzentration ermöglichen. Darüber hinaus wurden im Bereich des Oberrheins Querprofilmessungen der Schwebstoffkonzentration zur Ermittlung von Konzentrationsgradienten und der räumlichen Verteilung der Schwebstoffe u. a. insbesondere im Stauraum Iffezheim durchgeführt und als Methodik etabliert (HILLEBRAND ET AL. 2012 A).

Für die Gewinnung von Schwebstoffproben zur Rückstandsanalytik kommen sowohl integrale Sammler wie Sedimentationskästen und Binnensammler als auch zeitdiskrete Probennehmer wie Durchlaufzentrifugen an Schwebstoffgütemessstellen zum Einsatz. Die Probenahmetechnik wurde hinsichtlich der resultierenden Schadstoffanalyseresultate auf Vergleichbarkeit geprüft.

Referenzermittlung Schwebstofffrachten

Schwebstofffrachten von Rhein und Elbe wurden mit statistischen Methoden (HILLEBRAND ET AL. 2012 B) auf längerfristige Trends analysiert. Darüber hinaus wurden Saisonalitäten und Korrelationen mit dem Abfluss und weiteren Parametern (z. B. Chlorophyll a als Indikator für den biogenen Anteil am Schwebstoff) untersucht.

Referenzermittlung partikelgebundene Schadstoffkonzentrationen und -frachten

Anhand historischer Messreihen von Schwebstoffgütemessstellen des Rheins und der Elbe wurden für ausgewählte Schadstoffe (z. B.: HCB, PCB) Frachten berechnet. Die ermittelten Frachten dienen zur Validierung der Schadstofftransportmodelle und als Referenzzustand für die Projektionsrechnungen von Schadstofffrachten unter zukünftigen Klimabedingungen.

Modellierung des Schwebstoff- und partikelgebundenen Schadstofftransportes

Es wurden problembezogen und skalenabhängig Prozessmodelle zur Simulation von Strömung, Transport und Reaktion partikelgebundener Schadstoffe verwendet. In der kleinen Skala wurde das 3D Modell SSIIM in Kooperation mit dem KIT (Karlsruher Institut für Technologie) und der NTNU Trondheim angewandt (Technisch-

Naturwissenschaftliche Universität Norwegens in Trondheim), um im Bereich der Staustufenkette des Oberrheins kleinräumig die Erosion und Sedimentation von Feinsedimenten ereignisbezogen zu simulieren. Die Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg arbeitet im Rahmen einer Auftragsforschung mit einem gekoppelten 1D/2D Modellansatz der MIKE Modellfamilie (DHI), um an der mittleren Elbe die komplexe Interaktion für den Schadstoffaustausch zwischen dem offenen Gerinne und den Bühnenfeldern zu modellieren (MOSHENBERG & HEISE 2013). Schließlich sollte mit dem 1D-SOBEK-River-Modell ein Flussgebietsmodell für den Oberrhein (Basel bis Maxau) erstellt werden, um die Auswirkungen der projizierten Klimaänderung auf den partikelgebundenen Schadstofftransport mittels Langzeitsimulationen abschätzen zu können. Sowohl die Kartierung der Sedimentbelastung als auch die Referenzfrachten dienen der Parametrisierung und Validierung der Modelle. Für die Binnenelbe wurde ein 1D-SOBEK-River-Modell zur Simulation des Schwebstofftransport aufgebaut, kalibriert und validiert. Auf Grundlage projizierter Abflussganglinien wurden Projektionsrechnungen des Schwebstofftransport und speziell des Schwebstoffaustrags aus dem Binnenbereich durchgeführt.

Modellierung des Sedimenteintrags aus dem Einzugsgebiet

Es wurde erstmals für Rhein und Elbe ein Einzugsgebietsmodell zur Berechnung der großskaligen Bodenerosion durch fließendes Wasser und des daraus resultierenden Sedimenteintrags entwickelt, um dieses für ausgewählte Projektionsrechnungen im Rahmen der KLIWAS-Modellkette anwenden zu können. Das Modell besteht aus einem flächenverteiltem Bodenerosionsmodell (PESERA, KIRKBY ET AL. 2008) und einem nachgeschalteten flächenverteilten Sedimenteintragsmodell, welches nach der Methode der Sediment-Delivery-Ratio (ALI & DE BOER 2010) arbeitet. Das Bodenerosions- / Sedimenteintragsmodell liefert als maßgebliche Ausgabegrößen die mittlere jährliche Bodenerosion und den mittleren jährlichen Sedimenteintrag. Unter Vernachlässigung von gewässerinterner Speicherung oder Lieferung von Sediment über Zeitabschnitte von 30 Jahren, kann der für das Einzugsgebiet berechnete Sedimenteintrag der beobachteten Schwebstofffracht gleichgesetzt und somit das Modell mit Messdaten validiert werden.

5 Durchgeführte Arbeiten

Kartierung belasteter Sedimente

Zur Kartierung schadstoffbelasteter Sedimentationsbereiche (sekundäre Schadstoffquellen) im Oberrhein wurde im August und Oktober 2010 jeweils eine Längsbereisung des Oberrheins durchgeführt. Entlang der schiffbaren Strecken des Rheinseitenkanals und des Rheins wurden in Zusammenarbeit mit dem WSA Freiburg von einem Schiff mit Greifern oberflächennahe Sedimente entnommen. In den nicht-schiffbaren Wehrarmen von Burkheim, Weisweil, Ottenheim und Altenheim wurden Sedimente in den seichten ufernahen Bereichen zu Fuß und in den tieferen Bereichen von einem Boot jeweils mit dem van-Veen-Greifer entnommen. An insgesamt 60 Entnahmestellen wurden so Sedimentproben gewonnen und mit standardisierten Analyseverfahren auf organischen Kohlenstoffgehalt, Hexachlorbenzol, Pentachlorbenzol und ausgewählte polychlorierte Biphenyle untersucht. Mit Hilfe der Nasssiebung unter Verwendung von Ultraschall wurde die Korngrößenfraktionierung jeder Probe durchgeführt. Der Untersuchungsrahmen und die Ergebnisse sind in einem BfG-Bericht veröffentlicht (POHLERT ET AL. 2011 A). Die bereits in einer früheren IKSR-Untersuchung (2000-2002) gefundenen Ergebnisse, wonach insbesondere die Sedimente der Wehrbereiche der Stauhaltungen Marckolsheim und Rhinau mit HCB sehr hoch belastet ($> 400 \mu\text{g HCB} / \text{kg TS}$) sind und aufgrund der leichten Remobilisierbarkeit der Sedimente als „Risikogebiet Typ A“ eingestuft werden können (IKSR 2009), wurden auch in dieser Untersuchung bestätigt. Ferner wurden ebenfalls hohe HCB-Belastungen (zwischen 100 und $400 \mu\text{g HCB} / \text{kg TS}$) in Schleusenzufahrten und abgetrennten Schlingen des Rhein-Seiten-Kanals, sowie in Sedimenten anderer Wehrbereiche und dem Straßburger Hafen gefunden. Der Anstieg der HCB-Konzentration in den Sedimenten entlang des Flusslängsverlaufs korrespondiert räumlich sehr eng mit dem Anstieg der HCB-Belastung in Schwebstoffen. Die belasteten Sedimente in den Stillwasserbereichen der vorstehend genannten Wasserbauwerke gelten als die maßgeblichen sekundären Quellen für die Remobilisierung von partikelgebundenem HCB am Oberrhein.

Referenzermittlung partikelgebundener Schadstoffkonzentrationen und -frachten

Zur Berechnung von Referenzfrachten und zur Analyse zeitlicher Trends von partikelgebundenen Schadstofffrachten wurden Daten zu Abfluss, Schwebstoffkonzentration, partikelgebundenem Hexachlorbenzol, PCB-138 und PCB-153 aus dem Schwebstoff-Gütemessprogramm Rhein (1990 bis 2008) verwendet. Die Jahresfrachten von partikelgebundenem HCB an der Messstelle Koblenz zeigen in den Jahren 1985 bis 2007 eine deutliche Abnahme, was als Auswirkung des Verbotes direkter

Einleitungen von HCB seit Anfang der 1980er Jahren in das Gewässer gewertet werden kann. Jedoch stagnieren seit etwa 1995 die jährlichen HCB-Frachten in Koblenz bei einem Wert von etwa 25 kg pro Jahr. Im Längsprofil steigt die langjährig mittlere Fracht im Zeitraum 1995-2007 zwischen Weil und Karlsruhe von 2 kg HCB pro Jahr auf etwa 25 kg HCB pro Jahr an. Die Zuflüsse Neckar (0,6 kg HCB pro Jahr) und Main (0,8 kg HCB pro Jahr) sind dagegen für die HCB-Lieferung des Rheins unbedeutend. Die Ergebnisse sind in der Zeitschrift *Hydrological Processes* veröffentlicht (POHLERT ET AL. 2011 B). Die Zusammenschau dieser Ergebnisse und der Ergebnisse aus der Kartierung der schadstoffbelasteten Sedimente im Oberrhein deutet auf eine nahezu kontinuierliche Remobilisierung von partikelgebundenem HCB aus den sekundären Schadstoffquellen entlang des Oberrheins hin. Da aufgrund der zeitlichen Entwicklung und der stagnierenden HCB-Frachten seit 1995 nicht von einem kurz- bis mittelfristigen Rückgang (phasing out) der HCB-Belastung auszugehen ist, sollten weitere Erkundungen und Maßnahmen zur Sicherung und Beseitigung von HCB-belasteten Sedimenten entlang des Oberrheins durchgeführt werden.

