

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Periodical Part, Report, Published Version

**Winterscheid, Axel; Gehres, Nicole; Cron, Nathalie**  
**Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den**  
**Sedimenthaushalt der Nordsee-Ästuare**

KLIWAS Schriftenreihe

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105390>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Winterscheid, Axel; Gehres, Nicole; Cron, Nathalie (2014): Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-Ästuare. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde (KLIWAS Schriftenreihe, 37/2014).

[https://doi.org/10.5675/Kliwas\\_37/2014\\_3.03](https://doi.org/10.5675/Kliwas_37/2014_3.03).

**Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

**KLIWAS Schriftenreihe  
KLIWAS-37/2014**

**Schlussbericht  
KLIWAS-Projekt 3.03**

**Einfluss von klimabedingten Änderungen  
auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-  
Ästuare**

Koblenz, im Dezember 2014



KLIWAS

# KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-37/2014

Schlussbericht  
KLIWAS-Projekt 3.03

Einfluss von klimabedingten Änderungen  
auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-  
Ästuar

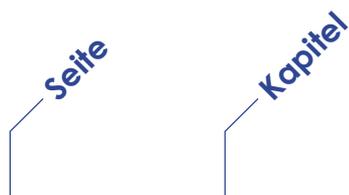
Autoren:

Axel Winterscheid  
Nicole Gehres  
Nathalie Cron

*Zitiervorschlag:*

WINTERSCHIED, A., GEHRES, N., CRON, N. (2014): Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-Ästuar. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.03. KLIWAS-37/2014. BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_37/2014\_3.03  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_37\\_2014\\_3.03.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_37_2014_3.03.pdf)





## Inhaltsverzeichnis

<b>04</b>		<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>
<b>05</b>		<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>
<b>07</b>	<b>1</b>	<b>KURZFASSUNG</b>
<b>10</b>	<b>2</b>	<b>ZIELE</b>
<b>11</b>	<b>3</b>	<b>STAND DER FORSCHUNG UND TECHNIK</b>
<b>14</b>	<b>4</b>	<b>METHODEN</b>
<b>14</b>	<b>4.1</b>	<b>METHODEN FÜR DIE VERBESSERUNG DES VERSTÄNDNISSES „SYSTEMRELEVANTER“ PROZESSE</b>
<b>14</b>	4.1.1	RHENO BEDFORM TRACKING
<b>15</b>	4.1.2	TRÜBUNGSRICHTUNGSINDIKATOR
<b>16</b>	<b>4.2</b>	<b>METHODIK ZUR BESCHREIBUNG VON ZUSTÄNDEN BEI DER REFERENZ (1961-1990) UND BEI PROJEKTIONEN DER ZUKUNFT</b>
<b>19</b>	<b>4.3</b>	<b>METHODIK ZUR ERSTELLUNG VON PROJEKTIONEN</b>
<b>21</b>	<b>5</b>	<b>DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN</b>
<b>21</b>	<b>5.1</b>	<b>UNTERSUCHUNGEN ZUR „SCHWEBSTOFFDYNAMIK“ ELBEÄSTUAR</b>
<b>23</b>	<b>5.2</b>	<b>SOHLNAHER SANDTRANSPORT</b>
<b>23</b>	<b>5.3</b>	<b>3-D SIMULATIONSMODELLE</b>
<b>27</b>	<b>6</b>	<b>VERNETZUNG DES PROJEKTES, KOOPERATIONSPARTNER</b>
<b>28</b>	<b>7</b>	<b>ERGEBNISSE</b>
<b>28</b>	<b>7.1</b>	<b>KERNAUSSAGEN ZU DEN ERGEBNISSEN</b>
<b>30</b>	<b>7.2</b>	<b>PROJEKTIONEN DES OBERWASSERZUFLUSSES IN DER NAHEN UND FERNEN ZUKUNFT UND AUSWIRKUNGEN AUF DEN SEDIMENTHAUSHALT DES ELBEÄSTUARS</b>
<b>35</b>	<b>7.3</b>	<b>EINSCHÄTZUNG ZUM GRAD DER BETROFFENHEIT DES SYSTEMS WASSERSTRAÙE UND DES OPERATIVEN GESCHÄFTS DER WSV IM GESCHÄFTSBEREICH DES BMVI UND (BZW. BMUB BEI PJ 5.04)</b>
<b>36</b>	<b>7.4</b>	<b>KERNAUSSAGEN ÜBER MÖGLICHE ANPASSUNGSOPTIONEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN (BEI PJ 5.04 SPEZIELL FÜR BMU + WSV/BMVBS)</b>

Seite	Kapitel
38	8 DISKUSSION UND AUSBLICK
40	9 LITERATUR
43	10 ABKÜRZUNGEN

Seite	Abbildung
-------	-----------

## Abbildungsverzeichnis

17	1 ZUSAMMENHANG ZWISCHEN DER TIDEGEMITTELTEN TRÜBUNG UNTERSCHIEDEN NACH EBB- UND FLUTSTROM AN DER STATION D1, MESSEBENE 1,5 M ÜBER GEWÄSSERSOHL (ELBEÄSTUAR, KM 643) UND DEM OBERWASSERZUFLUSS, MESSZEITRAUM 2005 BIS 2010
18	2 METHODE ZUR AUSWERTUNG DER HÄUFIGKEIT UND DAUER VON PHASEN EINES LANG ANHALTEND NIEDRIGEN OBERWASSERABFLUSSES
19	3 ABSOLUTE HÄUFIGKEIT VON PHASEN EINES LANG ANHALTEND NIEDRIGEN OBERWASSERZUFLUSSES IN REFERENZZEITRAUM UND ZEITRAUM FERNE ZUKUNFT (2071-2100), GEWÄHLTER SCHWELLENWERT FÜR ANALYSE 578 M <sup>3</sup> /S
24	4 MODELLSTRUKTUR TIDECLUSTER MIT DEN KOPPLUNGSANSÄTZEN DER VERSCHIEDENEN KOMPONENTEN (MORPHODYNAMIK, HYDROLOGIE UND GEWÄSSERGÜTE) (BFG, 2015)
25	5 GEOMETRIEN DER TIDEELBE MODELLE
28	6 OBERWASSERABHÄNGIGKEIT DER WANDERGESCHWINDIGKEITEN VON TRANSPORTKÖRPERN IN DREI UNTERSUCHTEN ABSCHNITTEN DER TIDEELBE, AUS BFG (2011B)
33	7 KLIMABEDINGTE ÄNDERUNGSSIGNALE BEIM OBERWASSERZUFLUSS AM PEGEL NEU DARCHAU, ELBE-KM 536,44 (NAHE UND FERNE ZUKUNFT ENTHALTEN IM ENSEMBLE MIT 17 EINZELPROJEKTIONEN JEWEILS VERGlichen ZU REFERENZ 1961 – 1990, UNTERSUCHTE SCHWELLENWERTE 578, 400 UND 300 M <sup>3</sup> /S) HINWEIS: AUFGRUND VON ÜBERLAGERUNG DER MARKIERUNGSPUNKTE Z.T. KEINE VOLLSTÄNDIGE DARSTELLUNG ALLER ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR ALLE EINZELPROJEKTIONEN

Seite

Tabelle

## Tabellenverzeichnis

<b>16</b>	<b>1</b>	<b>ANALYSIERTE PROJEKTIONEN DES OBERWASSERZUFLUSSES AN PEGEL NEU DARCHAU (ELBE)</b>
<b>27</b>	<b>2</b>	<b>PROJEKT 3.03 – ÜBERSICHT KOOPERATIONSPARTNER</b>

## Anhang



# 1 Kurzfassung

Ein verändertes Klima wird Einfluss auf die Entwicklung der Sedimenthaushalte der deutschen Nordsee-Ästuar von Elbe, Weser und Ems nehmen. Für die Unterhaltung des Verkehrsträgers „Wasserstraße“ wird dies zukünftig veränderte Rahmenbedingungen bei der Sicherstellung der für die Schifffahrt erforderlichen Fahrwassertiefen bei gleichzeitiger Erhaltung und Verbesserung des gegenwärtigen ökologischen Zustands bedeuten. Damit wird Klimawandel zu einer wichtigen Komponente für ein Baggergut- und Sedimentmanagementkonzept.

„Klimasensitive“ Randbedingungen, also treibende Kräfte auf die zukünftige Entwicklung der Sedimenthaushalte, sind der Oberwasserzufluss und der Meeresspiegel. Der Oberwasserzufluss ist als der Zufluss aus den Einzugsgebieten von Elbe, Weser und Ems stromauf der Tidegrenze definiert. Im Fokus des Projektes 3.03 steht der Oberwasserzufluss, welcher das Strömungs- und Transportgeschehen von Sedimenten und Schwebstoffen im Ästuar maßgeblich beeinflusst. Räumlicher Schwerpunktbereich der Untersuchungen ist das innere Elbeästuar in einem Streckenabschnitt von Brunsbüttel bis Hamburg. Dieser Abschnitt umfasst die ästuarine Trübungszone, die ihr Maximum etwa auf Höhe von Brunsbüttel besitzt.

Die Untersuchungsergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass durch Klimawandel nur geringe Auswirkungen auf den Grobsedimenthaushalt<sup>1</sup> und auf die sohlgebundenen Sandtransporte zu erwarten sind. Daher wird auch zukünftig der klimabedingte Anteil am Unterhaltungsaufwand für die Baggerung von sandigen Einzeluntiefen unverändert bleiben. Sandige Transportkörper prägen die Morphologie der Gewässersohle entlang großer Gewässerabschnitte im inneren Elbeästuar stromauf von Brunsbüttel. Im Zuge der Untersuchung dieser Abschnitte wurde auch ein neu entwickeltes Werkzeug mit dem Namen Rheno Bedform Tracking eingesetzt.

Mit Blick auf den Feinsedimenthaushalt<sup>2</sup> hat die Analyse von gewässerkundlichen Daten zu Trübung und Strömung sowie von Daten zu Menge und Zusammensetzung des bei der Wassertiefenunterhaltung anfallenden Baggergutes gezeigt, dass für die *möglichen Auswirkungen von Klimawandel* das Auftreten von mehrwöchigen und noch längeren Phasen eines anhaltend niedrigen Oberwasserzuflusses eine zentrale Einflussgröße ist. Abhängig von der Häufigkeit und der Intensität des Auftretens sol-

---

<sup>1</sup> Das Grobsedimentinventar der Elbe setzt sich aus sandigen und wenigen Anteile an feinkiesigen Sedimenten zusammen, gröbere Sedimentfraktionen kommen nur in sehr geringen Anteilen vor.

<sup>2</sup> Als Feinsediment gilt Sediment mit einem hohen Anteil in der Kornfraktion < 63 µm (Ton und Schluffe). Dieses Material besitzt aber zugleich auch höhere Feinsandanteile (63 - 200 µm), wobei schluffiger Feinsand das größte Sediment darstellt, welches noch zum Feinsediment gezählt wird (BfG, 2014).

cher Phasen wird es die Entwicklung der Schwebstoffgehalte in der Wassersäule und die Ablagerungen von schwebstoffbürtigen und daher sehr feinkörnigen Feinsedimenten auf der Gewässersohle maßgeblich beeinflussen können. Solche hydrologischen extremen Phasen beim Oberwasserzufluss bedeuten einen kritischen Zustand für das Baggergut- und Sedimentmanagement im Ästuar. Es kommt dann zu einer Verlagerung der ästuarinen Trübungszone stromauf und zu einer Verstärkung der stromaufgerichteten Feinsedimenttransporte mit den zuvor beschriebenen Auswirkungen (ansteigende Schwebstoffgehalte und Baggermengen). Ein zukünftiger Anstieg des Meeresspiegels würde diese Entwicklung zusätzlich verstärken (Schlussfolgerung von Projekt 2.04/3.02).

Zugleich ist bei der Projektarbeit festgestellt worden, dass die klassischen hydrologischen Kennwerte für Niedrigwasser (z.B. NQ, NMQ7) diesen aus morphologischer Sicht kritischen hydrologischen Zustand nur unzureichend erfassen. Entsprechend wurden bei der Bearbeitung des Projektes „morphologisch ausgerichtete“ Methoden bzw. Werkzeuge für die Analyse hydrologischer Zeitreihen entwickelt.

Die Analyse von Projektionen des Oberwasserzuflusses der nahen (2021-2050) und fernen (2071-2100) Zukunft am Pegel Neu Darchau (Elbe-km 536,44)<sup>3</sup> hat in Bezug auf solche Phasen eines lang anhaltend niedrigen Oberwasserzuflusses kein als eindeutig zu beschreibendes Klimaänderungssignal ergeben. Innerhalb dieser Gruppe an Projektionen gibt es stets Einzelprojektionen, die entweder ein positives oder negatives Änderungssignal zeigen; also eine zukünftig entweder größere oder kleinere Auftretenswahrscheinlichkeit von Phasen eines lang anhaltend niedrigen Oberwasserzuflusses. Dies gilt für die Ergebnisse der nahen und fernen Zukunft gleichermaßen. Die Mehrzahl der analysierten Einzelprojektionen für den Oberwasserzufluss zeigt jedoch für den Zeitraum der fernen Zukunft ein in der Tendenz positives Klimaänderungssignal. Solche durch ein positives Klimaänderungssignal charakterisierte Projektionen beschreiben mögliche Zukünfte, die hydrologisch stärker als bisher durch lang anhaltende Phasen konstant niedriger Oberwasserzuflüsse geprägt sind. In einer solchen Zukunft muss klimabedingt mit nachteiligen Auswirkungen auf den Feinsedimenthaushalt des Elbeästuars gerechnet werden.

Im Umfang vergleichbare Untersuchungen an Weser und Ems konnten aufgrund fehlender Projektionen für den zukünftigen Oberwasserzufluss nicht durchgeführt werden. Aber auch in diesen Ästuaren sollte zukünftig mit vergleichbaren Auswirkungen gerechnet werden, da hier die Oberwasserzuflüsse von Weser und Ems ebenfalls Einfluss auf Lage und Schwebstoffverhältnisse der ästuarinen Trübungszone nehmen. Das zeigen die Ergebnisse der modellbasierten Sensitivitätsstudien aus Projekt 2.04/3.02.