Evaluation und Optimierung des Schwebstoffmonitorings

Eigene Untersuchungen zur Vergleichbarkeit von Schwebstoffgewinnungsverfahren für die Schadstoffanalytik wurden durchgeführt und die Ergebnisse im *Journal of Environmental Modelling* veröffentlicht (POHLERT ET AL. 2011 C).

Sorptionsuntersuchungen

Das Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung (JLU Gießen) führte im Rahmen von KLIWAS Sorptionsexperimente mit HCB an Elbe- sowie Oberrheinsedimenten durch (DÜRING & BÖHM 2012). Dazu wurden die Parameter zur Gleichgewichtsverteilung für die nativen Sedimente (Gesamtfraktion), für ausgewählte Kornklassen (gesiebte native Sedimente) und Reinstminerale vergleichend für Elbe und Rhein ermittelt. Darüber hinaus wurden röntgendiffraktometrische Verfahren in der Gesamtfraktion und pulverdiffraktometrische Verfahren in der Tonfraktion angewandt, um die Hauptmineralbestandteile zu ermitteln. Die so ermittelten Parameter zur Gleichgewichtsverteilung werden für die reaktive Stofftransportmodellierung von HCB verwendet.

Modellierung des Sedimenteintrags aus dem Einzugsgebiet

Die Fa. Scilands GmbH, Göttingen führte die Modellierung der Bodenerosion in den Einzugsgebieten Rhein und Elbe und der korrespondierenden Sedimenteinträge durch (BOCK ET AL. 2011). Dabei wurden sowohl Klimadaten der Messperiode 1961-1990 (Referenzzeitraum) als auch projizierte Klimadaten für die Perioden nahe Zukunft (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100) verwendet. Die Ergebnisse wurden der Fachöffentlichkeit vorgestellt (POHLERT 2012). Die verwendeten Projektionen sind in der folgenden Tabelle 1 aufgeführt. Details zu den verwendeten Projektionsdaten sind in PLAGEMANN ET AL. (2014) zu finden.

Tabelle 1: Für die Bodenerosionsmodellierung verwendete Klimaprojektionen.

Kontrolllauf / SRES Szenario	Globales Klimamodell	Regionales Klimamodell
C20 / A1B	ECHAM5r3	REMO5.7
C20 / A1B	ECHAM5r3	RACMO2
C20 / A1B	HadCM3Q0	CLM2.4.6
C20 / A1B	BCM2	RCA3
C20 / A1B	ECHAM5r1	CLM2.4.11

Klimaprojektionen für den Sedimenthaushalt und Risiken durch kohäsive Sedimente

Referenzermittlung Schwebstofffrachten

Aus dem WSV-Schwebstoffdaueremessnetz liegen bis zu 45 Jahre lange Zeitreihen an Tagesstichprobenwerten der Schwebstoffkonzentration vor. Die Daten verschiedener Messstellen wurden aufbereitet und auf Trends untersucht. Beobachtete signifikante Trends konnten auf anthropogene Einflüsse zurückgeführt werden, beispielsweise auf den Bau von Stauhaltungen oder Landnutzungsänderungen im Einzugsgebiet (HILLEBRAND ET AL. 2012 B).

Für die Binnenelbe wurde eine gemeinsame Analyse von Schwebstoff- und Chlorophyll-a-Frachten durch die Projekte 5.01 und 5.02 durchgeführt. Dabei zeigte sich vor allem im Unterlauf der Binnenelbe der deutliche Einfluss biogener Anteile auf die Gesamtschwebstofffracht. Erste Erkenntnisse sind in HILLEBRAND ET AL. (2012 C) veröffentlicht. Eine entsprechende detailliertere Fachveröffentlichung ist in Vorbereitung. Für die Modellierung der Schwebstofffrachten (s. u.) wurde auf dieser Grundlage der mineralische Anteil der Schwebstofffrachten bestimmt, da im Modell keine organischen Anteile berücksichtigt werden sollten.

Während der Projektlaufzeit wurden Querprofilmessungen der Schwebstoffkonzentration mit ADCP am Oberrhein, u. a. in den Stauhaltungen Iffezheim und Gamsheim sowie im Unterwasser von Iffezheim durchgeführt. Geschwindigkeits- und Schwebstoffverteilung wurden aufbereitet und analysiert. Für das numerische Modell der Stauhaltung Iffezheim wurden daraus stationäre Randbedingungen ermittelt und instationäre Randbedingungen extrapoliert. Für Kalibrierungs- und Validierungszwecke wurden mit vereinfachenden Annahmen außerdem Sohlschubspannungen und mittlere Korngrößen aus den Geschwindigkeits- und Schwebstoffverteilungen rückgerechnet. Als Referenzdaten wurden Messergebnisse aus in-situ-Flockengrößenmessungen des KIT verwendet, die im Rahmen eines Vergabeverfahrens aus KLIWAS 5.01 beauftragt wurden (KLASSEN & LEHMANN 2011). Die Ergebnisse wurden als begutachteter Konferenzbeitrag beim „2nd IAHR Europe Congress“ 2012 in München veröffentlicht (HILLEBRAND ET AL. 2012 A).

Modellierung des Schwebstoff- und partikelgebundenen Schadstofftransportes

Ein dreidimensionales numerisches Modell der Stauhaltung Iffezheim wurde aufgebaut und zur Modellierung des Feststofftransports im Stauraum verwendet. Besonderer Fokus lag auf der Dynamik der Depositions- und Erosionsprozesse im Bereich des Wehrkanals. Zu diesem Zweck wurde die eingesetzte Software SSIIM über Programmbibliotheken erweitert, um die Transportprozesse speziell von kohäsiven Sedimenten besser im Modell beschreiben zu können. In Kooperation mit dem WSA Freiburg wurden im Projektzeitraum zusätzliche Naturmessdaten erhoben, die zur Validierung des Modells dienen. Die Validierung des Modells hinsichtlich der Sohlhöhenentwicklung im Bereich des Hauptverlandungsbereichs wurde auf Basis von Peildaten durchgeführt, die vom WSA Freiburg etwa vierteljährlich im Abstand von 20 m erhoben werden. Die Peildaten wurden zunächst mit einem stromlinienbasierten Interpolationsverfahren auf ein festes Gitter interpoliert, um durchgängige Zeitreihen von Sohlagen der Geodatenpunkte zu erhalten. Die Sohlentwicklung wurde dann auf Korrelationen mit dem Abfluss und der Schwebstoffführung analysiert. Da die etwa vierteljährlichen Zeitreihen jedoch keine Aussage über die Dynamik der Transportprozesse (z. B. aufeinanderfolgende Erosions- und Depositionsphasen während eines Hochwasserereignisses) erlauben, sondern nur Nettoeffekte über 3 Monate zeigen, wurde das 3D-Modell der Stauhaltung eingesetzt, um diese für die Beurteilung von Bewirtschaftungsstrategien relevanten Fragestellungen zu beantworten. Zielsetzung dieses Modells war ein verbessertes Systemverständnis auf der kleinräumigen Skala innerhalb des Stauraums. Zusätzlich dienen die Ergebnisse unterstützend einer für die Folgezeit geplanten großräumigen Modellierung, beispielsweise um die Auswirkungen von Sanierungsmaßnahmen in oberstrom gelegenen Stauhaltungen zu untersuchen.

Für die Binnenelbe wurde ein eindimensionales Modell mit der Software SOBEK-River zwischen km -34,7 und km 583,4 aufgebaut (Abbildung 2). Das Modell umfasst zusätzlich ca. 130 km Strecke der Hauptnebenflüsse Mulde, Saale, Schwarze Elster und Havel. Für die Projektionsrechnungen wurden projizierte Abflusszeitreihen aus Projekt 4.01 als Randbedingungen für das SOBEK-Modell aufbereitet. Außerdem wurden C-Q-Beziehungen (Schwebstoffkonzentration als Funktion des Abflusses) aus gemessenen Werten der WSV und der FGG Elbe abgeleitet. Das Modell wurde mit gemessenen Abflussdaten und den C-Q-Beziehungen für den Zeitraum 1995-2010 kalibriert. Die Gesamtcharakteristik der Schwebstoffführung, mittlere Konzentrationen und Schwebstoffjahressummen konnten mit ausreichender Genauigkeit nachgebildet werden. Einzelereignisse, speziell Extremhochwässer, lassen sich aufgrund der Einschränkungen des 1D-Modells und der schwachen Datenlage jedoch nicht befriedigend abbilden.

Die verwendeten Abflussprojektionen sind in Tabelle 2 aufgelistet. Details zu den Projektionen finden sich bei NILSON ET AL. (2014).