---

<sup>3</sup> Die Projektionen des Oberwasserzuflusses sind durch das Projekt 4.01 zur Verfügung gestellt worden.

Folge des Klimawandels für das Elbeästuar ist ein in der 2. Hälfte des Jahrhunderts verstärkt stromaufgerichteter Feinsedimenttransport, der ansteigende Baggermengen in den Unterhaltungsschwerpunkten des oberen Ästuars stromauf von Stade bis in den Hamburger Hafen bewirken kann. Ansteigende Schwebstoffkonzentrationen und eine erhöhte Intensität und Menge von Baggerungen bedeuten zusätzliche Auswirkungen auf den ökologischen Zustand des Gewässers (z.B. Lichtklima, Sauerstoffhaushalt oder Verlandung von Seiten- und Flachwasserbereichen).

Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-Ästuar

Eine grundsätzlich nachhaltige Anpassungsoption an den Klimawandel für alle Nordsee-Ästuar ist die Umsetzung von solchen Maßnahmen im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie und der Integrierten Bewirtschaftungspläne, die auf die Verbesserung der hydromorphologischen Strukturvielfalt (Schaffung von Flachwasser- und Seitenbereichen, naturnahe Ufergestaltungen, etc.) abzielen. Diese Maßnahmen schaffen natürliche Sedimentsenken und wirken sich grundsätzlich positiv auf die Strömungsverhältnisse und die Sedimenttransporte aus. Eine für das Elbeästuar spezielle Anpassungsoption kann die Umlagerung von mehr schwebstoffbürtigem Baggergut - unter Berücksichtigung auch der in Zukunft noch möglichen Schadstoffbelastungen der Feinsedimente (siehe Projekt 3.06) - auf weiter seewärts gelegene Verbringstellen sein. Insgesamt ist davon auszugehen, dass unter Klimawandel die mit der Unterhaltung des Elbeästuars verbundene Transportentfernung und Gesamtfahrtstrecke der eingesetzten Hopperbagger steigen wird. Es wird empfohlen, die möglichen Folgen von Klimawandel und daraus resultierende Anpassungsoptionen als Bestandteil einer zukünftigen Fortschreibung der Strombau- und Sedimentmanagementkonzepte für die deutschen Nordsee-Ästuar aufzugreifen und zu berücksichtigen.

## 2 Ziele

Projektziel ist die Beschreibung der möglichen Wirkungen eines zukünftig veränderten Klimas auf die Sedimenthaushalte der Nordsee-Ästuare. Dazu werden wichtige Prozesse, wie z.B. der strömungsbedingte Transport und die morphodynamischen Änderungen der Gewässersohle durch Ablagerung und Erosion von sowohl sandigen als auch schwebstoffbürtigen Sedimenten näher untersucht. Projektionen zukünftig möglicher Entwicklungen des Oberwasserzuflusses, eines wichtigen Einflussfaktors auf die Entwicklung v.a. des Feinsedimenthaushaltes, geben einen Einblick in die zukünftig zu erwartenden Herausforderungen sowohl bei der Sicherstellung der für die Schifffahrt erforderlichen Fahrwassertiefen als auch bei Erhaltung und Verbesserung des gegenwärtigen ökologischen Zustands der Ästuare. Darauf aufbauend sind Anpassungsoptionen an den Klimawandel erarbeitet worden.

Die folgenden Aspekte stehen hinsichtlich der möglichen Auswirkungen von Klimawandel im Fokus der Untersuchungen:

- zukünftige Sedimentfrachten entlang der Ästuare (differenziert nach dem sohlgebundenen Sandtransport und dem Schwebstofftransport in Suspension)
- Entwicklung der Sedimenthaushalte (differenziert nach sandigen Sedimenten und schwebstoffbürtigen Sedimenten sowie Schwebstoffkonzentrationen in der Wassersäule) und
- mögliche Veränderungen bei den anfallenden Unterhaltungsbaggermengen

Systemverständnis ist Grundlage für die Erstellung plausibler Projektionen für mögliche Entwicklungen der Sedimenthaushalte. Die verfügbaren Modellvorstellungen über das Wirkgefüge an Prozessen sind jedoch in Teilen unvollständig bzw. basieren auf starken Vereinfachungen der viel komplexeren Realität, v.a. bei den kohäsiven Feinsedimenten (Beispiele: Bildung und Zerstörung von Schwebstoffflocken und Konsolidierung von frisch abgelagerten Feinsedimenten). In der Konsequenz sind Simulationsmodelle der Sedimenthaushalte bzw. die darin mathematisch formulierten Modellvorstellungen Werkzeuge zum Systemverständnis. Daher ist die fortlaufende Verbesserung des Systemverständnisses, d.h. Verstehen und Kenntnis der wirkenden Prozesse und Einflussgrößen, welche Zustand und Entwicklung der Sedimenthaushalte auch schon in der Gegenwart beeinflussen, ein weiteres zentrales Projektziel.

### 3 Stand der Forschung und Technik

Der Transport von Sedimenten wird sowohl in Laboreinrichtungen als auch in der Natur messtechnisch erfasst und untersucht. Naturmessungen, z.B. Messungen der Schwebstoffkonzentration, haben die Zustände in der Vergangenheit zumeist nur über kürzere Zeiträume oder räumlich begrenzte Bereiche erfasst. Beispielsweise haben Grabemann & Kappenberg (2001) über mehrwöchige Zeiträume die Schwebstoffdynamik an Messpontons in der Weser und Elbe messtechnisch erfasst und analysiert. Spingat (1997) untersuchte den Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Trübung an einzelnen Messstationen der Tideeems. Es stehen zahlreiche weitere Untersuchungen zur Verfügung, die aber nur Daten aus relativ kurzen und nicht aus mehrjährigen Zeiträumen analysieren konnten. Längerfristige Effekte und Entwicklungen, die den Sedimenthaushalt beeinflusst haben, konnten aufgrund der eingeschränkten Datenlage nur vereinzelt untersucht werden.

Einige der wenigen mehrjährigen Datensätze von Schwebstoffkonzentrationen liegen für die Außenems bzw. an weiteren Stationen entlang der niederländischen Nordseeküste vor. Diese Messzeitreihen reichen bis in die 1970er zurück. Aufgrund vergangener Veränderungen bei der Methodik zur Probenahme mussten für die in Deltaris (2012) beschriebene Trendanalyse alle Altdaten aus den 1970er und 1980er Jahre von der Analyse ausgeschlossen werden. Viele der in Deltaris (2012) untersuchten Stationen zeigen für die Datenreihe ab 1990 einen signifikanten Anstieg bei den Schwebstoffkonzentrationen. Die genauen Ursachen dieser Entwicklung konnten im Rahmen dieser Analyse jedoch nicht festgestellt werden. Eine weitere Ausnahme bildet die von der GKSS<sup>4</sup> durchgeführte Auswertung von Daten zu Schwebstoffkonzentrationen entlang des Elbeästuars. Solche Hubschrauber-Längsprofiluntersuchungen sind entlang des Elbeästuars seit 1980 durch die ARGE Elbe<sup>5</sup> regelmäßig durchgeführt worden. Gemeinsam mit weiteren Analysen der großräumigen Schwebstoffdynamik enthält der Bericht: „Sedimenttransportgeschehen in der tidebeeinflussten Elbe, der Deutschen Bucht und in der Nordsee“ (GKSS, 2007) eine Beschreibung des gegenwärtigen Wissensstandes. In den darauf folgenden Jahren wurde dieser Wissensstand konsequent durch zwei aufeinander folgende Systemstudien der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) fortgeschrieben und auf Aspekte des Baggergut- und Sedimentmanagements fokussiert (siehe BfG, 2008 und BfG, 2014).

Auf messtechnischer Seite wird die überwiegende Anzahl gewässerkundlich relevanter Parameter (z.B. Trübung, Strömungsgeschwindigkeiten) zur Beschreibung und

---

<sup>4</sup> GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, seit 2010 umbenannt in Helmholtz Zentrum Geesthacht (HZG)

<sup>5</sup> Arbeitsgemeinschaft zur Reinhaltung der Elbe, seit 2010 Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG Elbe)

Quantifizierung der ästuarinen Sedimenthaushalte und der Morphodynamik erst seit der jüngeren Vergangenheit an Dauermessstationen oder wiederkehrenden Messungen kontinuierlich bzw. mit zeitlich höherer Auflösung systematisch auf der Ebene des Gesamtsystems durch Einrichtungen der Länder und des Bundes erfasst. Systemweit ausgelegte Trübungsmessungen werden z.B. im Elbeästuar erst seit 2005 durch die Wasser- und Schifffahrtsämter Hamburg und Cuxhaven sowie die Hamburg Port Authority durchgeführt.

Die beste Datengrundlage liegt zu den Fachthemen Bathymetrie / Topographie, Sedimentologie und Wasserstandsmessungen vor. Insgesamt ermöglicht die vorhandene Datengrundlage jedoch nur stark überschlägige bzw. unzureichende Abschätzungen über den Zustand und die lang- und mittelfristige Dynamik der ästuarinen Sedimenthaushalte. Zusätzlich sind die deutschen Nordsee-Ästuare stark durch anthropogene Nutzungen und Eingriffe geprägt. Zu klimatischen Einflüssen kommt eine Vielzahl an strombaulichen Eingriffen in den vergangenen Jahrzehnten hinzu, die alle Einfluss auf die Entwicklung der Sedimenthaushalte genommen haben. Die langfristige Entwicklung des Meeresspiegels ist eine weitere klimasensitive Randbedingung mit Einfluss auf die Entwicklung der Sedimenthaushalte. Der Meeresspiegel wird langjährig an vielen Pegelstationen entlang der Nordseeküste und in den Ästuaren gemessen. Vergleichbare Zeitreihen über den Zustand der Sedimenthaushalte liegen jedoch nicht vor.

Rückwirkend ist deshalb anhand von Messdaten eine Aufbereitung des Zustandes und der Entwicklung der Sedimenthaushalte der Nordsee-Ästuare in den für die Klimafolgenforschung und auch innerhalb des KLIWAS Forschungsverbundes verwendeten Referenzzeitraum von 1961 bis 1990 nicht mehr möglich.

Naturmessdaten können durch mathematische Modelle zur Berechnung und Simulation der Sedimentdynamik und der Transporte in ihrer Aussagekraft unterstützt werden. Solche Modelle haben maßgeblich zur Verbesserung des Systemverständnisses beigetragen, jedoch besteht – und wird auch weiterhin bestehen bleiben – ein fortgesetzter Untersuchungsbedarf, um Wissenslücken zum Prozessgeschehen und der Quantifizierung/Bilanzierung natürlicher Sedimentsysteme sowohl durch die Analyse von Naturmessdaten als auch durch die Anwendung weiterentwickelter Modelle weiter zu schließen.

Trotz der technischen Entwicklung einer immer leistungsfähigeren Hardware sind die gegenwärtig verfügbaren Rechenkapazitäten unzureichend für die Durchführung von 3D-Simulationen der Hydro- und Morphodynamik auf der Skala eines Ästuars und über den Zeitraum von 100 Jahren, welcher die für das KLIWAS Vorhaben definierten Untersuchungszeiträume der nahen (2021 – 2050) und der fernen (2071 – 2100) Zukunft abdeckt. Daher werden bei der Klimafolgenforschung (hier Bereich Ästuare) 3-D mathematische Modelle zur Simulation und Berechnung der Sedimentdynamik und -transporte überwiegend zu Sensitivitäts- und Prozessstudien eingesetzt. Progn-

sen zum mittel- bis langfristigen Sedimenttransport und zur Morphodynamik sind mit großen Unsicherheiten behaftet (Kösters et al., 2014). Eine Beschleunigung der Rechenzeit von Simulationsmodellen, z.B. durch Vereinfachung bei der mathematischen Beschreibung von Prozessen oder durch Vergrößerung der räumlichen und zeitlichen Auflösung im Modell würde im Ergebnis die bestehenden Unsicherheiten zusätzlich noch erhöhen.

Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-Ästuar

Vergleicht man die in Kapitel 2 gesetzten Projektziele mit dem aktuellen Stand von Forschung und Technik, so war bei der Projektbearbeitung nicht alleinig die Forschungsfrage zu klimasensitiven Einflussfaktoren, deren zukünftige Entwicklung und Einfluss auf den Sedimenthaushalt zu bearbeiten. Hinzu kam die Vorbereitung und Bearbeitung verschiedener Aufgaben mit einem überwiegend technischen Anteil (siehe Kapitel 4):

- Aufbau und Weiterentwicklung geeigneter Modellsysteme für Mehrjahressimulationen
- Entwicklung spezieller Werkzeuge zur Analyse großer Datenmengen aus dem Bereich der Gewässerkunde (z.B. mehrjährige und zeitlich hochaufgelöste Zeitreihen zur Trübung, Zeitreihen bathymetrischer Daten)
- Entwicklung von Werkzeugen für die Analyse hydrologischer Daten auf morphologisch wirksame Kennzahlen

## 4 Methoden

Um Projektionen zukünftig möglicher Entwicklungen der Sedimenthaushalte zu erstellen, ist ein hinreichendes Verständnis des „systemrelevanten“ Prozessgeschehens erforderlich. Dieses Verständnis umfasst alle Prozesse, die einen maßgeblichen Einfluss auf Zustand und Entwicklung des ästuarinen Sedimenthaushaltes haben. Eine zweite Voraussetzung ist die Möglichkeit zur Beschreibung eines Systemzustandes, bestenfalls anhand von spezifischen Kenngrößen. Zwecks Bewertung der in Projektionen aufgezeigten möglichen Entwicklungen eines Sedimenthaushaltes ist es erforderlich, zukünftige Zustände mit dem bekannten Referenzzustand vergleichen. Für alle KLIWAS Projekte bildet der Systemzustand im Zeitraum 1961 – 1990 den gemeinsamen Referenzzustand. Neben Daten sind geeignete Methoden zu deren Analyse erforderlich, um die notwendigen Voraussetzungen zu erfüllen.

### **4.1 Methoden für die Verbesserung des Verständnisses „systemrelevanter“ Prozesse**

Für eine Verbesserung des Verständnisses „systemrelevanter“ Prozesse wurden die nachfolgend beschriebenen Methoden entwickelt bzw. weiter entwickelt. Diese dienen der speziellen Analyse von Naturmessdaten und ergänzen durch ihre besonderen Funktionen den Bestand an standardmäßig verfügbaren Methoden zur Datenanalyse.

#### **4.1.1 Rheno Bedform Tracking**

Für die Auswertung von Linienpeilungen und Fächerecholotpeilungen der Gewässerbathymetrie wird die Software Rheno Bedform Tracking (Frings et al., 2012) verwendet. Die Entwicklung der Software wurde zudem von Projekt 3.03 fachlich begleitet. Mit der Software können komplexe Transportkörperstrukturen und Geometrien, welche maßgeblich die Morphologie der Gewässersohle prägen, detektiert und (eine ausreichende Datengrundlage vorausgesetzt) deren Wanderungsgeschwindigkeiten bestimmt werden. Aus letzterem kann auch der sohlnahe Sedimenttransport berechnet werden. Die Untersuchungen dienen zur Verbesserung des Verständnisses der ästuarinen Morphodynamik in sandigen und durch Transportkörper geprägten Gewässerabschnitten.

Rheno Bedform Tracking ist eine aus der Version DT2D 3 (Wesseling & Wilbers, 2000) weiterentwickelte Software. In ihrer Anwendungen werden Peildatensätze in zweidimensionale Längsprofile zur Erkennung von Einzeldünen unterteilt. Für jede Einzeldüne wird Länge, Breite und Grad der Asymmetrie berechnet. Entlang dieser Profile wird ein gleitender Durchschnitt berechnet. Beim Vergleich zweier zeitlich aufeinanderfolgender Peildatensätze werden mit Hilfe der Kreuzkorrelation die Wan-

dergeschwindigkeiten der Transportkörper bestimmt. Die mit Rheno Bedform Tracking erzielten Ergebnisse bilden die Datengrundlage für weitergehende Auswertungen, wie z.B. der Wirkung der klimasensitiven Randbedingung „Oberwasserzufluss“ auf die Transportkörpergeometrie, deren Wandergeschwindigkeiten und damit die sandigen Sedimenttransporte an der Gewässersohle. Rheno Bedform Tracking wurde auch wegen des hohen Automatisierungsgrades bei der Analyse bathymetrischer Datensätze entwickelt. Das ermöglicht die Analyse einer großen Anzahl von bathymetrischer Datensätze, um eine größere Bandbreite an Situationen für den Oberwasserzufluss abzudecken.

#### 4.1.2 Trübungsrictung sindikator

Die Auswertung von kontinuierlichen Messzeitreihen der Trübung und der Strömungsgeschwindigkeiten mit Hilfe des in Projekt 3.03 entwickelten Transportrichtungsindikators (TRI) liefert ein semi-quantitatives Bild über den Schwebstoffnettotransport in tidebeeinflussten Regimen (BfG 2011b). Im Gegensatz zu Messungen der Schwebstoffgehalte sind für die Nordsee-Ästuare an mehreren Stationen kontinuierliche Messzeitreihen der Trübung in hoher zeitlicher Auflösung (alle 5 Minuten ein Messwert) verfügbar. Gewässertrübung ist jedoch nur ein indirekter Anzeiger für ein bestimmtes Konzentrationsniveau von Schwebstoffen, das theoretisch mittels Kalibrierung in einen korrespondierenden Schwebstoffgehalt umgerechnet werden kann. An der Tideelbe werden aktuell die zur Kalibrierung erforderlichen Schwebstoffproben entnommen und analysiert (siehe WSA Hamburg 2013). Bis eine robuste Kalibrierung der Trübungsdaten auf Schwebstoffgehalte vorliegt, kann der resultierende Schwebstoffnettotransport semi-quantitativ mit Hilfe des TRI abgeschätzt und der Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Schwebstofftransporte weiter untersucht werden.

Bei dem TRI handelt es sich um kein Werkzeug zur Ableitung von Projektionen oder Prognosen, es ist ein Werkzeug für die Analyse von Messzeitreihen mit dem Ziel der Verbesserung des Systemverständnisses.

Die Anwendung des TRI basiert auf der vereinfachenden Annahme, dass im Zeitraum derselben Tide während der Ebbe- und Flutphase höhere Trübung mit einem ebenfalls höheren Schwebstoffgehalt korrespondiert. Der TRI wird für jede Tide berechnet und ist definiert als der Quotient aus den gegenläufigen Gesamtfrachten bei Ebbe und Flut. Da der TRI ein Verhältnis von gegenläufigen Frachten darstellt, handelt es sich um einen Index ohne physikalische Einheit. Eine Mittelung der einzelnen TRI-Werte ermöglicht eine Aussage über die langfristige Nettotransportrichtung (stromauf oder stromab gerichtet) von Schwebstoffen. Die Berechnung erfolgt durch Anwendung der nachfolgenden Gleichung auf die Messzeitreihen von Trübung ( $T_i$ ) und Strömungsgeschwindigkeit ( $v_i$ ). Es wird in der Gleichung der Betrag der Strömungsgeschwindigkeiten bei Ebbe verwendet, da die Flutstromrichtung als positive Achsrichtung definiert ist. Die Subtraktion des Betrags „1“ von dem berechneten Quotienten erfolgt

aus Gründen der verbesserten Darstellung. Damit wird erreicht, dass  $TRI = 0$  eine ausgeglichene Transportmassenbilanz zwischen Ebb- und Flutstrom beschreibt.

$$TRI = \frac{\vec{F}_{x,n\_Flut}}{\vec{F}_{x,n\_Ebbe}} = \frac{\sum_{i=1}^{n\_Flut} (\vec{v}_{x,i} * T_i)}{\sum_{j=1}^{n\_Ebbe} (\vec{v}_{x,j} * T_j)} \quad \begin{array}{l} \text{mit } TRI > 1 \text{ residueller Nettotransport stromauf} \\ \text{mit } TRI < 1 \text{ residueller Nettotransport stromab} \end{array} \quad [-]$$

## 4.2 Methodik zur Beschreibung von Zuständen bei der Referenz (1961-1990) und bei Projektionen der Zukunft

Wie in Kapitel 3 begründet, konnten aufgrund der unzureichenden Datenlage keine Zustände des Sedimenthaushaltes für den Referenzzeitraum 1961-1990 rekonstruiert und unter Angabe von Zahlenwerten beschrieben werden. Nur für den Oberwasserzufluss, eine vor allem für die Schwebstoffdynamik einflussreiche und zudem auch klimasensitive Randbedingung, konnten Zustände sowohl für den Referenzzeitraum als auch für verschiedene Projektionen des Oberwasserzuflusses für das Elbeästuar (siehe Tabelle 1) definiert werden.

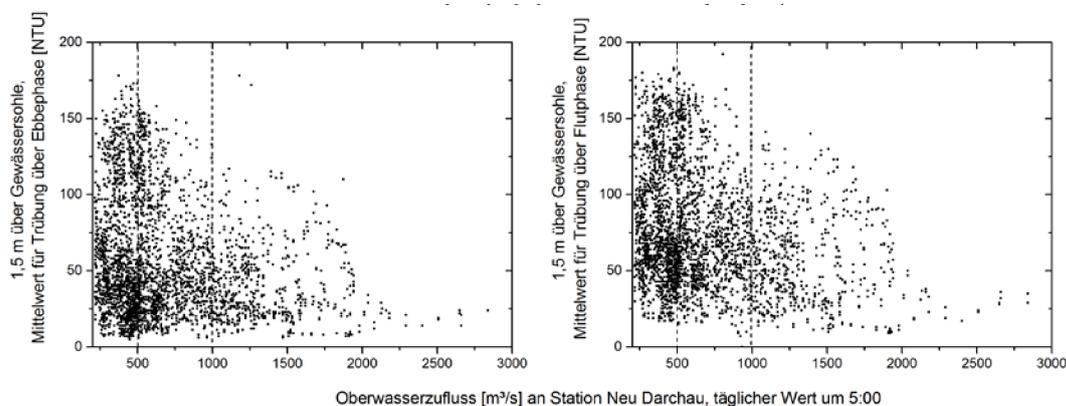
**Tabelle 1: Analytierte Projektionen des Oberwasserzuflusses an Pegel Neu Darchau (Elbe)**

<b>Projektion des Oberwasserzuflusses (Daten aus Klimaprojektion, verwendete hydrologisches Modelle LARSIM-ME oder HBV-D), Quelle Projekt 4.01</b>	<b>Nahe Zukunft (2021-2050)</b>	<b>Ferne Zukunft (2071-2100)</b>
A1B_EH5r3_RE-ENS_LSMM_EPW_LSM-ME	X	X
A1B_ARP_ALD45_LSMM_EBI_HBV-D	X	
A1B_ARP_ALD51_LSMM_EBI_HBV-D	X	X
A1B_BCM_HH5_LSMM_EBI_HBV-D	X	X
A1B_BCM_RCA3_LSMM_EBI_HBV-D	X	X
A1B_EH5r3_RACMO_LSMM_EBI_HBV-D	X	X
A1B_EH5r3_RCA3_LSMM_EBI_HBV-D	X	X
A1B_EH5r3_REGCM_LSMM_EBI_HBV-D	X	X
A1B_EH5r3_RE-ENS_LSMM_EBI_HBV-D	X	X
A1B_EH5r3_RE-KLM_LSMM_EBI_HBV-D	X	X
A1B_HCQ0_CLM24_LSMM_EBI_HBV-D	X	X
A1B_HCQ0_HRQ0_LSMM_EBI_HBV-D	X	X
A1B_HCQ0_HH_LSMM_EBI_HBV-D	X	
A1B_HCQ16_RCA3_LSMM_EBI_HBV-D	X	X
A1B_HCQ3_HRQ3_LSMM_EBI_HBV-D	X	X
A1B_HCQ3_RCA_LSMM_EBI_HBV-D	X	X

Untersuchungen haben den Zustand in Bezug auf Phasen lang anhaltend niedriger Oberwasserzuflüsse als relevant für die Entwicklung von Zuständen eines zukünftiger Sedimenthaushalte identifiziert (vgl. Winterscheid et al., 2014). Während solcher Phasen kommt zu einer fortschreitenden Anreicherung von Schwebstoffen in der Trübungszone, welche zugleich sich weiter stromauf in das Ästuar hineinbewegt. Solche Phasen bedeuten daher für die Tideelbe einen kritischen Zustand für die Unterhaltung der Fahrrinne (Verstärkung der Flutstromdominanz, Anreicherung des Wasserkörpers mit Schwebstoffen, für weitergehende Erläuterung siehe BfG 2008 oder BfG 2014). Im nächsten Abschnitt werden die Kriterien für den Vergleich von Zuständen untereinander beschrieben.

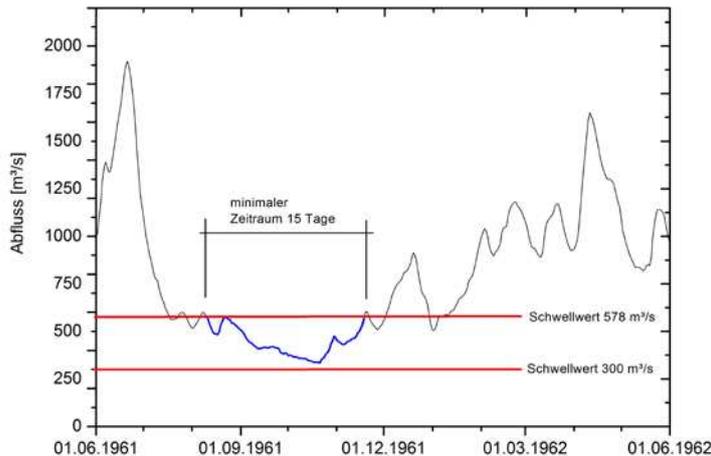
### **Zeitreihenanalyse „Phasen lang anhaltend niedriger Oberwasserabflüsse“ und Detektion Klimaänderungssignal**

Anlass für die Entwicklung dieser neuen Methode zur Zeitreihenanalyse war die Feststellung, dass die klassischen hydrologischen Kennwerte für Niedrigwasser (z.B. NQ, NMQ7) diesen aus morphologischer Sicht kritischen hydrologischen Zustand nur unzureichend erfassen bzw. beschreiben können. Zwischen Trübung und dem tagesaktuellen Abfluss beim Oberwasser besteht keine unmittelbare Korrelation (vgl. Abbildung 1), außer dass bei niedrigen Oberwasserzuflüssen in der Tendenz höhere Trübungsverhältnisse festgestellt werden können.



**Abbildung 1: Zusammenhang zwischen der tidegemittelten Trübung unterschieden nach Ebb- und Flutstrom an der Station D1, Messebene 1,5 m über Gewässersohle (Elbeästuar, km 643) und dem Oberwasserzufluss, Messzeitraum 2005 bis 2010**

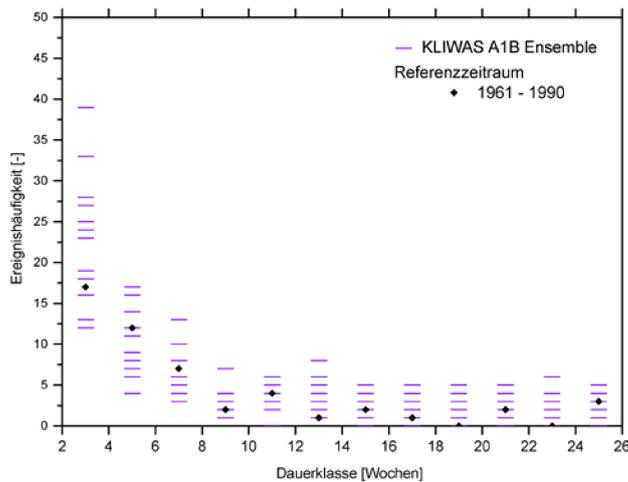
Für eine Definition des Referenzzustandes und der in Projektionen enthaltenen Zustände für den Oberwasserzufluss musste deshalb ein spezieller Kennwert und die zu seiner Bestimmung erforderlichen Methodik der Zeitreihenanalyse entwickelt werden. Diese ist in Abbildung 2 dargestellt. Die genaue Definition des Kennwertes wird im Anschluss an diese Abbildung erläutert.