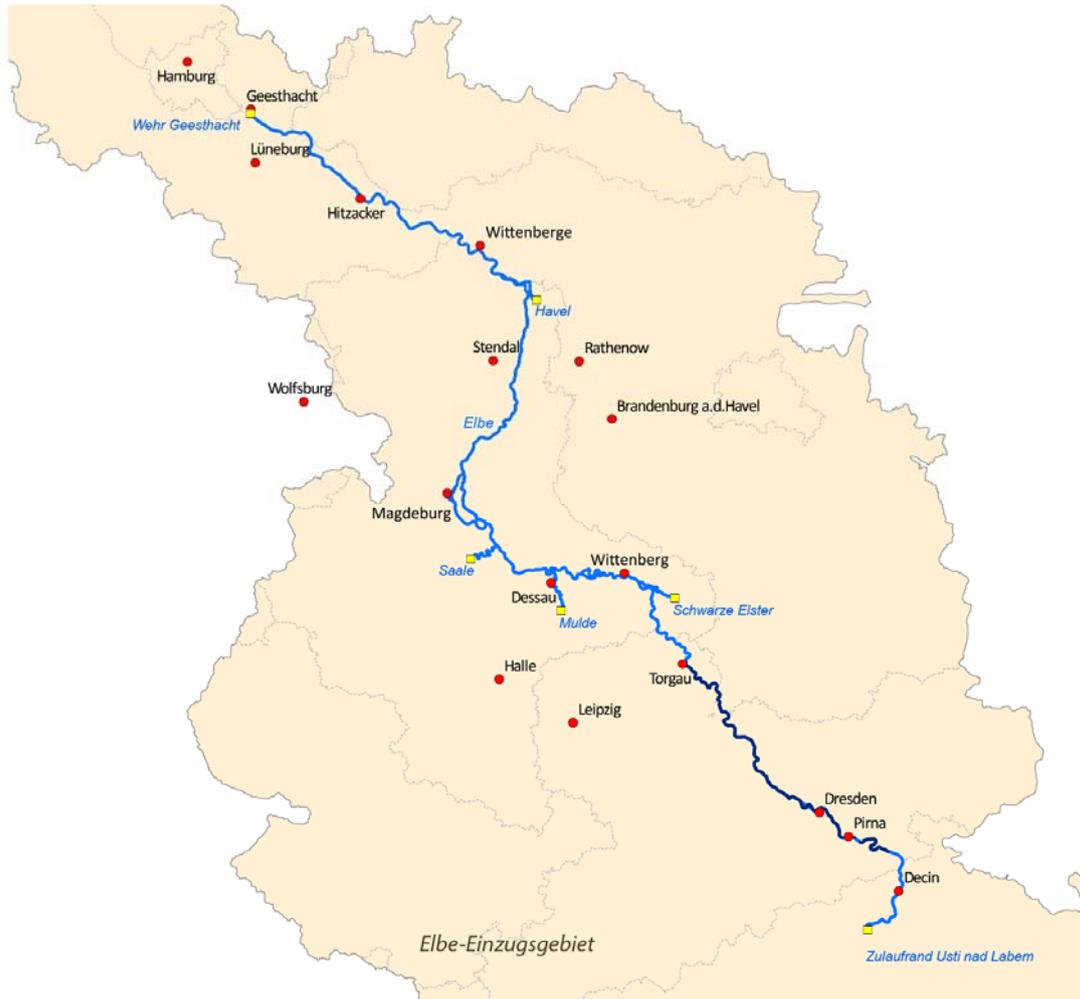


Abbildung 2: Übersicht über den mit SOBEK modellierten Abschnitt des Elbesystems.

Tabelle 2: Für die Schwebstofftransportmodellierung verwendete Abflussprojektionen.

Kontrolllauf / SRES Szenario	Globales Klimamodell	Regionales Klimamodell	Bias Korrektur	Wasserbilanzmodell
C20 / A1B	ARPEGE	HIRHAM	LS	HBV
C20 / A1B	MIC	RACMO	LS	HBV
C20 / A1B	ECHAM5r3	REMO-MPI	LS	HBV
C20 / A1B	BCM	RCA3	LS	HBV
C20 / A1B	HADCM3Q3	HADRM3Q3	LS	HBV
C20 / A1B	HADCM3Q16	HADRM3Q16	LS	HBV
C20 / A1B	ECHAM5r3	RACMO	LS	HBV
C20 / A1B	HADCM3Q0	CLM	LS	HBV
C20 / A1B	ECHAM5r3	REMO-ENS	LS	LARSIM

6 Vernetzung des Projektes, Kooperationspartner

Unsere Projektgruppe 5.01 arbeitete eng zusammen mit anderen KLIWAS-Projektgruppen sowie mit nationalen und internationalen Wissenschaftlern aus Universitäten. So wurden beispielsweise hydrologische und klimatologische Daten aus der KLIWAS-Modellkette für die Schwebstofftransportrechnungen und Bodenerosions-/Sedimenteintragsmodellierung genutzt.

Die Kartierung belasteter Sedimente (HCB, PCB) am Oberrhein erfolgte mit technischer und personeller Unterstützung durch das WSA Freiburg und den Abz. Breisach (POHLERT ET AL. 2011 A). Die Umrüstung und Neueinrichtung von Schwebstoffkonzentrationsmessstellen am Oberrhein sowie zusätzliche Querprofilmessungen zur Erfassung von Konzentrationsgradienten wurden ebenfalls in Zusammenarbeit mit dem WSA Freiburg durchgeführt. Die Erfassung von Fließgeschwindigkeiten und Schwebstoffkonzentrationen im Wehrkanal Iffezheim erfolgte mit Unterstützung des WSA Saarbrücken.

Sorptionsexperimente mit HCB an Elbe- sowie Rheinsedimenten zur Erfassung physiko-chemischer Daten für die reaktive Schadstofftransportmodellierung wurden durch die Univ. Gießen (Dr. habil. Düring) durchgeführt. Das Versuchsdesign wurde als Posterbeitrag anlässlich der Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (3.-9.9.2011 in der TU Berlin) sowie anlässlich der 2. KLIWAS-Statuskonferenz (25.-26.10.2011 im BMVBS Berlin) vorgestellt. Die Arbeiten wurden durch die Univ. Gießen planmäßig abgeschlossen.

Die 1D/2D-Strömungs- und Transportmodellierung mit MIKE an der mittleren Elbe wurde durch die HAW Hamburg (Prof. Heise) im Rahmen eines Promotionsvorhabens von Fr. Kari Moshenberg durchgeführt. Das PJ 5.01 stand im engen Informationsaustausch (Arbeitstreffen, Zwischenberichte) mit den Kooperationspartnern.

Die kleinräumige Modellierung des Transports kohäsiver Sedimente mit SSIIM wurde in Kooperation mit dem KIT durchgeführt. Labordatensätze, die in einem Versuchsstand des KIT erhoben wurden, wurden verwendet, um Modellansätze in SSIIM zu kalibrieren und zu validieren. Parallel dazu wurde ein Modell der Stauhaltung Iffezheim am Oberrhein aufgebaut. Eingangs- und Kalibrierdaten hierfür wurden in Zusammenarbeit mit dem WSA Freiburg erhoben.

Schwebstoffdaten der Elbe wurden auf langfristige Trends und Saisonalitätseffekte untersucht. In Zusammenarbeit mit PJ 5.02 konnten gegensätzliche Trends in den abiotischen und biotischen Anteilen der Gesamtschwebstoffmenge identifiziert und quantifiziert werden.

Tabelle 3: Projekt 5.01 - Kooperationen und Aufträge

Klimaprojektionen
für den Sediment-
haushalt und
Risiken durch
kohäsive
Sedimente

Kooperationspartner/ Auftragnehmer	Kurztitel	Ansprech- partner
Institut für Boden- kunde und Bodener- haltung, Justus Lie- big-Universität (JLU) Gießen	SORPTION	Dr. habil. Düring
Institut für Wasser und Gewässerent- wicklung, Karlsru- her Institut für Technologie (KIT)	Untersuchungen zur Interaktion von kohäsiven Sedimenten, sedimentgebundenen Schadstof- fen und Strömung, In-situ-Messung von Flo- ckengrößen am Oberrhein in der Staustufe Iffezheim	Prof. Nest- mann
Department Medi- zintechnik, Hoch- schule für ange- wandte Wissen- schaften (HAW) Hamburg	Sediment- und Schadstofftransportmodellie- rung für die Binnenelbe	Prof. Heise
Department of Hy- draulic and Envi- ronmental Engineer- ing, NTNU Trond- heim	Weiterentwicklung mehrdimensionaler Sedi- menttransportsimulation zur Anwendbarkeit auf Wasserstraßen	Prof. Olsen
Scilands GmbH Göttingen	KlimBoSed	Hr. Bock

7 Ergebnisse

7.1 Erreichter methodisch-wissenschaftlicher Fortschritt

Sedimenteintragsmodellierung

Für die Einzugsgebiete Elbe und Rhein wurde erstmals ein großskaliges Bodenerosions- und Sedimenteintragsmodell fertig gestellt, anhand von beobachteten Schwebstofffrachten validiert und für Klimaprojektionen verwendet. Somit liegen der BfG auch für weitergehende Fragen zur großskaligen Bodenerosion, wie zum Beispiel die Identifikation maßgeblicher Sedimentliefergebiete innerhalb der Einzugsgebiete, umfangreiche Simulationsdaten zur vertieften Auswertung vor. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen beispielhaft die mit dem Modell PESERA (KIRKBY ET AL. 2008) berechnete Bodenerosion im Rhein- und Elbeeinzugsgebiet für den Referenzzeitraum 1961-1990.