**Abbildung 2: Methode zur Auswertung der Häufigkeit und Dauer von Phasen eines lang anhaltend niedrigen Oberwasserabflusses**

Mit der Methodik können für beliebige Abflusszeitreihen eine automatisierte Auswertung von Häufigkeit und Dauer von Phasen lang anhaltend niedriger Oberwasserzuflüsse durchgeführt werden. Unterschreitet die Ganglinie einen zuvor definierten Schwellenwert, wird der Zeitraum in Tagen solange gezählt, bis der Abfluss diesen definierten Schwellenwert erneut überschreitet. Für die zur Analyse gewählten Schwellenwerte werden Dauer und Häufigkeit der gezählten Ereignisse in einer Statistik für die weitere Auswertung erfasst. Ereignisse der Dauer von unter 15 Tage und damit sehr kurze und wenig wirksame Ereignisses bleiben in der Statistik unberücksichtigt. Die Kombination aus Schwellenwert und seiner Auftretenshäufigkeit bei bestimmten Dauerklassen definiert einen Zustand bzw. Kennwert, der mit dem Zustand in der Referenz bzw. bei einer beliebigen Projektion verglichen werden kann.

Ein Beispiel für ein Ergebnis zur absoluten Häufigkeit von Einzelereignissen ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Statistik fasst die Ergebnisse zu Dauerklassen zusammen; für die kleinste Klasse gilt  $> 2$  und  $< 4$  Wochen, alle weiteren Klassen ergeben sich dann aus dem Vielfachen von 2 Wochen. Abbildung 3 beschreibt zugleich den Referenzzustand 1961 – 1990 bezogen auf den Schwellenwert  $578 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Abbildung 3: Absolute Häufigkeit von Phasen eines lang anhaltend niedrigen Oberwasserzuflusses in Referenzzeitraum und Zeitraum ferne Zukunft (2071-2100), gewählter Schwellenwert für Analyse 578 m<sup>3</sup>/s.**

Das Klimaänderungssignal wird für jede Dauerklasse D als das Verhältnis der kumulierten Ereignishäufigkeit von Projektion P und Referenzzeitraum R<sub>f</sub> berechnet:

$$\text{Änderungssignal}_{P,D} = \frac{\text{kum. Häufigkeit Ereignisse}_{P,D}}{\text{kum. Häufigkeit Ereignisse}_{R_f,D}} \quad [\%]$$

Die kumulierte Häufigkeit berechnet sich aus der absoluten Häufigkeit von Ereignissen. Zusätzlich berücksichtigt wird für jede Dauerklasse, dass ein Ereignis dieser Klasse zugleich Ereignisse kürzerer Dauerklassen umfasst. So umfasst ein Ereignis der Dauer 6-8 Wochen (Klassenmitte 7 Wochen) zugleich auch - bezogen auf die Klassenmitte - zwei aufeinander folgende Ereignisse der Dauer 2-4 Wochen (Klassenmitte 3 Wochen) sowie ein Ereignis der Dauer 4-6 Wochen (Klassenmitte 5 Wochen). Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Kapitel 7 dargestellt. Sie beschreiben das in den Abflussdaten enthaltene Änderungssignal, welches Teil der Grundlage zur Diskussion möglicher Auswirkungen auf den Sedimenthaushalt des Elbeästuars und die Unterhaltungsarbeiten durch die WSV oder durch Dritte ist (siehe Kapitel 7.3).

### 4.3 Methodik zur Erstellung von Projektionen

KLIWAS ist angetreten, etwas über mögliche zukünftige Zustände an Bundeswasserstraßen unter Szenarien des Klimawandels auszusagen. Mathematische Simulationsmodelle sind in KLIWAS ein zentrales Werkzeug, um ausgehend von den Ergebnissen regionaler Klimaprojektionsrechnungen die möglichen Auswirkungen und Betroffenheit von schiffahrtrelevanten und flussökologischen Sachverhalten zu untersuchen; in Projekt 3.03 sind es die ästuarinen Sedimenthaushalte.

Für die Erstellung von Projektionen zukünftig möglicher und durch Klimawandel beeinflusster Zustände und Entwicklungen der Sedimenthaushalte bedarf es der Anwendung von großräumigen 3-D Langzeitsimulationen der Schwebstoff- und Sedimenttransporte sowie der Morphodynamik der Gewässersohle und angrenzender Flachwasser- und Wattbereiche. Solche Langzeitrechnungen konnten aufgrund bestehender Limitierungen bei den verfügbaren bzw. technisch/numerisch möglichen Rechnerleistungen nicht durchgeführt werden (vgl. Kapitel 3). Die KLIWAS Modellkette konnte an dieser Stelle mit Modellrechnungen nicht fortgesetzt werden.

Alternativ werden in Projekt 3.03 die für die Elbe verfügbaren Projektionen des Oberwasserzuflusses für die nahe und ferne Zukunft analysiert (für Methode siehe Kapitel 4.2) und hinsichtlich ihrer möglichen Auswirkungen auf den Feinsedimenthaushalt des Elbeästuars diskutiert. An die Stelle von zahlenmäßigen Zeitreihen, wie diese das Ergebnis aus Rechenläufen von Simulationsmodellen sind, treten hier verbal argumentativ beschriebene Projektionen zukünftig möglicher Zustände und Entwicklungen.

Die Projektionen:

- berücksichtigen den möglichen Einfluss anderer, klimaanabhängiger Einflussfaktoren, wie z.B. veränderte Baggergut- und Sedimentmanagementstrategien. Ein zukünftiger Ausbau von Fahrrinnen und Hafenanlagen oder andere strombauliche Maßnahmen sind in den Prognosen nicht berücksichtigt. Entsprechend liegt den Projektionen der gegenwärtige Ausbau- und Unterhaltungszustand zugrunde.
- berücksichtigen die kumulativen Effekte durch Oberwasserzufluss und Meeresspiegel, indem die singulären Effekte miteinander zu einem Gesamteffekt verschnitten werden.
- sind unterteilt nach den Wirkungen auf den Grobsedimenthaushalt (Sand- und Kiesfraktion, auch als Geschiebe bezeichnet) und den Feinsedimenthaushalt (Ton und Schluff, auch als Schwebstoff bezeichnet) erarbeitet worden. Diese Unterteilung ergibt sich aus dem unterschiedlichen Prozessgeschehen, welches den Transport und Verbleib der jeweiligen Sedimentgruppe beeinflusst. Z.B. werden Grobsedimente sohlgebunden bzw. sohlnah von der Strömung transportiert, Feinsedimente hingegen werden überwiegend als Schwebstoff in Suspension transportiert.

Für die Berücksichtigung des klimasensitiven Einflussfaktors Meeresspiegel werden die Ergebnisse der in Projekt 2.04/3.02 durchgeführten Sensitivitätsstudie genutzt. In dieser Analyse wurde die Wirkung eines um den Wert „Delta S“ veränderten Meeresspiegels auf die Tide- und Strömungsverhältnisse untersucht und beschrieben. Im Ergebnis wird ein ansteigender Meeresspiegel die stromaufgerichteten Feinsedimenttransporte in allen Ästuaren verstärken (für Ergebnisse und Methoden siehe Seiffert et al., 2014).

## 5 Durchgeführte Arbeiten

Unter den Nordsee-Ästuaren ist das Elbeästuar als Untersuchungsschwerpunkt ausgewählt worden (für Begründung siehe Kapitel 4.3).

### 5.1 Untersuchungen zur „Schwebstoffdynamik“ Elbeästuar

Datengrundlage für die Untersuchungen der Schwebstoffdynamik sind mehrjährige und zeitlich hochaufgelöste Zeitreihen von Trübung und Strömungsgeschwindigkeit, die an Dauermessstation entlang des Elbeästuars aufgezeichnet werden (für eine Beschreibung des Messnetzes siehe Strömich, 2011). Mehrere Veröffentlichungen sind im Rahmen von KLIWAS zur Schwebstoffdynamik und den nachfolgenden Fragestellungen erarbeitet worden, z.B. Svenson et al. (2011), Gehres et al. (2014) und Winterscheid et al (2014):

- Welche Faktoren haben einen Einfluss auf die Schwebstoffdynamik in der Tideelbe?
- Wie beeinflussen sich die Faktoren untereinander?
- Haben diese Einflussfaktoren eine kurzfristige, mittelfristige oder langfristige Wirkung auf die Schwebstoffdynamik?
- Welchen Einfluss haben sich verändernde Schwebstoffkonzentrationen auf die Baggermengenentwicklung

Hier wurden auch wesentliche Fachgrundlagen für die nachfolgenden Untersuchungen zu möglichen Wirkungen des Klimawandels auf den Sedimenthaushalt (hier Fokus auf Schwebstoffe, schwebstoffbürtige Sedimente) gelegt. Zeitgleich sind durch die BfG und in enger Abstimmung mit KLIWAS weitere Fachbeiträge zur Schwebstoffdynamik im Elbeästuar erstellt worden, z.B. BfG (2012) und BfG (2014), die einen besonderen Fokus auf das Baggergut- und Sedimentmanagement haben.

Der hydrologische Zustand einer Phase lang anhaltend niedriger Oberwasserzuflüsse ist als ein besonders kritisches Ereignis mit Blick auf Klimawandel und die Unterhaltung der Fahrrinne (Verstärkung Flutstromdominanz, Anreicherung Wasserkörper mit Schwebstoffen) erkannt worden (vgl. 3. Zwischenbericht Projekt 3.03 aus 2011). Untersuchungsergebnisse, wie der Oberwasserzufluss die Sedimentationsraten und die Sedimentqualität in den Baggerschwerpunkten des inneren Elbeästuars für Feinsedimente beeinflusst, wurden auf der KLIWAS Statuskonferenz 2011 bzw. in dem Berichtsband zu dieser Konferenz vorgestellt (Winterscheid et al. 2012).

Der nachfolgende Absatz ist eine Kurzzusammenfassung aus Winterscheid et al. (2014); eine Veröffentlichung, die im Rahmen von KLIWAS erarbeitet worden ist

und die einen besonderen Fokus auf die Wirkung von Phase lang anhaltend niedriger Oberwasserzuflüsse auf die Entwicklung der Schwebstoffgehalte und Sedimentationsraten legt.

In den Untersuchungen wurde festgestellt, dass in der nahen Vergangenheit Phasen eines lang anhaltend niedrigen Oberwasserzuflusses mehrfach aufgetreten sind. Im Zeitraum 2005 bis 2013 hat es am Pegel Neu Darchau insgesamt 12 Ereignisse gegeben, bei denen der Oberwasserzufluss für mindestens vier Wochen den Schwellwert von  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$  dauerhaft unterschritten hat. Die längste Phase hat in 2008 mehr als 26 Wochen gedauert. Anhand von Naturmessdaten und Baggermengenentwicklungen konnten die Zusammenhänge zwischen Oberwasserzufluss, Gewässertrübung (als Näherung für den Schwebstoffgehalt) und Sedimentationsraten besonders intensiv im Baggerschwerpunkt vor Wedel untersucht werden. Durch die Akkumulation von Schwebstoffen in Phasen eines dauerhaft niedrigen Oberwasserzuflusses wächst die zur Sedimentation potenziell verfügbare Schwebstoffmenge. Entsprechend wurden in diesen Phasen auch maximale Sedimentationsraten beobachtet.

Mit Blick auf Klimawandel stellte sich daher die zentrale Frage, ob in Zukunft mit häufigen und vielleicht sogar extremeren Phasen gerechnet werden muss?

Zur Beantwortung dieser Frage sind die in Projekt 4.01 auf der Grundlage von Klimaprojektionen berechneten Abflussprojektionen für den Pegel Neu Darchau an der Elbe (siehe Nilson et al., 2014, für eine Übersicht auch Tabelle 1) einer statistischen Analyse unterzogen worden. Die Methodik dieser Analyse ist in Kapitel 4.2 beschrieben. Für die Definition des Referenzzustandes ist in gleicher Weise die am Pegel Neu Darchau erfasste Abflussreihe der Jahre 1961 bis 1990 untersucht worden. Hierfür ist eine spezielle Methode entwickelt und angewendet worden (für eine Erläuterung siehe Kapitel 4.2). Die Anwendung dieser Methode auf Abflusszeitreihen ermöglicht eine automatisierte Auswertung von Häufigkeit und Dauer von Phasen eines lang anhaltend niedrigen Oberwasserzuflusses.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen dieser Analyse sind auf der Statuskonferenz 2013 in einem gemeinsamen Vortrag mit Projekt 3.06 (Aspekt Schadstoffbelastung der Sedimente unter Klimawandel) vorgestellt worden und sind in den Kapitel 7.2 bis 7.4 enthalten bzw. berücksichtigt worden.

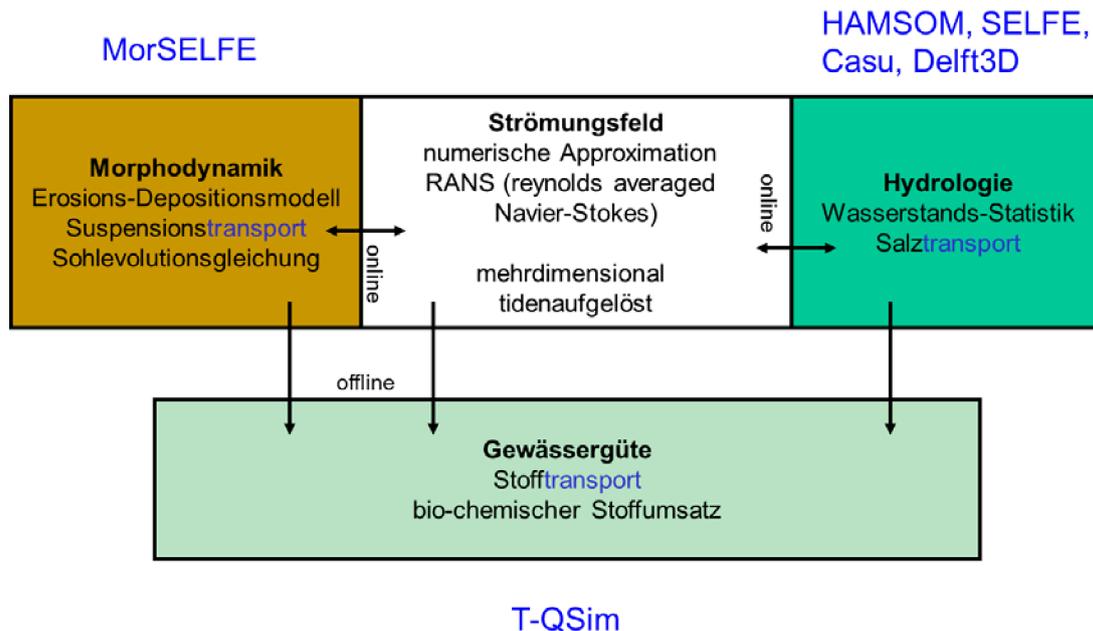
Das hier bei der KLIWAS Projektbearbeitung zusätzlich erarbeitete Wissen und Systemverständnis konnte zugleich auch in die Beratungstätigkeit der BfG für WSV und HPA eingesetzt werden. Im Zeitraum 2012 bis 2014 hat die BfG für das Elbeästuar eine Systemstudie erstellt, die im Ergebnis Empfehlungen für eine weiterentwickelte Baggergut- und Sedimentmanagementstrategie gibt (BfG, 2014). Die in dieser Studie gegebenen Empfehlungen wurden dann umgekehrt im Rahmen von KLIWAS auf deren zukünftige Robustheit gegenüber Klimawandel und möglichen Anpassungsoptionen überprüft.

## 5.2 Sohlhafer Sandtransport

In direkter Zusammenarbeit mit dem WSA Hamburg, WSA Cuxhaven und der Hamburg Port Authority (HPA) sind mehrere Berichte und Veröffentlichungen zur Transportkörperdynamik in ausgewählten Abschnitten des Elbeästuars entstanden (BfG 2011b, Gehres et al. 2013, WSA Hamburg 2013). Datengrundlage bilden Fächerecholotpeilungen, die im Rahmen der Verkehrssicherung und teilweise auch speziell für den Zweck dieser Untersuchungen im Bereich der Süderelbe bei Hamburg erfasst worden sind. Alle Untersuchungen haben zum Ziel, das Verständnis über den sohlnahen Sandtransport (inneres Ästuar, stromauf des Bereichs der baroklinen Zirkulation) und seiner Einflussfaktoren im Elbeästuar zu verbessern. Zugleich konnte das neu entwickelte Instrument Rheno Bedform Tracking (siehe Kapitel 4) in die Anwendung gebracht werden.

## 5.3 3-D Simulationsmodelle

Ursprüngliches Projektziel war die Durchführung von morphodynamischen Langzeitsimulationen der deutschen Nordsee-Ästuar Elbe, Weser und Ems, um mögliche Entwicklungen der Sedimenthaushalte zu untersuchen. 3-D Langzeitsimulationen konnten jedoch nicht durchgeführt werden (siehe hierzu die Erläuterungen in den Kapiteln 3 und 4). Die durch den Kooperationspartner FI erzielten Ergebnisse konnten an der BfG vollständig durch das laufende Ressortforschungsprojekt Tidecluster aufgegriffen werden. In diesem Projekt wird der in KLIWAS begonnene fachübergreifende Ansatz zum Aufbau eines numerischen Modellclusters Tidegewässer in der BfG fortgesetzt. Dieses Cluster besteht aus den Komponenten Hydrodynamik, Morphologie und Gewässergüte (siehe Abbildung 4) und ermöglicht damit die Nachbildung der eng verknüpften und zum Teil rückgekoppelten Prozesse im Ästuar (siehe Schöl et al., 2011).



**Abbildung 4: Modellstruktur Tidecluster mit den Kopplungsansätzen der verschiedenen Komponenten (Morphodynamik, Hydrologie und Gewässergüte) (BfG, 2015)**

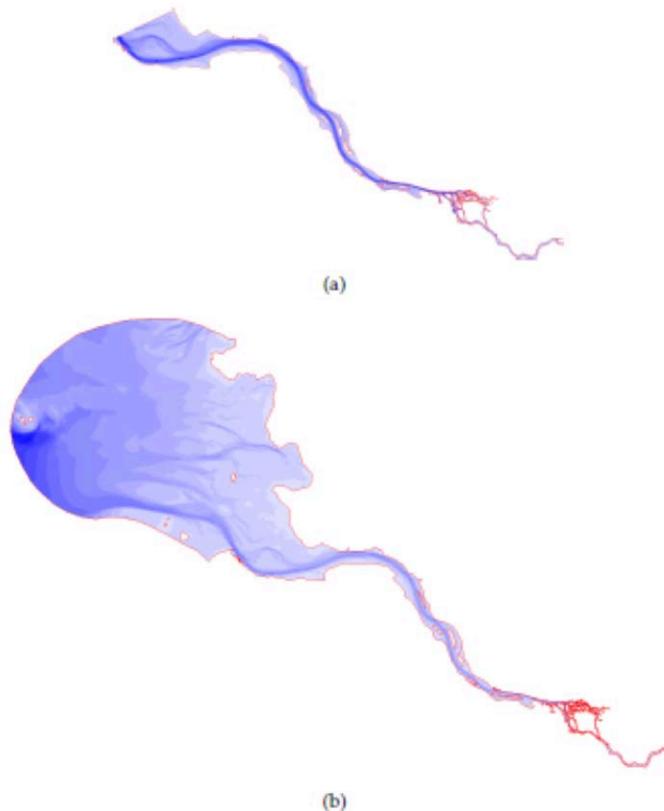
Zum Projektende konnten lauffähige Modelle für die Ästuare von Elbe (siehe nachfolgenden Absatz) und Weser (für Modellbeschreibung siehe Zorndt, 2014) erstellt werden, die als Beitrag zum Multi-Modellansatz mit Hilfe des quelloffenen Simulationswerkzeuges SELFE aufgebaut worden sind. Für das Weser-Modell wurde die Synergie mit dem parallel am FI bearbeiteten Verbundforschungsprojekt Klimafolgenforschung in Niedersachsen (KLIFF) genutzt. Das Ems-Modell wurde wegen der komplexen Flüssigschlickdynamik im Rahmen von KLIWAS nicht weiterverfolgt.

#### **Durchgeführte Arbeiten zur Erstellung Elbemodell**

In Kooperation mit dem Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen der Leibniz Universität Hannover (Kooperationspartner der BfG in Projekt 3.03 und im Folgenden als FI bezeichnet) wurden unter Verwendung des quelloffenen 3D Systems SELFE (für Modellbeschreibung siehe Zhang und Baptista, 2008) lauffähige Modelle zur hydrodynamischen Simulation Ästuare von Elbe und Weser erstellt. Für die Simulation der Schwebstoff- und Morphodynamik wurde das in SELFE enthaltene Modul MORSELFE genutzt (morphodynamic module for SELFE). Die Anwendung von MORSELFE beschränkt sich jedoch auf Testrechnungen. Bei diesen Rechnungen konnte mit dem am FI vorhandenen Rechner (Workstation mit 16 Kernen; 4\*AMD Opteron 6136) eine Modelllaufzeit von 28 Tagen in 42 Stunden Rechenzeit erreicht werden (siehe FI, 2013). Unter dieser Bedingung ist eine Langzeitsimulation, selbst eine die nur den Zeitraum der nahen Zukunft bis 2050 abdeckt, nicht sinnvoll. Zur Abschätzung zukünftiger Entwicklungen können Simulationsmodelle jedoch im Rahmen von Sensitivitätsstudien eingesetzt werden.

Der Eingangsdatensatz für das Elbeästuar wurde in zwei Varianten aufgebaut, welche in Abbildung 5 gegenübergestellt sind. Die nachfolgende Beschreibung der Varianten ist zu großen Teilen FI (2013) entnommen.

Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-Ästuar



**Abbildung 5: Geometrien der Tideelbe Modelle**

- (a) kleine Modellvariante mit seeseitigem Rand bei Cuxhaven und
- (b) große Modellvariante mit seeseitigem Rand in der Deutschen Bucht.

Für beide Varianten war anfangs geplant, die Gewässerbathymetrie des Jahres 2002 umzusetzen. Für morphodynamische Simulationen stünde damit ein möglichst langer Zeitraum zwischen 2002 und 2010 (Zeitpunkt der aktuellsten Bathymetrie für das gesamte Elbeästuar) zur Verfügung. Es wurde jedoch die Entscheidung getroffen, das qualitativ bessere Modell der Bathymetrie von 2006 zu nutzen. Für den Bereich des Hamburger Hafens ist die Bathymetrie eines mittleren Unterhaltungszustandes verwendet worden. Landseitig bilden Deichlinien bzw. die Kaikanten in Hafenbecken und die Umrisslinien von Inseln (Festlegung auf 2,5 m NN-Linie) die Modellränder. Den oberstromigen Modellrand bildet das Wehr Geesthacht (Elbe-km 585,9). Beide Modellvarianten unterscheiden sich durch verschieden gewählte seeseitige Ränder. Die kleine Modellvariante verwendet einen seeseitigen Rand auf Höhe Cuxhaven Kugelbake (ca. Elbe-km 730). Der Vorteil dieser Modellvariante ist die Möglichkeit der Steuerung des seeseitigen Randes mit nur einer Wasserstandsreihe (Datenquelle Portal Tideelbe: [www.portal-tideelbe.de](http://www.portal-tideelbe.de)). Nachteile bestehen in der Steuerung des

seeseitigen Salzgehaltes, der aufgrund fehlender Messungen nur tiefengemittelt trotz von in der Realität leicht geschichteter Verhältnisse (sohl nah von See her einströmendes Salzwasser) vorgegeben werden kann. Weiterhin wird der für morphodynamische Simulationen interessante Mündungsbereich stark durch die nahe Lage zum offenen Modellrand beeinflusst. Aussagen über die Entwicklung der Morphodynamik im Mündungsbereich sind daher nicht möglich. Aus diesem Grund wurde eine zweite große Modellvariante aufgebaut, deren seeseitiger Rand sich bogenförmig von Cuxhaven entlang der Watthöhenscheide in die Deutsche Bucht bis Helgoland erstreckt und nördlich von St. Peter Ording wieder den landseitigen Rand erreicht. Für die Steuerung des Salzgehaltes am Modellrand wurden konstante Gehalte verwendet. Umgekehrt ist die Randbedingung für Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten ungleich komplexer. Eine Möglichkeit besteht in der Übertragung der Verhältnisse aus einem vorgeschalteten Nordseemodell auf die Randknoten des großen Modells. Eine alternative Möglichkeit ist die Generierung von Randbedingungen für den Wasserstand aus Pegelinformationen. Eine entsprechende Methode wurde entwickelt und ist in FI (2013) beschrieben. Ebenfalls können FI (2013) alle Modellparameter und Ergebnisse der Modellkalibrierung entnommen werden.

## 6 Verwertung des Projekts, Kooperationspartner

Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-Ästuare

**Tabelle 2: Projekt 3.03 – Übersicht Kooperationspartner**

Kooperationspartner/ Auftragnehmer	Kurztitel	Ansprechpartner
Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen, Leibniz Universität Hannover	Aufbau von Modelldatensätzen der deutschen Nordseeästuar zur großräumigen Simulation des Sedimenthaushaltes	Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann, Dipl.-Ing. Knut Krämer
Projekt 3.06	Klimabedingt verändertes Transportverhalten schadstoffbelasteter Sedimente in den Nordsee-Ästuaren	Dr. Carmen Kleisinger
Projekt 4.01	Abflussprojektionen für den Pegel Neu Darchau an der Elbe	Dr. Enno Nilsson

## 7 Ergebnisse

### 7.1 Kernaussagen zu den Ergebnissen

Das Elbeästuar ist Schwerpunkt der im Projekt 3.03 durchgeführten Untersuchungen. Die maßgeblichen klimasensitiven Randbedingungen, die Einfluss auf zukünftig mögliche Entwicklungen des Sedimenthaushaltes nehmen, sind der Oberwasserzufluss und der Meeresspiegel.

#### Kernaussagen zum Sandhaushalt (inneres Elbeästuar stromauf von Brunsbüttel)

Für den untersuchten Bereich des inneren Elbeästuars stromauf von Brunsbüttel liegen keine Hinweise darauf vor, dass hier aufgrund von Klimawandel mit einer unmittelbaren und erhöhten Betroffenheit des Sandhaushaltes und der sohnahen Sandtransporte entlang der Fahrrinne gerechnet werden muss.

Die Analyse einer Vielzahl von Datensätzen der Bathymetrie, die das Ergebnis von Verkehrssicherungspeilungen sind, haben die Ergebnisse von Nasner (1974) und Zorndt et al. (2009) weiter bestätigen können und haben das in Abbildung 6 dargestellte Bild der sohnahen Sandtransporte ergeben. Es zeigt den Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Wanderrichtung und –geschwindigkeit der sandigen Transportkörperstrukturen.