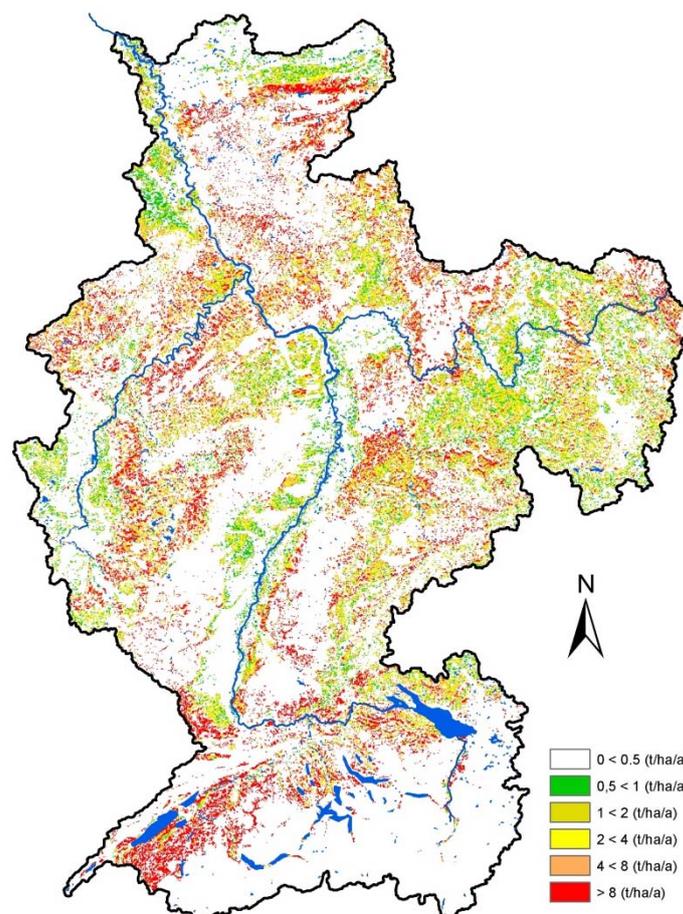


Abbildung 3: Bodenerosion für den Referenzzeitraum (1961-1990) im Rheineinzugsgebiet berechnet mit PESERA.

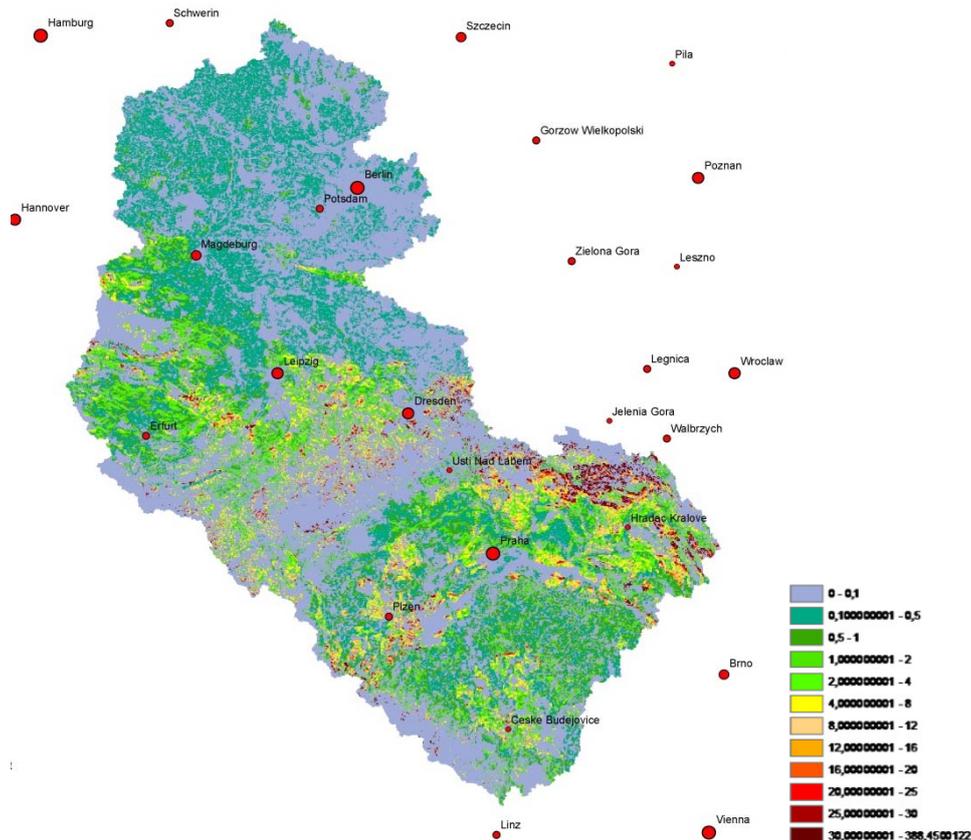


Abbildung 4: Bodenerosion (t/ha/a) für den Referenzzeitraum (1961-1990) im Elbeinzugsgebiet berechnet mit PESERA.

Mit dem eindimensionalen SOBEK-River-Modell der Binnenelbe wurden ebenfalls Schwebstofffrachten berechnet. Ein Vergleich von projizierten Änderungen der mittleren Schwebstoffjahresfrachten im Elbegebiet über 30 Jahre zeigt für die beiden Modellsysteme eine gute Übereinstimmung. Die Bandbreite der projizierten mittleren Jahresschwebstofffrachten wird durch die Klimaprojektionen erzeugt.

Weiterentwicklung des 3D-Feststofftransportmodells SSIIM

Das Feststofftransportmodell SSIIM wurde um verschiedene Modellierungsansätze erweitert, um die speziellen Transportmechanismen kohäsiver Sedimente zu berücksichtigen. Dabei wurden im Einzelnen die folgenden Ansätze implementiert:

- **Erosion:** Ansatz nach CHIEN & WAN (1999), der die kritische Sohlschubspannung für Erosion als Funktion der Korngrößen einerseits und der Sohldichte andererseits berechnet. Bei der Sohldichte wird außerdem der Konsolidierungsgrad berücksichtigt. Kalibrierdaten aus den Oberrheinstaufungen stehen teilweise bereits zur Verfügung. Weitere Untersuchungen zur Erosionsstabilität werden derzeit im Auftrag des WSA Freiburg durchgeführt. Ein Anwendungsfall für die Staustufe Iffezheim ist in HILLEBRAND ET AL. (2012 C) veröffentlicht.

- **Konsolidierung:** Es wurden zwei Modellansätze implementiert und getestet: ein bimodaler „hindered settling“-Ansatz nach TOORMAN & BERLAMONT (1991) sowie ein Ansatz basierend auf einer kinetischen Gleichung 1. Ordnung nach SANFORD (2008). Die beiden Ansätze bilden nicht die tatsächlich bei einer Konsolidierung ablaufenden physikalischen Prozesse nach, wurden aber dennoch ausgewählt, da sie weniger rechenintensiv sind und die Effekte einer Konsolidierung in ausreichendem Maße simulieren können. Beide Ansätze wurden in vereinfachten Testfällen erprobt und lieferten für die Stauhaltung Iffezheim plausible Werte (HILLEBRAND & OLSEN 2011).
- **Sohldichte:** Für die konsolidierten Feinsedimente der übrigen Oberrheinstauhaltungen wurde eine signifikante Korrelation der Sohldichte mit der lokalen Korngrößenverteilung ermittelt. Aus verschiedenen Berechnungsansätzen in der Literatur wurde ein geeigneter Ansatz ausgewählt (WU & WANG 2008), an die Messdaten angepasst und ins numerische Modell implementiert (HILLEBRAND 2014).
- **Flockung:** Für die Erweiterung des 3D-Feststofftransportmodells SSIIM wurde ein Flockungsalgorithmus nach MCANALLY (2000) ausgewählt, der geeignet erscheint, auch den partikulären Schadstofftransport zu berücksichtigen (HILLEBRAND & KLASSEN 2012). Der implementierte Algorithmus berechnet Aggregation und Fragmentierung aufgrund von Kollisionen zweier Partikel durch Brown'sche Molekularbewegung, unterschiedliche Sinkgeschwindigkeiten und Turbulenz. Zusätzlich ist eine Fragmentierung durch den reinen Strömungsangriff möglich. Die Flockenstruktur wird durch den Parameter „fraktale Dimension“ berücksichtigt. Aus Untersuchungen im Versuchsstand Kreisgerinne am KIT stehen Kalibrierdaten für den Algorithmus zur Verfügung (KLASSEN ET AL. 2011, KLASSEN ET AL. 2013).

Das weiterentwickelte Modellsystem wurde für die Modellierung des Feststofftransports in der Stauhaltung Iffezheim eingesetzt. Bei der Analyse der Peildaten wurden folgende grundlegenden Phänomene in der Sedimentationsdynamik beobachtet (HILLEBRAND 2012):

- Die größten Anlandungen werden regelmäßig nach Zeiträumen beobachtet, die von hohen Abflüssen dominiert wurden.
- Nach Niedrigwasserphasen, in denen nur geringe Abflüsse durch den Wehrkanal herrschen, nehmen in den Baggerfeldern im Wehrkanal die Sohlhöhen im Mittel ab, was aufgrund des fehlenden Strömungsangriffs nicht auf Erosion, sondern auf eine Konsolidierung der Ablagerungen zurückzuführen ist.

Diese Phänomene konnten im Modell sowohl in ihrer räumlichen Ausprägung als auch betragsmäßig gut nachgebildet werden. Eine entsprechende Veröffentlichung zur Validierung der Sohlhöhenentwicklung im Modell ist in Vorbereitung.