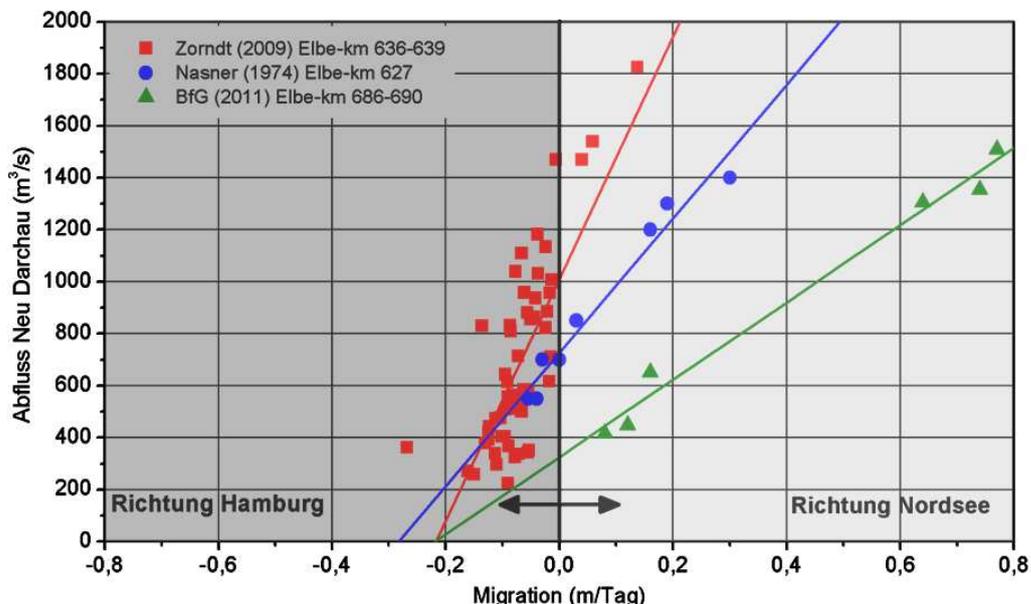


Abbildung 6: Oberwasserabhängigkeit der Wandergeschwindigkeiten von Transportkörpern in drei untersuchten Abschnitten der Tideelbe, aus BfG (2011b)

Im Gegensatz zur Wanderrichtung konnte ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Oberwasserzufluss und Geometrie (Höhe und Länge) von Einzelstrukturen nicht festgestellt werden. Es ist daher nicht anzunehmen, dass bedingt durch den Klimawandel und dessen möglicher Einfluss auf das hydrologische Regime der Oberwasserzuflüsse:

- die sandigen Baggermengen aus der Unterhaltung von Fahrrinnenabschnitten, deren Sohle morphologisch durch Transportkörper geprägt ist, ansteigen werden.
- die Transportkörperstrukturen einen veränderten Beitrag zur Dämpfung der mit dem Flutstrom einströmenden Tideenergie leisten werden.

### **Kernaussagen zum Feinsedimenthaushalt (Schwebstoffdynamik, schwebstoffbürtige Sedimentablagerungen) des Elbeästuars**

#### **Kernaussagen zum allgemeinen Systemverständnis:**

- Auch schon heute stellen Phasen eines lang anhaltend niedrigen Oberwasserzuflusses für die Unterhaltung der Baggerschwerpunkte mit stark schwebstoffbürtigen Sedimentablagerungen eine große Herausforderung dar.
- In solchen Phasen kommt es zu einer Verlagerung der Trübungszone stromaufwärts. Zugleich kommt es auch zu einer Verstärkung der stromauf gerichteten Feinsedimenttransporte (Flutstromdominanz der Feinsedimenttransporte, auch bezeichnet als Tidal Pumping). Beides führt in der Summe im oberen Elbeästuar zu ansteigenden Schwebstoffkonzentrationen.
- Folge aus Unterhaltungssicht sind verstärkte Ablagerungen von schwebstoffbürtigen Sedimenten in den Baggerschwerpunkten zwischen Stade und Hamburg. Baggergut, das in solchen Phasen nur ortsnah auf Verbringstellen untergebracht wird, wird verstärkt wieder rücktransportiert und kann erneut in den Baggerschwerpunkten zur Ablagerung kommen (Intensivierung Sedimentkreisläufe und Mehrfachbaggerungen).

#### **Kernaussagen zu den Auswirkungen von Klimawandel:**

Für den Zeitraum der fernen Zukunft konnten Hinweise auf einen Trend zu häufiger auftretenden und extremeren Phasen eines anhaltend niedrigen Oberwasserzuflusses festgestellt werden. Ein eindeutiges Klimasignal, d.h. sämtliche Einzelprojektionen zeigen denselben Trend, konnte jedoch nicht festgestellt werden. Die folgenden Auswirkungen auf den Feinsedimenthaushalt des Elbeästuars sind daher möglich:

- Anders als im Fall des sandigen Baggergutes muss bei den schwebstoffbürtigen und daher feinkörnigen Baggermengen mit zusätzlichen Mengen aufgrund von Klimawandel gerechnet werden (für Begründung siehe vorangehende Kernaussagen zum allgemeinen Systemverständnis).
- Die Akkumulationen von Schwebstoffen bzw. ansteigende Schwebstoffgehalte werden in der fernen Zukunft bestehende Verlandungsprozesse in den Sei-

ten- und Flachwasserbereichen weiter verstärken können. In der Folge wird dies verschlechternde Auswirkungen auf die ökologischen Funktionen dieser Bereiche haben können, z.B. die relativ zum Hauptstrom günstigeren Sauerstoffgehalte.

- Ein in Zukunft möglicher Meeresspiegelanstieg bedeutet für die Nordsee-Ästuar eine weitere Verstärkung der Flutstromdominanz und damit auch eine Verstärkung der stromaufgerichteten Sedimenttransporte (Seiffert et al. 2014). Der Effekt aus Meeresspiegelanstieg wird sich mit dem Effekt aufgrund der veränderten Oberwasserzuflüsse überlagern und die Auswirkung verstärken können (siehe Kapitel 7.2). Modellgestützte Sensitivitätsanalysen in den Projekten 2.04 und 3.02 zeigen jedoch, dass die Wirkung der Phasen lang anhaltend niedriger Oberwasserzuflüsse einen deutlich größeren Effekt auf die Lage der Brackwasserzone verglichen zum Meeresspiegelanstieg besitzt (Seiffert et al. 2014).

In der Tendenz muss auch in den Ästuaren von Weser und Ems mit denselben Effekten (Verlagerung Trübungszone, Sedimentationsgeschehen, Flutstromdominanz) gerechnet werden. Eine abschließende Absicherung dieser ersten Experteneinschätzung erfordert weitergehende Untersuchungen an Weser und Ems, um die ästuarspezifischen Randbedingungen, Zustände und Zusammenhänge (z.B. Tidekurven Fluid Mud, Lage der Verbringstellen und Zusammensetzung Baggergut, Oberwassereinfluss etc.) zu berücksichtigen. Erst aufgrund solcher Untersuchungen können die konkreten Auswirkungen auf das Baggergut- und Sedimentmanagement in diesen Ästuaren und die ggfls. erforderlichen Konsequenzen bestimmt werden.

## **7.2 Projektionen des Oberwasserzuflusses in der nahen und ferneren Zukunft und Auswirkungen auf den Sedimenthaushalt des Elbeästuars**

Das hydrologische Regime des Oberwasserzuflusses (Pegel Neu Darchau, Elbe-km 536,44) ist für 18 (nahe Zukunft) bzw. 16 (ferne Zukunft) Klimaprojektionen auf Änderungssignale analysiert worden (für Übersichtsliste siehe zuvor Tabelle 1). Im Fokus standen Häufigkeit und Dauer von Phasen eines lang anhaltend niedrigen Oberwasserzuflusses (für die Erläuterung der angewandten Untersuchungsmethoden siehe Kap. 4.5). Für die Analyse sind drei Schwellenwerte 578<sup>6</sup>, 400 und 300 m<sup>3</sup>/s festgelegt worden. Hydrologisch decken diese Werte im Referenzzeitraum etwa den Bereich zwischen mittlerem Abfluss (MQ) und mittlerem Niedrigwasserabfluss (MNQ) ab. Die Ergebnisse der Analyse (ausgedrückt als Änderungssignal in Prozent bezogen auf den Referenzzeitraum 1961 – 1990) sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Gesondert sind nochmals die Ergebnisse für die innerhalb von KLIWAS pro-

---

<sup>6</sup> Entspricht dem Median für tägliche Abflüsse im Zeitraum 1902 bis 2012

jektübergreifend untersuchte Klimaprojektion A1B\_EH5r3\_RE-ENS (hier unter Verwendung HBV-D als hydrologisches Modell, siehe Nilson et al., 2014) dargestellt.

Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-Ästuar

Einige Hinweise zur Interpretation des Änderungssignals: Ein im Ergebnis positives Änderungssignal bedeutet ein gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 - 1990 häufigeres Auftreten von Phasen eines lang anhaltend niedrigen Oberwasserzuflusses (charakterisiert durch Schwellenwert und Dauerklasse). Umgekehrt besagt ein negatives Änderungssignal eine erwartete Abnahme der Häufigkeit solcher Phasen. Für die Interpretation der Ergebnisse bedeutet ein positives Änderungssignal in der Konsequenz aller beschriebenen Auswirkungen auf den Sedimenthaushalt einen (klimabedingten) Anstieg der Schwebstoffgehalte und Baggermengen (also mehr Feinsedimentmengen in den Baggerschwerpunkten stromauf von Stade bis Hamburger Hafen, siehe zuvor Kernaussagen zum allgemeinen Systemverständnis). In der Tendenz sind die Auswirkungen und die daraus resultierenden Folgen (Baggermengenanstieg, Zunahme Schwebstoffgehalte, Verschlickungstendenzen) desto wahrscheinlicher und stärker:

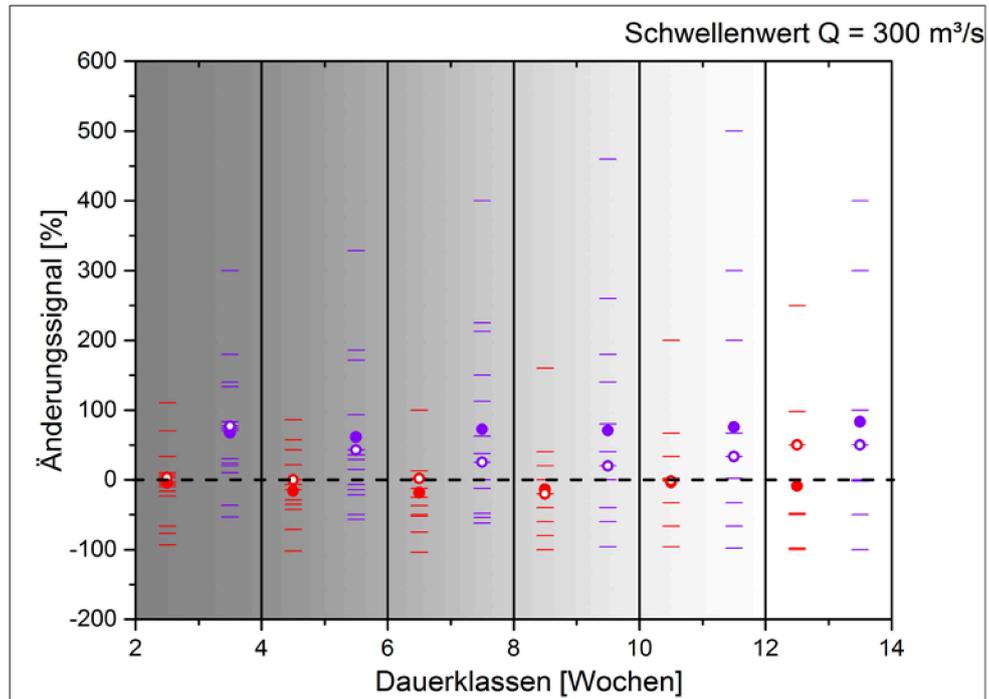
- je größer das Änderungssignal innerhalb einer Dauerklasse ist.
- je länger die Dauerklasse ist, bei der ein Änderungssignal auftritt.
- je niedriger der Schwellenwert ist, bei der ein Änderungssignal auftritt.

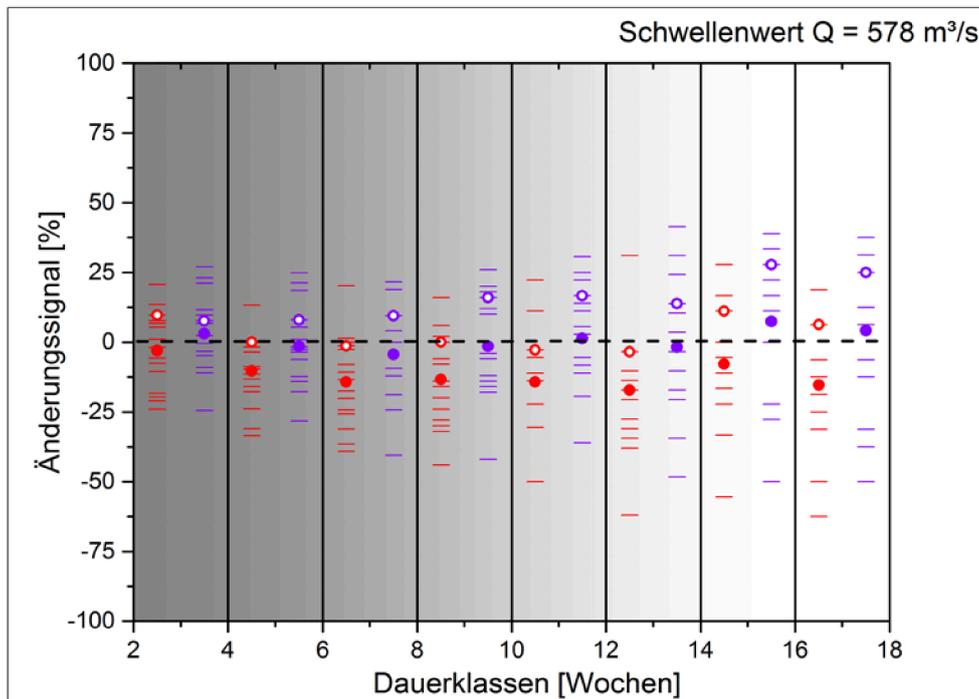
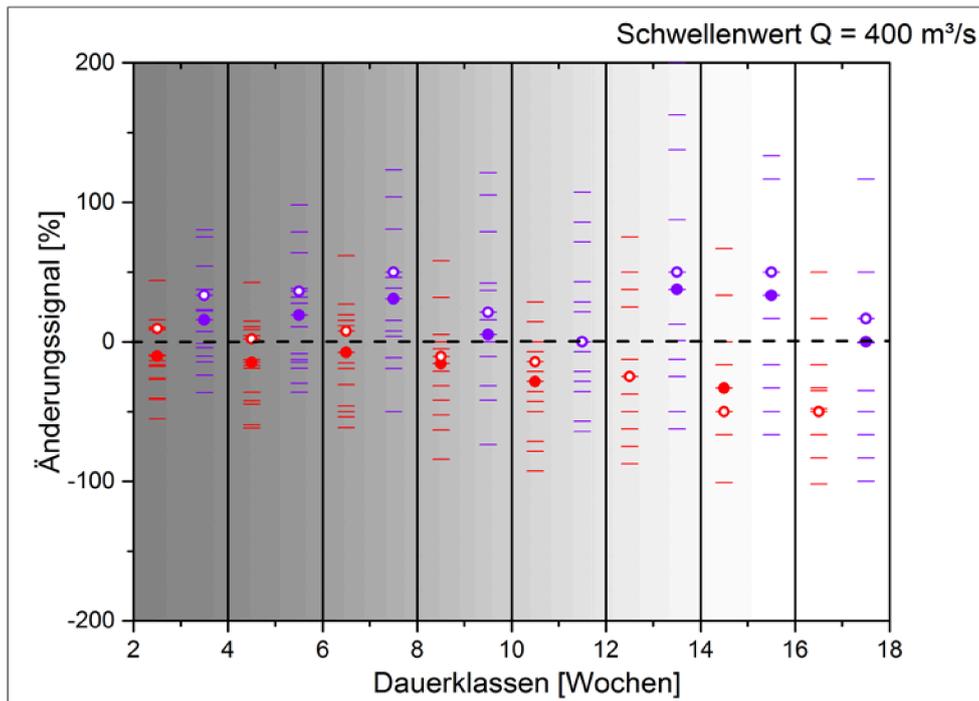
Legende für alle  
nachfolgenden  
Einzeldarstellungen