Sorptionsverhalten

Die vergleichenden Untersuchungen zum Sorptionsverhalten von Elbe- und Oberrheinsedimenten hinsichtlich HCB zeigen, dass mineralogische Ursachen sowohl für

die stark inhomogene Verteilung von HCB in Sedimenten als auch für die unerwartet positive Korrelation zwischen Korngröße und HCB-Konzentration ausgeschlossen werden können. Die ermittelten Fest-Flüssig-Verteilungskoeffizienten für die Gesamtfraktion der Rhein- und Elbesedimente liegen zwischen \log_{KD} 2,8 und 3,5 (\log_{KOC} 4,5 bis 5) und entsprechen in ihrer Höhe den Literaturangaben für Sedimente und Böden. Die Sorption von HCB an die Teilfraktionen war vor allem durch den Gehalt an organischer Substanz geprägt, ebenso durch die Korngrößenverteilung innerhalb der Fraktionen bzw. die zunehmende spezifische Oberfläche bei sinkender Partikelgröße. Dabei ist ein sehr hoher TOC-Gehalt in der Sandfraktion (Korngrößen 63 μ m bis 2 mm) in der Lage, den Oberflächeneinfluss in kleineren Fraktionen mit geringem TOC-Gehalt auszugleichen. Nach Berücksichtigung der TOC-Gehalte kann als Grundregel beobachtet werden, dass die Sorption mit sinkender Partikelgröße, und daraus abgeleiteter höherer spezifischer Oberfläche, zunimmt. Zwei Rhein-Sedimentproben weichen in den Experimenten jedoch von dieser Grundregel ab, da hier in der Grobschluff-Fraktion die rechnerisch höchsten \log_{KOC} -Werte von ca. 5,0 bis 5,2 festgestellt wurden, was auf eine abweichende qualitative Zusammensetzung der Teilfraktionen hinweisen könnte. Diese Proben wiesen zugleich die höchste HCB-Vorbelastung auf. Überraschend und hinsichtlich des Wissensstandes neu war jedoch das Ergebnis, dass das Mineral Chlorit maßgebliches Adsorbens für HCB sein kann (\log_{KD} 3,3 bis 3,9). Für Zwecke der reaktiven Schadstofftransportmodellierung kann vereinfacht mit einem einheitlichen Gleichgewichtsverteilungskoeffizienten gerechnet werden, da die Gleichgewichtsverteilungskoeffizienten in den einzelnen Kornfraktionen nur unwesentlich voneinander abweichen.

Evaluierung von Entnahmeverfahren zur Schwebstoffgewinnung für die Schadstoffanalytik

Die vergleichende statistische Analyse von Entnahmeverfahren zur Schwebstoffgewinnung für die Schadstoffanalytik, die wiederholt an mehreren Entnahmestellen entlang des Rheins eingesetzt wurden, zeigte, dass die organischen Kohlenstoffgehalte von Schwebstoffproben, die mit Integralsammlern (BiSam) gewonnen wurden, statistisch signifikant niedriger sind, als die entsprechenden Kohlenstoffgehalte in Schwebstoffproben, die mit Durchflusszentrifugen gewonnen wurden. Hinsichtlich der PCB-Konzentration im Schwebstoff wurde für die ausgewerteten Rhein-Entnahmestellen kein signifikanter Einfluss zwischen den Entnahmeverfahren festgestellt. Für HCB-Konzentrationen haben sowohl das Entnahmeverfahren, als auch die Entnahmestelle (d.h. örtliche Strömungs- und Konzentrationsbedingungen) einen signifikanten Einfluss auf die festgestellten HCB-Konzentrationen in den gewonnenen Schwebstoffproben. So sind die HCB-Konzentrationen in den Proben, die mit Durchflusszentrifugen gewonnen wurden, signifikant niedriger als in den Proben der Integralsammler. Dieser Unterschied variiert jedoch in Abhängigkeit der Entnahmestelle: So ist zum Beispiel in Weil kein statistisch signifikanter Unterschied feststellbar, während an den anderen Messstellen Karlsruhe, Koblenz und Bimmen die HCB-Konzentrationen in Proben der Durchflusszentrifugen systematisch niedriger waren.

Darüber hinaus konnte ein Korngrößeneffekt festgestellt werden, demnach der mittlere Korndurchmesser in Proben der Integralsammler BiSam und Sedimentationskasten höher ist als in Proben der Durchflusszentrifugen, die jeweils zur gleichen Zeitperiode gewonnen wurden (POHLERT ET AL. 2011 C).

7.2 Kernaussagen zu den Ergebnissen

Um klimabedingte Auswirkungen feststellen zu können, wurde der Ist-Zustand des Sedimenthaushalts als Referenz detailliert erfasst und beschrieben. Die Stauhaltungen am Oberrhein beeinflussen den Sedimenthaushalt und die damit verbundenen Schwebstofffrachten bereits heute deutlich. Auch an der Elbe sind die Schwebstofffrachten signifikant von anthropogenen Einflüssen wie der Landnutzung im Einzugsgebiet geprägt.

Die Projektionen zur Bodenerosion und zum Sedimenteintrag mit fünf Ensemble-Mitgliedern zeigen für die nahe Zukunft (2021-2050) eine klimabedingte Zunahme des Feinsedimenteintrags aus dem Alpenraum zwischen 20 und 100 % und für die ferne Zukunft (2071-2100) eine Änderung im Bereich von -15 bis +100 % (POHLERT 2012). Für den Feinsedimenteintrag in Main, Mosel und Neckar ist dagegen keine klimabedingte Änderung erkennbar. Es wurde deutlich, dass der Einfluss der Landnutzung und somit auch potenzielle künftige Landnutzungswechsel von zum Beispiel Grünland zu Acker einen wesentlich höheren Einfluss auf die Bodenerosion hat, als die projizierte Klimaänderung nach dem A1B-Emissionsszenario. Die für das Elbegebiet mittels PESERA modellierten Sedimenteinträge und deren relativen Änderungen für die Projektionsperioden konnten für den Gebietsauslass (hier: Messstelle Hitzacker) mit den Modellrechnungen des 1D-SOBEK Modells verglichen und überprüft werden. Die unabhängig voneinander berechneten Klimaänderungssignale stimmen sehr gut überein. Es wurde deutlich, dass die Auswahl der vorgeschalteten Klimamodellkette einen höheren Einfluss auf die Simulationsergebnisse zur langjährig mittleren Schwebstofffracht und deren relativen Änderung haben, als die Auswahl des Impaktmodells.

Um Projektionen der Schwebstofffrachten zu ermitteln, wurde für die Binnenelbe ein eindimensionales Modell mit der Software SOBEK-River zwischen km -34,7 und km 583,4 aufgebaut. Das Modell wurde mit gemessenen Abflussdaten und aus Messwerten abgeleiteten Transport-Abfluss-Beziehungen (Schwebstoffkonzentration als Funktion des Abflusses) für den Zeitraum 1995-2010 kalibriert. Die Gesamtcharakteristik der Schwebstoffführung, mittlere Konzentrationen und Schwebstoffjahressummen konnten mit ausreichender Genauigkeit nachgebildet werden. Einzelergebnisse, speziell Extremhochwässer, lassen sich aufgrund der Einschränkungen des 1D-Modells und der schwachen Datenlage jedoch nicht befriedigend abbilden.

Für die Projektionen wurden jeweils 30-Jahres-Zeitscheiben modelliert: 1961-1990 für den Referenzzeitraum, 2021-2050 für die nahe Zukunft und 2071-2100 für die ferne Zukunft entsprechend den in KLIWAS gewählten Zeiträumen. Die Projektionen wurden zunächst nach Verfügbarkeit ausgewählt. Weitere Projektionen wurden so ausgewählt, dass eine möglichst große Bandbreite in der Änderung des mittleren Abflusses abgedeckt wurde.

Die Projektionen der Jahresfrachten des Schwebstoffs folgen im Trend der Entwicklung der mittleren Abflüsse (MQ). Die Änderungssignale der Schwebstoffjahresfrachten sowohl nach oben als auch nach unten sind in der Regel stärker ausgeprägt als die Änderungssignale des MQ. Eine signifikante Änderung im Abflussregime der Elbe ließe also signifikante Änderungen in den Schwebstofffrachten und damit auch im Schwebstoffeintrag in die Tideelbe erwarten.

Für die Stauhaltung Iffezheim wurde ein dreidimensionales Feststofftransportmodell aufgebaut. Das Modell ist grundlegend konsistent mit den Erkenntnissen aus der Analyse der Anlandungsentwicklung anhand von Peildaten. Die größten Anlandungen werden nach Phasen mit hohen Abflüssen beobachtet. In Niedrigwasserphasen tritt eine Konsolidierung des abgelagerten Materials und damit ein Nettorückgang der Ablagerungshöhe auf. Es bestehen Unsicherheiten bezüglich des Auftretens von Erosion in der Stauhaltung Iffezheim. Hierzu werden derzeit von der Universität Stuttgart im Auftrag des WSA Freiburg Feld- und Laboruntersuchungen durchgeführt.

Die HCB-Fracht ist an der Messstelle Koblenz zwischen 1985 und 1995 zurückgegangen und stagniert seither. Die partikelgebundene Fracht von PCB-138 und PCB-153 stagniert im Zeitraum 1995 und 2007 ebenso. Nach der im Rahmen des Projektes durchgeführten Sedimenterkundung am Oberrhein befindet sich insbesondere im Oberwasser der Wehrbereiche der Stauhaltungen ein großes Reservoir an Sedimenten, die oberflächennah mit HCB hoch bis sehr hoch belastet sind (sekundäre Quellen). Ohne Maßnahmen zur Sicherung und Beseitigung dieser schadstoffbelasteten Sedimente ist das kurz- bis mittelfristige Erreichen der für den Rhein formulierten Umweltqualitätsziele zur Schwebstoffgüte bereits unter derzeitigen Klimabedingungen gering wahrscheinlich.

7.2.1 Nahe Zukunft

Oberrhein

Die projizierten absoluten Änderungen der Bodenerosion auf den dauerhaft bewachsenen Flächen sind sehr gering. Lediglich auf den zeitweise unbewachsenen Ackerflächen sind relevante Veränderungen projiziert worden. Auffallend ist der Einfluss des vorgeschalteten globalen Klimamodells auf das Projektionsergebnis für die nahe Zukunft. So projizieren die von EH5r3 angetriebenen Modellketten eine Abnahme der gebietsgemittelten Bodenerosion auf Ackerflächen um etwa $1,0 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, während die von HADCM3Q0 angetriebene Modellkette eine Zunahme für die nahe Zukunft

um etwa $0,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ projiziert. Dies verdeutlicht die Stärke der Ensemblemodellierung, da diese Unsicherheitsspanne bei der Auswertung von nur einer Modellkette nicht sichtbar wäre und somit vermeintlich eindeutige Ergebnisse erzielt werden.