Einzelwerte  
- nahe Zukunft  
(2021-2050)  
- ferne Zukunft  
(2071-2100)

Mittelwerte  
• nahe Zukunft  
• ferne Zukunft

A1B\_EH5r3\_RE-ENS\_LSMM\_EBI\_HBV-D  
○ nahe Zukunft  
○ ferne Zukunft





**Abbildung 7: klimabedingte Änderungssignale beim Oberwasserzufluss am Pegel Neu Darchau, Elbe-km 536,44 (nahe und ferne Zukunft enthalten im Ensemble mit 17 Einzelprojektionen jeweils verglichen zu Referenz 1961 – 1990, untersuchte Schwellenwerte 578, 400 und 300  $\text{m}^3/\text{s}$ ) Hinweis: aufgrund von Überlagerung der Markierungspunkte z.T. keine vollständige Darstellung aller Änderungssignale für alle Einzelprojektionen.**

Unabhängig vom Schwellenwert und von der Dauerklasse zeigen die Ergebnisse für die Gesamtheit der untersuchten Abflussprojektionen kein eindeutiges Änderungssignal. Innerhalb der Gesamtgruppe gibt es stets eine Anzahl von Einzelprojektionen, die entweder ein positives oder negatives Änderungssignal besitzen. Dies gilt für die Ergebnisse der nahen und fernen Zukunft gleichermaßen. Die in KLIWAS projektübergreifend untersuchte Klimaprojektion A1B\_EH5r3\_RE-ENS zeigt für den Oberwasserzufluss am Pegel Neu Darchau ein für alle Schwellenwerte positives Klimaänderungssignal für die ferne Zukunft. Gegenüber den anderen Einzelprojektion zeigt diese Projektion ein „mittleres Verhalten“, d.h. es bewegt sich bei den verschiedenen Schwellenwerten und Dauerklassen stets nahe des Mittelwertes über alle Einzelprojektionen.

Bei individueller Betrachtung der Einzelprojektionen kann für den Zeitraum 2071-2100 (ferne Zukunft) gegenüber dem vorausgehenden Zeitraum 2021-2050 (nahe Zukunft) für eine wachsende Anzahl - in vielen Fällen sogar für die Mehrzahl - der Einzelprojektionen ein positives bzw. verstärkt positives Klimaänderungssignal festgestellt werden. Diese Tendenz der Zunahme an Einzelprojektionen, die häufigere Phasen eines niedrigen Oberwasserzuflusses in der fernen Zukunft anzeigen, trifft für die niedrigeren Schwellenwerten 400 bzw. 300 m<sup>3</sup>/s und alle darin enthaltene Dauerklassen zu. Bezogen auf die Schwellenwerte 578 und 400 m<sup>3</sup>/s kommt es bei einer Vielzahl der Einzelprojektionen in der nahen Zukunft relativ zum Referenzzeitraum 1961 – 1990 in der nahen Zukunft sogar zu einem negativen Änderungssignal, d.h. einer möglichen Abnahme von Länge und Häufigkeit der Phasen niedriger Oberwassers. Auch hier gilt für die Gesamtgruppe, dass dieses kein eindeutiges Signal aufweist. In den Abbildungen werden diese Trends bzw. systematischen Veränderungen durch den Vergleich der dargestellten Mittelwerte über alle Einzelprojektionen verdeutlicht. Dieser Mittelwert darf jedoch nicht als mittlere und daher wahrscheinlichste Projektion für das Gesamtensemble verstanden werden. Er hat vielmehr die Funktion eines Orientierungspunktes für das Erkennen von Trends bzw. systematischen Veränderungen innerhalb des Gesamtensembles. Je größer die Streuung der Einzelprojektionen um den gemeinsamen Mittelwert desto größer ist die Unsicherheit bezüglich der Aussagen zu möglichen Trends einzuschätzen.

### **Schlussfolgerung der Oberwasseranalyse am Pegel Neu Darchau / Elbe**

Ein eindeutig Klimaänderungssignal, welches Häufigkeit und Intensität von zukünftig auftretenden Phasen mit niedrigen Oberwasserzuflüssen beeinflussen wird, weist die Gesamtgruppe der Abflussprojektionen für den Pegel Neu Darchau nicht auf. Innerhalb der Gesamtgruppe und dort bei der Mehrheit der Einzelprojektionen konnten jedoch Hinweise auf ein mögliches Klimaänderungssignal festgestellt werden, das für die ferne Zukunft klimabedingte Auswirkungen auf die Unterhaltung (Anstieg Schwebstoffgehalte, Baggermehrmengen, Kreislaufbaggerungen), aber auch auf ökologische Belange (Verlandung von Seiten- und Flachwasserbereichen) nicht ausschließt. Anpassungsoptionen sollten daher diskutiert werden (siehe Kapitel 7.4).

Für die ferne Zukunft muss mit einem Anstieg des Meeresspiegels in einer Bandbreite von etwa 25 bis 26 cm gerechnet werden (nur sterischer/dynamischer Anteil, siehe Bülow et al., 2014). Die in den Projekten 2.04/3.02 durchgeführten Sensitivitätsanalysen<sup>7</sup> (siehe Seiffert et al., 2014) haben in der nachfolgenden Wirkungskette zum Ergebnis, dass bedingt durch einen Meeresspiegelanstieg mit einer Zunahme des Tidehubs, einer Zunahme der Flutstromgeschwindigkeit bzw. Flutstromdominanz und damit – gleichgerichtet zum Oberwasserzufluss – mit einer Verstärkung der stromaufgerichteten Sedimenttransporte gerechnet werden muss. Im Unterschied zu der Oberwasserwirkung von Einzelereignissen bedeutet ein ansteigender Meeresspiegel einen kontinuierlichen Effekt.

### **7.3 Einschätzung zum Grad der Betroffenheit des Systems Wasserstraße und des operativen Geschäfts der WSV im Geschäftsbereich des BMVI und (bzw. BMUB bei PJ 5.04)**

Die Analyse der Projektionen für den Oberwasserzufluss am Pegel Neu Darchau hat kein eindeutiges Änderungssignal ergeben. Für den Zeitraum der fernen Zukunft liegen jedoch Hinweise auf ein mögliches Änderungssignal vor (Kapitel 7.2). Die Projektionen für den Meeresspiegel zeigen für die ferne Zukunft einen Anstieg in der Bandbreite von 24 bis 28 cm (nur sterischer/dynamischer Anteil, siehe Bülow et al., 2014). Aufgrund dieser Entwicklungen muss in der fernen Zukunft (2071-2100) mit einer klimabedingten Verstärkung der stromaufgerichteten Feinsedimenttransporte im Elbeästuar gerechnet werden. Mit einer vergleichbaren Entwicklung ist in den Ästuaren von Weser und Ems zu rechnen. Projektionen der Oberwasserzuflüsse für eine weitergehende Analyse lagen jedoch nicht vor, so dass diese Aussage im Rahmen von KLIWAS nicht durch weitere Ergebnisse abgesichert werden konnte.

Eine in Zahlen ausgedrückte Angabe der in der fernen Zukunft möglichen Baggermengen - z.B. in Form eines prozentualen Anstieg der Baggermengen gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 bis 1990 - kann auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse nicht berechnet werden. Das gilt auch für die laufende Unterhaltung, in der schon eine nur mehrmonatig vorausschauende Prognose für die Baggermengenentwicklung nicht sicher gegeben werden kann. Vor allem werden Baggermengen in ihrer Entwicklung durch weitere – klimaunabhängige - Randbedingungen wie z.B. Verfügbarkeit von Baggergeräten, Unterhaltungszustände und durch die Unterbringungsstrategie für Baggergut beeinflusst. Insbesondere die Möglichkeit einer in der fernen Zukunft sich verstärkenden Flutstromdominanz ist eine Randbedingung, die bei der Unterbringungsstrategie beachtet werden muss. Eine verstärkte Flutstromdominanz bedeutet für potenzielle Verbringstellen im inneren Ästuar (Elbeabschnitt stromauf von Brunsbüttel bis Hamburg), dass zukünftig größere Anteile des dort um-

<sup>7</sup> Obwohl den Modellrechnung in Projekt 2.04/3.02 die Annahme eines deutlich stärkeren Meeresspiegelanstiegs von 80 cm (im Vergleich zu mindestens 25-26 cm bei Bülow et al., 2014) zugrunde liegt. Die Aussagen aus den Modellrechnungen bleiben in der Tendenz weiterhin nutzbar.

gelagerten Baggerguts zurück in den Stromauftransport gehen könnten. Als Folge der Baggergutunterbringung kann es zu weiteren Baggermehrmengen und zu einer Intensivierung von Kreislaufbaggerungen kommen. Diese Entwicklung würde dann unterhaltungsbedingt mit zunehmenden ökologischen Auswirkungen (z.B. Verstärkung von bestehenden Verlandungstendenzen in Flachwasser und Seitenbereichen, zusätzliche Belastung für Sauerstoffhaushalt) einhergehen.

#### **7.4 Kernaussagen über mögliche Anpassungsoptionen und Handlungsempfehlungen (bei PJ 5.04 speziell für BMU + WSV/ BMVBS)**

Zentrales Ziel nachhaltiger Baggergut- und Sedimentmanagementkonzepte ist es aus morphologischer Sicht, einen ausgeglichenen (Fein-)Sedimenthaushalt zu erreichen und die Notwendigkeit von Unterhaltungsbaggerungen z.B. durch Reduktion von Kreislaufbaggerungen möglichst zu minimieren (vgl. BfG, 2014). Klimawandel und die möglichen Effekte auf den ästuarinen (Fein-)sedimenthaushalt stellen zwar nicht in der nahen Zukunft, dafür möglicherweise in der 2. Hälfte dieses Jahrhunderts (ferne Zukunft) eine zusätzliche Herausforderung für die Erreichung dieser Ziele dar. Daher sollte die Vorbereitung geeigneter Anpassungsoptionen geprüft werden und in bestehende Baggergut- und Sedimentmanagementkonzepte integriert werden.

Klimabedingte Auswirkungen auf die Unterhaltung sandiger Flussabschnitte im Bereich der inneren Ästuar sind nicht zu erwarten.

Eine für das Elbeästuar spezielle Anpassungsoption kann die Umlagerung von mehr feinkörnigem Baggergut auf weiter seewärts gelegene Verbringstellen sein. Aus technischer Sicht kann eine solche Maßnahme kurzfristig umgesetzt werden. Ein sofortiger Handlungsbedarf besteht daher nicht, vielmehr sollte über Umsetzung dieser Option aufgrund von Beobachtungsdaten entschieden werden. Die Grundlagen für ein systemweites Monitoringprogramm sind bereits heute in BfG (2014) dargelegt. Insgesamt ist davon auszugehen, dass die mit der Unterhaltung der Wasserwege entlang des Elbeästuars verbundene Transportleistung<sup>8</sup> als Folge des Klimawandels steigen wird. Auch für die anderen Nordsee-Ästuar sollte diese Option als möglicher Bestandteil für das Baggergut- und Sedimentmanagement diskutiert werden.

Im Elbeästuar bildet sich aufgrund des schwebstoffgebunden Schadstoffeintrags von Oberstrom und anschließender Vermischung mit nur gering belasteten Schwebstoffen mariner Herkunft ein Schadstoffgradient aus der die Unterbringung gebaggerter Sedimente in weiter seewärts gelegene Flussabschnitte erschwert (vgl. BfG, 2014). Dies muss bei Ergreifen von Anpassungsoptionen an den Klimawandel berücksichtigt werden. Eine deutliche Reduktion der Sedimentbelastung würde aus ökologischer

---

<sup>8</sup> Definiert als das Produkt aus der Baggermenge [in m<sup>3</sup> Laderaumvolumen] und der Transportentfernung zwischen Ort der Baggerung und Verbringstelle [in km]

Sicht die Umsetzung dieser Anpassungsoption deutlich vereinfachen (vgl. Kleisinger et al., 2014).

Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-Ästuar

Eine grundsätzlich nachhaltige Anpassungsoption an den Klimawandel für alle Nordsee-Ästuar ist die Umsetzung von Maßnahmen im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie und der Integrierten Bewirtschaftungspläne, die auf den Sedimenthaushalt und die Sedimentdynamik wirken (z.B. Schaffung von Flachwasser- und Seitenbereichen, naturnahe Ufergestaltungen). Die Wirkung solcher Maßnahmen können stets als ein zusätzlicher Beitrag zur Erreichung eines ausgeglichenen (Fein-)sedimenthaushaltes betrachtet werden..