Für den Sedimenteintrag in die Mittelgebirgsflüsse Mosel, Main und Neckar war angesichts der Modellunsicherheit des ausgewählten Modellensembles kein klares Klimasignal feststellbar. Im Gegensatz dazu war entlang des Rhein-Hauptstroms ein deutliches Klimaänderungssignal für die nahe Zukunft feststellbar. Insbesondere der schweizerische Alpenraum könnte unter der Annahme gleichbleibender Landnutzung nach den durchgeführten Projektionsrechnungen verstärkt Sedimente über die Aare in den Rhein liefern. Die Zunahme des Sedimenteintrags am Zusammenfluss von Aare und Rhein bei Albrück Dogern für die Periode 2021 - 2050 beträgt zwischen +20 % und +100 % bezogen auf den Referenzzustand (1961 - 1990).

Binnenelbe

Nach der großskaligen Bodenerosionsmodellierung sind die relevanten Gebiete für Bodenerosion die Lössböden im Einzugsgebiet der Elbe und das Böhmisches Tafelland. Die relevanten Sedimentliefergebiete für den Elbehauptstrom befinden sich entlang der flussnahen Hänge der Elbzuflüsse. Das Elbegebiet weist insofern eine geomorphologisch-orographische Besonderheit auf, da ein Durchbruchstal am böhmischen Randgebirge (Erzgebirge) existiert, das auch als Wetter- und Klimascheide wirkt. So existieren Modellprojektionen für die nahe Zukunft, in denen die mittlere Bodenerosion im tschechischen Mittelgebirge zunimmt, jedoch in Mitteldeutschland abnimmt. Dies hat zur Folge, dass die projizierten Sedimenteinträge bis etwa Elbe-KM 300 um ca. +5 bis +10 % zunehmen können, jedoch nach Elbe-KM 300 eine Abnahme der projizierten Sedimenteinträge um -5 bis -10 % bezogen auf die Referenzperiode 1961 bis 1990 festzustellen ist. Bezogen auf den Gebietsauslass Hitzacker und unter Berücksichtigung der Projektionsergebnisse des 1D-SOBEK Modells und der Sedimenteintrags-Modellierung mit dem PESERA-Ansatz kann keine eindeutige Klimasignaländerung festgestellt werden. Die projizierten relativen Änderungen der Schwebstofffrachten / Sedimenteinträge variieren zwischen -50 % und +20 % (vgl. Abb. 5).

7.2.2 Ferne Zukunft

Oberrhein

Auffallend ist die von sämtlichen drei Modellketten projizierte Abnahme der Bodenerosion auf Ackerflächen in der fernen Zukunft, was einhergeht mit der Verringerung der projizierten sommerlichen Niederschläge im gesamten Einzugsgebiet des Rheins. Im Gegensatz dazu steigen die Sedimenteinträge in Hochrhein und Oberrhein an (Verdopplung des Sedimenteintrags bei Albrück-Dogern), was durch die erhöhten projizierten Niederschläge in den für die Sedimentlieferung relevanten schweizeri-

schen Teileinzugsgebieten der Aare erklärt werden kann. Die Simulationsergebnisse der Bodenerosion und des Sedimenteintrags im Einzugsgebiet des Rheins für die nahe und ferne Zukunft zeigen eine gute Übereinstimmung mit Ergebnissen einer früheren Studie (ASSELMAN ET AL. 2003).

Binnenelbe

Die Ausführungen zu den projizierten Änderungen des Sedimenteintrags in der Elbe zur nahen Zukunft sind ebenfalls für die ferne Zukunft gültig. Insgesamt bleibt festzustellen, dass die Unsicherheitsspanne der projizierten Änderung für die ferne Zukunft zunimmt. So variieren die projizierten relativen Änderungen der Schwebstofffrachten / Sedimenteinträge am Gebietsauslass Hitzacker zwischen -60 % bis +60 % (Abb. 5).

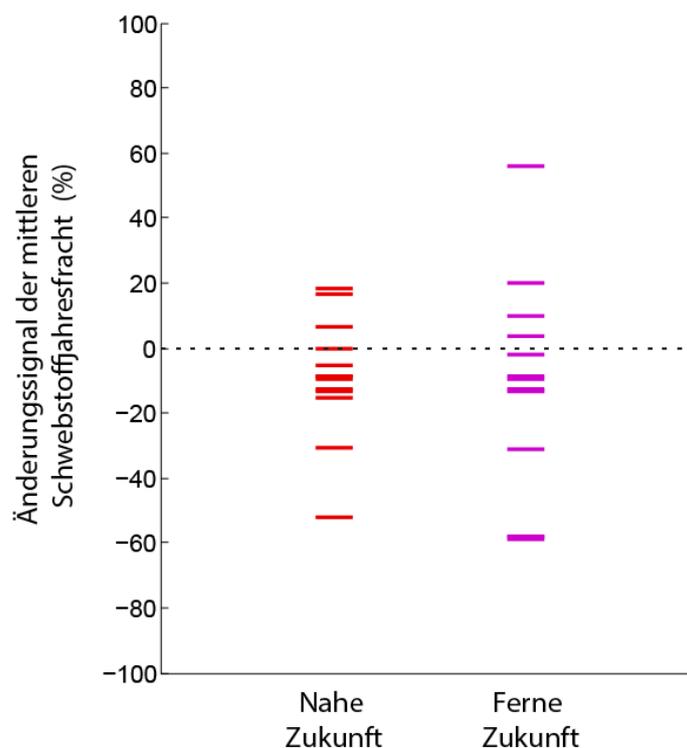


Abbildung 5: Änderungssignale der mittleren Schwebstoffjahresfracht bei Hitzacker (Elbe-KM 522,6)

7.3 Einschätzung zum Grad der Betroffenheit des Systems Wasserstraße und des operativen Geschäfts der WSV im Verantwortungsbereich des BMVI

Durch die Schadstoffbelastung der Sedimente mit HCB im Wehrbereich der Stauhaltung Iffezheim und die kostenintensive Verbringung der belasteten Sedimente bei regelmäßig anstehenden Räumungen des Stauraums zur Erhaltung des Freibords und der Bauwerkssicherheit sind die WSV und das BMVI bereits unter heutigen Klima- und Abflussbedingungen in ihrem Sedimentmanagement betroffen. Die Zeitrei-

henanalyse von Schwebstoffgütedaten zeigt, dass seit 1995 kein signifikanter Rückgang der partikelgebundenen HCB-Jahresfracht feststellbar ist. Ferner wurden in der Rheinstrecke zwischen Weil und Straßburg Sedimentkörper identifiziert, die oberflächennah hohe bis sehr hohe HCB-Belastungen aufweisen und als sekundäre Quelle fungieren.

Darüber hinaus lassen die Projektionsergebnisse für die nahe Zukunft und ferne Zukunft zur Bodenerosion und zum Sedimenteintrag in den staugeregelten Oberrhein eine mengenmäßige Zunahme des Sedimenteintrags erwarten, was zu einem erhöhten Aufwand der Unterhaltungsbaggerung führen könnte. Die Projektionsergebnisse zum Sedimenteintrag stimmen gut mit den unabhängig davon gewonnenen Ergebnissen der Klima- und Abflussprojektionen überein, wonach insbesondere im Alpenvorraum die sommerlichen Niederschläge zunehmen können und in Folge dessen auch erhöhte mittlere Abflüsse projiziert wurden.

7.4 Kernaussagen über mögliche Anpassungsoptionen und Handlungsempfehlungen

Oberrhein

Den Empfehlungen zum Sedimentmanagementplan Rhein (IKSR 2009) und den Schlussfolgerungen im BfG-Bericht 1717 (POHLERT ET AL. 2011A) folgend, werden insbesondere für die mit HCB sehr hoch belasteten Sedimentationsbereiche der Wehrbereiche Marckolsheim und Rhinau vorbereitende Untersuchungen (Rasterbeprobung, Kernbeprobung bis zur festen Sohle) zur mengenmäßigen Abschätzung der mit HCB belasteten Sedimente für eine Beseitigung oder dauerhafte Sicherung empfohlen. Ferner wird empfohlen, ein Schwebstoffmonitoring (Menge und Güte) einzurichten, um den Ein- und Austrag HCB-belasteter Sedimente aus diesen Stauhaltungen und den Eintrag schwebstoffbürtiger Sedimente in den Wehrbereich Iffezheim zu erfassen. Somit könnte einerseits die Remobilisierung belasteter Sedimente gemessen und andererseits die Effizienz der möglichen Sicherungsmaßnahmen dokumentiert werden (Erfolgskontrolle).

Nach einer erfolgreichen Sanierung der Sekundärquellen sind für die Stauhaltungen Maßnahmen zur Förderung der Sedimentdurchgängigkeit zu empfehlen. Neben dem positiven Effekt einer verringerten Stauraumverlandung und damit verbunden geringeren Kosten im Bereich der Unterhaltungsbaggerungen trägt eine erhöhte Sedimentdurchgängigkeit zu einer natürlicheren Schwebstoffdynamik im Gesamtsystem bei. Dies ist besonders vor dem Hintergrund der EG-WRRL positiv zu bewerten.