## 8 Diskussion und Ausblick

Auf den Untersuchungsgegenstand dieses Projektes, den Sedimenthaushalt, wirkt Klima(-wandel) nur indirekt über andere, im Projekt 3.03 als klimasensitiv bezeichnet Randbedingungen; als maßgeblich sind der Oberwasserzufluss und der Meeresspiegelanstieg identifiziert worden. Damit steht das Thema „Sedimente“ weit am Ende der bei KLIWAS eingesetzten Modellkette. Eine Fortsetzung der KLIWAS Modellkette an dieser Stelle in Form von Langzeitsimulationen über 100 Jahre und Multimodellansatz - d.h. 3-D Simulationsläufe für alle Klimaprojektionen ggf. sogar unter Verwendung mehrerer hydrodynamischer und morphodynamischer Modelle - war zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich.

Gegenwärtig und vermutlich auch in den kommenden Jahren werden daher Langzeitsimulationsläufe nicht die Ergebnisse für die Erstellung von Projektionen der ästuarinen Sedimenthaushalte liefern können. An dieser Stelle bleibt die Modellkette vor allem aufgrund bestehender technischer Limitierungen auch weiterhin unterbrochen. Daher wurden die im Projektverlauf mit der quelloffenen 3D Modellierungssoftware SELFE erzielten Ergebnisse innerhalb der BfG vollständig an das F&E Projekt Tidecluster (Aufbau Modellcluster Tidegewässer, bestehend aus den Komponenten Hydrodynamik, Morphologie und Ökologie) übergeben und werden seitdem dort weiterentwickelt und eingesetzt.

Ein Schwerpunkt für Forschung und Entwicklung liegt auf der mathematischen Beschreibung der für den Transport kohäsiver Sedimente verantwortlichen Prozesse sowie die Berücksichtigung unterschiedlich konsolidierter Bodenschichten in der Modellformulierung; hier bestehen wichtige Aufgaben für die weitere Verbesserung der Simulation ästuariner Sedimenthaushalte und deren Veränderungsdynamik. Zuletzt sei noch auf den „Spezialfall“ Unterems zwischen Papenburg und Emden hingewiesen. Dort werden der Sedimenthaushalt und die Dynamik durch das Vorhandensein von Flüssigschlick maßgeblich beeinflusst.

In gängigen Sedimenttransportmodellen kann der Übergang zwischen einer Schwebstoffsuspension (Newtonsches Fluid) zu Flüssigschlick (geprägt durch sein viscoplastisches Fließverhalten) nicht simuliert werden. Die Modellierung, aber auch die messtechnische Erfassung und Beschreibung dieses Phänomens ist weiterhin Gegenstand laufender Forschung.

Alternative Basis zur Ableitung von qualitativen, im besten Fall semi-quantitativen Projektionen der Sedimenthaushalte sind Systemstudien zur weiteren Verbesserung des Prozessverständnisses. Systemstudien sollten aus mehreren aufeinander bauenden und damit sich ergänzenden Komponenten bestehen:

- Monitoring des klein- und großräumigen Prozessgeschehens
- die nachgeschaltete Analyse dieser Naturmessdaten
- Nutzung der Daten und Ergebnisse für Aufbau und Betrieb numerischer Modellsysteme.
- Nutzung dieser Modelle für Prozess- und Sensitivitätsstudien.

Hierauf sollte der Schwerpunkt zukünftiger Arbeit im Bereich der Ressortforschung gelegt werden. Die Durchführung von 3-D Langzeitrechnungen sollte zugleich aber Ziel bleiben. Es empfiehlt sich, die Entwicklungen in der Forschungslandschaft in diesem Bereich zu beobachten und ggf. aufzugreifen, vor allem wegen der zukünftigen Entwicklung von leistungsfähigeren Rechnersystemen.

Die in Projekt 3.03 erreichten Ergebnisse sind daher auch als Beitrag im Sinne einer Systemstudie erstellt worden. Über das Forschungsprogramm KLIWAS hinaus haben die Ergebnisse bereits Eingang in die Praxis gefunden. So konnten die in der BfG - Systemstudie II (siehe BfG, 2014) für das Elbeästuar formulierten Empfehlungen für ein nachhaltiges Baggergut- und Sedimentmanagement durch die in Projekt 3.03 durchgeführten Untersuchungen zum Systemverständnis und den Projektionen des Oberwasserzuflusses weiter bestätigt werden. Sie entsprechen auch den Anforderungen an ein zukünftig an Klimawandel angepasstes Baggergut- und Sedimentmanagement.

## 9 Lite ra tur

BAW (2012): Modelluntersuchungen zum Sedimentmanagement in der Außenems, Bericht über den Stand der Arbeiten der BAW für die Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe „Baggergutunterbringung in der Außenems“, Bundesanstalt für Wasserbau, BAW-Nr. A3955 03 10144, Hamburg

BfG (2008): WSV Sedimentmanagement Tideelbe – Strategien und Potenziale – eine Systemstudie. Ökologische Auswirkungen der Unterbringung von Wedeler Baggergut. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, BfG-Bericht 1584

BfG (2011a): Untersuchungen der Dynamik von Transportkörpern sowie deren Oberwasserabhängigkeit an ausgewählten Flussabschnitten der Tideelbe, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, BfG-Bericht 1710

BfG (2011b): Monitoring der morphologischen, ökologischen und naturschutzfachlichen Auswirkungen eines Sedimentfangs vor Wedel an der Tideelbe – Bericht 2009/2010, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, BfG-Bericht 1716

BfG (2012): Monitoring der morphologischen, ökologischen und naturschutzfachlichen Auswirkungen eines Sedimentfangs vor Wedel an der Tideelbe – Abschlussbericht, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, BfG-Bericht 1757

BfG (2014): Sedimentmanagement Tideelbe – Strategien und Potenziale – Systemstudie II. Ökologische Auswirkungen der Unterbringung von Feinmaterial. Band 1 (2). Endbericht. Im Auftrag des Wasser- und Schifffahrtsamtes Hamburg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, BfG-1763. DOI: 10.5675/BfG-1763

BfG (2015): Entwicklung eines numerischen Modellclusters für Tidegewässer als Grundlage für Ästuarmanagement, Projektabschlussbericht, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, in Bearbeitung

Bülow K., Ganske A., Hüttl-Kabus S., Klein S., Klein H., Löwe P., Möller J., Schade N., Tinz B., Heinrich H., Rosenhagen G. (2014): Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse von Klimawandelszenarien für die Nordseeregion. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.01. KLIWAS-31/2014. DOI: 10.5675/Kliwas\_31/2014\_2.01

Deltaris (2012): Mud dynamics in the Ems-Dollart, research phase 2 – analysing existing data, project 1205711-001

FI Institut (2013): KLIWAS PJ 3.03, Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den Sedimenthaushalt der Nordseeästuarie – Abschlussbericht, Franzius Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen, Leibnitz Universität Hannover, Bericht-Nr. 741

Frings, R. M., Gehres, N., De Jong, K., Beckhausen, C., Schüttrumpf, H. & Vollmer, S. (2012): Rheno BT User Manual. Aachen: Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft.

Gehres N., Winterscheid A., Frings R.M. & Vollmer S. (2013): Bed form dynamics in relation to headwater discharge and human influences in the tidal Elbe river, Germany. In Proceedings of Marine and River Dune Dynamics – MARID IV, Bruges, Belgium

Gehres N., Winterscheid A., Hein B., Schöl A & Hein H. (2014). Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen (klimatischen) Einflussfaktoren und der Schwebstoffdynamik im Längsverlauf der Tideelbe, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, interner Arbeitsbericht

GKSS (2007): Sedimenttransportgeschehen in der tidebeeinflussten Elbe, der Deutschen Bucht und in der Nordsee, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 2007/20

Kappenberg J., Grabemann I. (2001): Variability of the Mixing Zones and Estuarine Turbidity Maxima in the Elbe and Weser Estuaries, in Estuaries, Vol.24, No. 5, p 699-706

Kleisinger, C., Burger, B., Grope, N., Schubert, B. (2014): Klimabedingt verändertes Transportverhalten schadstoffbelasteter Sedimente und Unterhaltung von Wasserstraßen in Nordsee-Ästuaren. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.06. KLIWAS-40/2014.

DOI: 10.5675/Kliwas\_40/2014\_3.06

Kösters F., Putzar B., Milbradt P. & Plüß A.(2014): Aufbau eines morphodynamischen Simulationsmodells für die Deutsche Bucht zur Abschätzung von Sedimenttransportwegen und –mengen, In: Tagungsband zum 16. Gewässermorphologischen Kolloquium der Bundesanstalt für Gewässerkunde, 6./7. November 2013, Bremerhaven.

Nasner H. (1974): Über das Verhalten von Transportkörpern im Tidegebiet. Mitteilungen des Franzius Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der technischen Universität Hannover, Heft 40

Schöl A., Hein H. & Vollmer S. (2011): Entwicklung eines numerischen Modellclusters für Tidegewässer als Grundlage für ein Ästuarmanagement und zur Vorhersage der Langfristentwicklung unter Klimawandel – Kurztitel: Modellcluster Tidegewässer, Projektantrag zur Titelgruppe 05 „Forschung und Entwicklung der Bundeswasserstraßen“, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Seiffert, R., Hesser, F., Büscher, A., Fricke, B., Holzwarth, I., Rudolph, E., Sehili, A., Seiß, G., Winkel, N. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuarie. Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02. KLIWAS-36/2014. DOI: 10.5675/Kliwas\_36/2014\_3.02

Spingat, F.M. (1997): Analyse der Schwebstoffdynamik in der Trübungszone eines Tideflusses, Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Mitteilung, Heft 139

Svenson, C., Winterscheid A. & Gehres N., (2011): A high resolution optical backscatter survey in the Lower Elbe River – deductions for near-bed suspended sediment transport in a meso tidal environment. Journal of Coastal Research, SI 64 (Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Coastal Symposium), Szczecoin, Poland, ISSN 0749-0208

Strömich, S. (2011): Messprogramme zur Erfassung des Schwebstoffgehaltes in der Tideelbe – eine aktuelle Übersicht. Bachelor-Arbeit im Major Ingenieurwissenschaften Bau-Wasser-Boden, Leuphana Universität Lüneburg, Wasser-und Bodenmanagement

Van der Mark, C.F. & Blom, A., 2007. A new and widely applicable tool for determining the geometric properties of bedforms. CE&M research report 2007R-003/WEM-002, Universiteit Twente

Wesseling, C. & Wilbers, A.W.E., 2000. Handleiding DT2D versie 2.3: software voor dune-tracking in twee dimensies. Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht, Utrecht.

Winterscheid A. (2012): Sedimentationsdynamik in einem Sedimentfangvor Wedel an der Tideelbe, in Konferenzband zum 14. Gewässermorphologischen Kolloquium, Bundesanstalt für Gewässerkunde, 09./10. November 2011, Koblenz

Winterscheid A., Ohle N. & Entelmann I. (2014): Implications of Freshwater Discharge on Estuarine Sediment Dynamics. In: Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Hydroscience & Engineering, Hamburg, ISBN 978-3-939230-32-8

WSA Hamburg (2013): Morphologische Strukturen im Fahrrinnenbereich der Tideelbe – Ein Beitrag zum Reviersteckbrief Tideelbe, Gewässerkundlicher Bericht, Az. 2-231.2 El/107, Sachbereich 2 / Gewässerkunde

Zhang, Y. & Baptista, A. (2008). SELFIE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modelling*, 21(3-4):71-96

Zorndt A. (2014) Impacts of Climate Change on Hydrodynamic Conditions and Salinity of the Weser Estuary, Dissertation, Franzius-Institut für Wasserbau, Universität Hannover. Eingereicht

Zorndt A., Wurpts A. & Schlurmann T. (2011). The influence of hydrodynamic boundary conditions on characteristics, migration, and associated sand transport of sand dunes in a tidal environment. A long term study of the Elbe estuary. *Ocean Dynamics*.  
DOI 10.1007/s10236-011-0452-1

## 10 Abkürzungen

Einfluss von  
klimabedingten  
Änderungen auf  
den Sediment-  
haushalt der  
Nordsee-Ästuar

TRI - Transportrichtungsindikator

FI – Franzius Institut der Leibnitz Universität Hannover



## Anhang

Das BMVBS / die WSV erhalten keinen Ausdruck der Anlagen, sondern die Zugriffsmöglichkeiten auf die digitalen Versionen über [www.kliwas.de](http://www.kliwas.de) bzw. über den BSCW-Server. Anzahl und Umfang der Anlagen liegen im Ermessen der Projektleiter / Behörde.



**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)**

Kußmaulstraße 17  
76187 Karlsruhe

[www.baw.de](http://www.baw.de)  
[info@baw.de](mailto:info@baw.de)

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

Bernhard-Nocht-Straße 78  
20359 Hamburg

[www.bsh.de](http://www.bsh.de)  
[posteingang@bsh.de](mailto:posteingang@bsh.de)



**BUNDESAMT FÜR  
SEESCHIFFFAHRT  
UND  
HYDROGRAPHIE**



**Deutscher Wetterdienst (DWD)**

Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach/Main

[www.dwd.de](http://www.dwd.de)  
[info@dwd.de](mailto:info@dwd.de)

**Bundesanstalt für  
Gewässerkunde (BfG)**

Am Mainzer Tor 1  
56068 Koblenz

[www.bafg.de](http://www.bafg.de)  
[posteingang@bafg.de](mailto: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](mailto:kliwas@bafg.de)  
Internet: <http://www.kliwas.de>

**Redaktion:** KLIWAS-Koordination  
Bundesanstalt für Gewässerkunde

**Autoren:** Axel Winterscheid, Nicole Gehres,  
Nathalie Cron

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

**Druck:** Bundesanstalt für Gewässerkunde

**DOI:** 10.5675/Kliwas\_37/2014\_3.03