Binnenelbe

Aufgrund der großen Bandbreite an projizierten Änderungssignalen der Schwebstofffrachten ohne klare Tendenz zu einer Zu- oder Abnahme sind nach derzeitiger Einschätzung keine spezifischen Anpassungsoptionen zu empfehlen. Analog zum

Oberrhein liegt die Relevanz der Feinsedimente in der Binnenelbe besonders in ihrer Schadstoffbelastung begründet. Die Handlungsempfehlungen des Sedimentmanagementkonzeptes der FGG Elbe (2013) sind auch vor dem Hintergrund potenziell veränderlicher Feinsedimenteinträge ins Gewässer aufgrund des Klimawandels zu unterstützen.

Klimaprojektionen
für den Sediment-
haushalt und
Risiken durch
kohäsive
Sedimente

8 Diskussion und Ausblick

Durch die Anwendung des großskaligen Bodenerosions- und Sedimenteintragsmodells konnte die Sensitivität der großen Einzugsgebiete von Rhein und Elbe auf Klimaänderungen unter der Annahme gleichbleibender Landnutzung erstmals getestet werden. Es wurde deutlich, dass für die Sedimentlieferung für die Hauptströme Rhein und Elbe nur vergleichsweise geringe Teilflächen innerhalb des Einzugsgebiets relevant sind („critical source areas“). Diese sind das Schweizer Mittelland im Aare-Einzugsgebiet als Teileinzugsgebiet des Rheins sowie das böhmische Tafelland und die Lössbörden im Einzugsgebiet der Elbe. Die Bodenerosion bzw. der Sedimentaustrag aus diesen Teilgebieten verhalten sich nicht zwangsläufig proportional zur flächengemittelten Bodenerosion im Gesamteinzugsgebiet, weshalb die projizierten Sedimenteinträge am Oberrhein für nahe Zukunft und ferne Zukunft zunehmen, während die Flächenmittel der Bodenerosion im gesamten Rheineinzugsgebiet abnehmen. In weiteren Studien bietet es sich somit an, mit meso-skaligen Sedimenteintragsmodellen die Sensitivität der vorstehend genannten Gebiete auf Klimaänderung und Landnutzungsänderung zu untersuchen.

Im Rahmen von KLIWAS 5.01 wurde für die Binnenelbe das 1D-SOBEK Modell aufgebaut und sowohl hydrodynamisch als auch für den quantitativen Schwebstofftransport kalibriert. Aufbauend auf diesen Arbeiten können Berechnungen des partikelgebundenen Schadstofftransportes für ausgewählte Schadstoffe entlang des Elbehauptstroms durchgeführt werden. Da das Modell szenarienfähig ist, können sowohl Fragen zur Klimaänderung (veränderte Abflussbedingungen und Schwebstoffkonzentrationen im Gewässer), als auch Fragen zur Effizienz von Sanierungsmaßnahmen untersucht werden.

Für den Oberrhein zwischen Basel und Maxau soll mit dem 1D-SOBEK River Modellsystem ein Flussgebietsmodell für Schwebstoff- und Schadstofftransport erstellt werden, um die Auswirkungen der projizierten Klimaänderung auf den partikelgebundenen Schadstofftransport mittels Langzeitsimulationen abschätzen zu können. Alle notwendigen vorbereitenden Arbeiten wurden inzwischen abgeschlossen. Durch die Arbeiten im Projekt steht die Datengrundlage zur Verfügung, um bei einem Modellaufbau im Nachgang von KLIWAS Auswirkungen der projizierten Klimaänderungen oder von geplanten Sanierungsmaßnahmen zu untersuchen.

Die Auswertung von Schwebstoffgütedaten im Rahmen des Projektes zeigte, dass weiterhin ein Forschungsbedarf zu den Techniken und Probenahmestrategien (Einzelproben, Sammelproben) über die Gewinnung von Schwebstoff zur Schwebstoffgütebestimmung existiert. Zur Erprobung neuartiger Entnahmeverfahren sollten sowohl wissenschaftliche Kriterien, wie z. B. die Vergleichbarkeit physiko-chemischer

Kenngrößen des Schwebstoffs bei unterschiedlichen Entnahmeverfahren, als auch wirtschaftliche Kriterien wie Anschaffungs- und Betriebskosten herangezogen werden. Aus den Ergebnissen können dann angepasste Probenahmestrategien mit optimierten Entnahmeverfahren genutzt werden.

Klimaprojektionen
für den Sediment-
haushalt und
Risiken durch
kohäsive
Sedimente

9 Danksagung

Wir danken

- den KLIWAS-Projekten 1.02 und 4.01 für die Datenlieferungen zu Klima- und Abflussprojektionen
- dem KLIWAS-Projekt 5.02 für die hervorragende Zusammenarbeit im Bereich der Zusammensetzung des Schwebstoffs, besonders der Bestimmung des biogenen Anteils
- dem WSA Freiburg für die Unterstützung im Rahmen von Messkampagnen
- unseren Kooperationspartnern für die Unterstützung und die gute Zusammenarbeit
- allen, die beratend beigetragen haben
- dem BMVI für den Forschungsauftrag und die Finanzierung.

10 Literatur

- ALI, K. F. & DE BOER, D. H. (2010): Spatially distributed erosion and sediment yield modeling in the upper Indus River basin. *Water Resources Research*, 46, W08504.
- ASSELMAN, N. E. M., MIDDELKOOP, H., & VAN DIJK, P. M. (2003): The impact of changes in climate and land use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the River Rhine. *Hydrological Processes*, 17(16), 3225-3244.
- BOCK, M., KÖTHE, R., & STIBORSKI, S. (2011): Erstellung eines GIS basierten Atlas zur Bodenerosion in Flußeinzugsgebieten und daraus resultierender Sedimenteinträge in Bundeswasserstraßen unter heutigen sowie projizierten Klimabedingungen (KlimBoSed). Abschlussbericht vom 05.08.2011. scilands GmbH, Göttingen.
- BREITUNG, V. (2005): Ergebnisse aus dem begleitenden Untersuchungsprogramm für die Umlagerung von Baggergut in die fließende Welle unterhalb der Staustufe Iffezheim/Rhein. BfG-Bericht 1474.
- CHIEN, N. & WAN, Z. (1999): *Mechanics of Sediment Transport*. ASCE Press, Virginia.
- DÜRING, R.A. & BÖHM, L. (2012): Teilprojekt SORPTION – Identifikation der Adsorbenten für HCB und Bestimmung von Sorptionsparametern in Flusssedimenten der Bundeswasserstraßen. Abschlussbericht, Univ. Gießen, unveröff.
- FGG ELBE (2013): *Sedimentmanagementkonzept der FGG Elbe. Vorschläge für eine gute Sedimentmanagementpraxis im Elbegebiet zur Erreichung überregionaler Handlungsziele*.
- HEISE, S., FÖRSTNER, U., JAHNKE, T. & WESTRICH, B. (2004): *Inventory of historical contaminated sites in the Rhine Basin and its tributaries. Report for the Port Authority of Rotterdam*. Hamburg. 169 S.
- HEISE, S., CLAUS, E., HEININGER, P., KRÄMER, T., KRÜGER, F., SCHWARTZ, R. & FÖRSTNER, U. (2005): *Studie zur Schadstoffbelastung der Sedimente im Elbeinzugsgebiet. Ursachen und Trends*.
- HEISE, S., KRÜGER, F., BABOROWSKI, M., STACHEL, B., GÖTZ, R. & FÖRSTNER, U. (2008): *Bewertung der Risiken durch feststoffgebundene Schadstoffe im Elbeinzugsgebiet. Studie im Auftrag der Flussgebietsgemeinschaft Elbe und der Hamburg Port Authority, Hamburg*.

- HILLEBRAND, G. (2014): Sedimentologische Analyse der Bohrkern Daten der IKS-Untersuchung der Oberrheinstautufen aus den Jahren 2000 bis 2002. KLIWAS-Schriftenreihe Nr. 56. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. 63 S. doi: 10.5675/Kliwas_56/2014_Bohrkern Daten
- HILLEBRAND, G. (2012): Sedimentation im Wehrkanal Iffezheim - räumliche und zeitliche Dynamik. Tagungsband des 14. Gewässermorphologischen Kolloquiums der BfG am 9./10. November 2011 in Koblenz. Veranstaltungen 3/2012, Koblenz, April 2012, 115-121. doi: 10.5675/BfG_Veranst_2012.3
- HILLEBRAND, G., OTTO, W. & VOLLMER, S. (2012 A): Findings from ADCP-measured flow velocities and suspended sediment concentrations at the Upper Rhine. 2nd IAHR Europe Congress, 27.-29. June 2012, München.
- HILLEBRAND, G., POHLERT, T. & VOLLMER, S. (2012 B): Frühere und zukünftige Entwicklung der Schwebstofffrachten im Rhein. Tagungsband der 2. KLIWAS-Statuskonferenz am 25./26. Oktober 2011, BMVBS, Berlin. S. 80-83.
- HILLEBRAND, G., HARDENBICKER, P. & FISCHER, H. (2012 C): Schwebstoffdynamik der Mittelelbe – abiotische und biotische Komponenten. Tagungsband des 1. Ökologischen Kolloquiums der BfG am 14./15. Februar 2012 in Koblenz. Veranstaltungen 6/2012, Koblenz, Juli 2012, S. 37-41. doi: 10.5675/BfG_Veranst_2012.6
- HILLEBRAND, G., KLASSEN, I., OLSEN, N.R.B. & VOLLMER, S. (2012 D): Modelling fractionated sediment transport and deposition in the Iffezheim reservoir. 10th International Conference on Hydroinformatics HIC 2012, July 14-18, 2012, Hamburg.
- HILLEBRAND, G. & KLASSEN, I. (2012): Modellierung der Schwebstoffaggregation in Verbindung mit persistenten Schadstoffen. Tagungsband des Kolloquiums „Partikuläre Stoffströme in Flusseinzugsgebieten“ am 20./21. September 2011 in Koblenz, 78-84. doi: 10.5675/BfG_Veranst_2012.1
- HILLEBRAND, G. & OLSEN, N. R. B. (2011): Towards modeling consolidation of fine sediments upstream of the Iffezheim barrage, Upper Rhine River, Germany. Proceedings of the 7th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, 6.-8. Sept. 2011, Peking, China.
- INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DES RHEINS [IKSR] (hrsg. 2009): Sedimentmanagementplan Rhein, Bericht Nr. 175, Koblenz.
- KIRKBY, M. J., IRVINE, B. J., JONES, R. J. A., GOVERS, G. & THE PESERA TEAM (2008): The PESERA coarse scale erosion model for Europe. I.- Model rationale and implementation. European Journal of Soil Science, 59, 1293-1306.
- KLASSEN, I., HILLEBRAND, G., OLSEN, N. R. B., VOLLMER, S., LEHMANN, B. & NESTMANN, F. (2013): Flocculation processes and sedimentation of fine sediments in the open annular flume - Experiment and numerical modeling. Poster beim 8th

- Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics RCEM, June, 9-13, 2013, Santander, Spain.
- KLASSEN, I. & LEHMANN, B. (2011): In-situ-Messung von Flockengrößen am Oberrhein in der Staustufe Iffezheim. Sachstandsbericht zu den Messungen in 2011. Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, im November 2011.
- KLASSEN, I., HILLEBRAND, G., OLSEN, N. R. B., VOLLMER, S., LEHMANN, B. & NESTMANN, F. (2011): Modeling fine sediment aggregation processes considering varying fractal dimensions. Proceedings of the 7th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, 6.-8. Sept. 2011, Peking, China.
- KÖTHE, H., VOLLMER, S., BREITUNG, V., BERGFELD, T., SCHÖLL, F., KREBS, F. & VAN LANDWÜST, C. (2004): Environmental aspects of the sediment transfer across the Iffezheim barrage, River Rhine, Germany. WODCON XVII 2004, Hamburg, B3-5.
- MCANALLY, W. H. (2000): Aggregation and Deposition of Estuarial Fine Sediment. Report No. ERDC/CHL TR-00-8, prepared for U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg.
- MOSHENBERG, K., & HEISE, S. (2013): Hydrodynamic, Sediment Transport, and Contaminant Modeling for the Elbe River: Final Report. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.
- NAUMANN, S., SCHMIDT, A., SCHRIEVER, S., HANSEN, O. & GÖLZ, E. (2003): Bedeutung der Nebenflüsse für den Feststoffhaushalt der Elbe. BfG-1382, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- NILSON, E., KRAHE, P., LINGEMANN, I., HORSTEN, T., KLEIN, B., CARAMBIA, M., LARINA, M. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. KLIWAS-43/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_43/2014_4.01
- OLSEN, N. R. B. (2013): A three-dimensional numerical model for Simulation of Sediment movements In water Intakes with Multiblock option. NTNU Trondheim.
- OLSEN, N. R. B. & ALFREDSEN, K. (1994): A three-dimensional model for calculation of hydraulic parameters for fish habitat. IAHR Conference on Habitat Hydraulics, Trondheim, Norway.
- PLAGEMANN, S., IMBERY, F., NAMYSLO, J. (2014): Validierung und Bewertung von Klimaprojektionen – Bereitstellung von Klimaszenarien für den Binnenbereich. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 1.02. KLIWAS-29/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_29/2014_1.02
- POHLERT, T., HILLEBRAND, G. & BREITUNG, V. (2011 A): Sedimenterkundung Oberrhein – Erkundung und Untersuchung von Sedimentationsbereichen auf Hexa-

chlorbenzol und Polychlorierte Biphenyle zwischen Weil und Straßburg, BfG-Bericht 1717, DOI: 10.5675/BfG-1717.

POHLERT, T. (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenteintrag in Bundeswasserstraßen, In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Dynamik des Sedimenthaushaltes von Wasserstraßen. 14. Gewässermorphologisches Kolloquium am 09./10. November 2011 in Koblenz. – Veranstaltungen 3/2012, Koblenz, April 2012; DOI: 10.5675/BfG_Veranst_2012.3, S. 104-114.

POHLERT, T, HILLEBRAND, G. & BREITUNG, V. (2011 B): Trends of persistent organic pollutants in the suspended matter of the River Rhine, *Hydrol. Process.* 25, 3803–3817, DOI: 10.1002/hyp.8110.

POHLERT, T, HILLEBRAND, G. & BREITUNG, V. (2011 C): Effects of sampling techniques on physical parameters and concentrations of selected persistent organic pollutants in suspended matter, *J. Environ. Monit.*, 2011, 13, 1579–1588, DOI: 10.1039/c1em10045a.

RÜTHER, N. & OLSEN, N.R.B. (2005): Three dimensional modelling of sediment transport at water intakes. *Proc. Inst. of Civil Engineers-Water Management* 158 (1): 1-7.

SANFORD, L.P. (2008): Modeling a dynamically varying mixed sediment bed with erosion, deposition, bioturbation, consolidation, and armoring. *Computers & Geosciences* 34, S. 1263–1283.

SCHWARTZ, R., KOZERSKI, H-P. (2004): Bestimmung des Gefahrenpotentials feinkörniger Bühnenfeldsedimente für die Wasser- und Schwebstoffqualität der Elbe sowie den Stoffeintrag in Auen. In: GELLER, W., OCKENFELD, K., BÖHME, M., KNÖCHEL, A. [Hrsg.] *Schadstoffbelastung nach dem Elbe-Hochwasser 2002. Endbericht des Ad-hoc-Projekts „Schadstoffuntersuchungen nach dem Hochwasser vom August 2002 – Ermittlung der Gefährdungspotentiale an Elbe und Mulde“*, S. 258-274.

TOORMAN, E.A. & BERLAMONT, J.E. (1991): A Hindered Settling Model for the Prediction of Settling and Consolidation of Cohesive Sediment. *Geo-Marine Letters* 11, S. 179-183.

STÄNDIGE KOMMISSION (hrsg. 2008): Bericht der Expertengruppe 1 „Quantitative Untersuchungen“ der Unterarbeitsgruppe „Sediment- und Baggergutmanagement entlang des Oberrheins“, unveröff.

VOLLMER, S. & SCHRIEVER, S. (2004): Feststofftransport und Flußbettentwicklung der Elbe, BfG-1431, Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

VOLLMER, S. & GÖLZ, E. (2006): Sediment Monitoring and Sediment Management in the Rhine River. In: *Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems. Proceedings of a symposium held in Dundee, UK, July 2006.* IAHS Publ. 306.

WITT, O., KELLER, M., HULCHER, D. & LEHMANN, M. (2003): Untersuchungen zum Resuspensionsrisiko belasteter Sedimentablagerungen im Rhein. Vom Wasser, Vol. 101, S. 189-204.

Klimaprojektionen
für den Sediment-
haushalt und
Risiken durch
kohäsive
Sedimente

WITT, O. (2004): Erosionsstabilität von Gewässersedimenten und deren Bedeutung für den Stofftransport bei Hochwasser am Beispiel ausgewählter Stauhaltungen des Oberrheins. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart, Nr. 127.

WU, W. & Wang, S. S. Y. (2008): Formulas for Sediment Porosity and Settling Velocity. Journal of Hydraulic Engineering, 132(8), S. 858-862.

11 Abkürzungen

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
AG	Arbeitsgruppe
BiSam	Binnensammler
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BWaStr	Bundeswasserstraße(n)
EG-WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
FGG	Flussgebietsgemeinschaft
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften
HCB	Hexachlorbenzol
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
JLU	Justus-Liebig-Universität
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KLIWAS	Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen
KM	Kilometer
MQ	mittlerer Abfluss
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet / Technisch Naturwissenschaftliche Universität Norwegens
PCB	Polychlorierte Biphenyle
SchwebDB	Schwebstoffdatenbank der BfG
SedDB	Sedimentdatenbank der BfG
SSIIM	Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option

SuBedO	Sediment- und Baggergutmanagement entlang des Oberrheins
TOC	Total organic carbon / Gesamter organischer Kohlenstoff
TS	Trockensubstanz
UAG	Unterarbeitsgruppe
WSA	Wasser- und Schifffahrtsamt
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung

Klimaprojektionen
für den Sediment-
haushalt und
Risiken durch
kohäsive
Sedimente



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Bundesanstalt für Wasserbau
(BAW)**

Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

www.baw.de
info@baw.de

**Bundesamt für Seeschifffahrt
und Hydrographie (BSH)**

Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg

www.bsh.de
posteingang@bsh.de



**BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE**



Deutscher Wetterdienst (DWD)

Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach/Main

www.dwd.de
info@dwd.de

**Bundesanstalt für
Gewässerkunde (BfG)**

Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

www.bafg.de
posteingang@bafg.de



IMPRESSUM

Herausgeber:
Bundesanstalt für Gewässerkunde
KLIWAS Koordination
Am Mainzer Tor 1
Postfach 20 02 53
56002 Koblenz
Tel.: 0261 / 1306-0
Fax: 0261 / 1306-5302
E-Mail: kliwas@bafg.de
Internet: <http://www.kliwas.de>

Redaktion: KLIWAS-Koordination
Bundesanstalt für Gewässerkunde

Autoren: Gudrun Hillebrand, Thorsten Pohlert,
Vera Breitung, BfG

Layout: Christin Hantsche und Tobias Knapp,
Bundesamt für Seeschifffahrt
und Hydrographie - Rostock

Druck: Bundesanstalt für Gewässerkunde

DOI: 10.5675/Kliwas_48/2014_5.01