

**KLIWAS Schriftenreihe  
KLIWAS-24/2014**

**Schlussbericht  
KLIWAS-Projekt 3.09**

**Klimabedingte Änderung der  
Vorlandvegetation und ihrer Funktionen  
in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen  
für die Unterhaltung**

Koblenz, im Dezember 2014







Foto: Maike Heuner

# KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-24/2014

Schlussbericht  
KLIWAS-Projekt 3.09

Klimabedingte Änderung der  
Vorlandvegetation und ihrer Funktionen  
in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen  
für die Unterhaltung

## Autoren:

Eva-Maria Bauer, Maike Heuner,  
Elmar Fuchs, Uwe Schröder, Andreas  
Sundermeier, Anke Bahls, Tim Bildstein,  
Jana Carus, Ulrike Faude, Kai Jensen,  
Christoph Kinkeldey, Birgit Kleinschmit,  
Katharina Kleiß, Dietmar Kraft, Jürgen  
Meyerdirks, Anna Roeder, Jochen  
Schiewe, Sebastian Schmidlein,  
Wiebke Schoenberg, Boris Schröder,  
Bastian Schuchardt, Alexandra Silinski,  
Stefan Wittig

### Zitiervorschlag:

BAUER, E.-M., HEUNER, M., BAHLS, A., BILDSTEIN, T., CARUS, J., FAUDE, U., FUCHS, E., JENSEN, K., KINKELDEY, C., KLEINSCHMIT, B., KLEIß, K., KÖHLER, U., KRAFT, D., MEYERDIRKS, J., ROEDER, A., SCHIEWE, J., SCHMIDTLEIN, S., SCHOENBERG, W., SCHRÖDER, B., SCHRÖDER, H.-H., SCHRÖDER, U., SCHUCHARDT, B., SILINSKI, A., SUNDERMEIER, A., WITTIG, S. (2014): Klimabedingte Änderung der Vorlandvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.09. KLIWAS-24/2014. BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_24/2014\_3.09  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_24\\_2014\\_3.09.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_24_2014_3.09.pdf)

Seite

Kapitel

## Inhaltsverzeichnis

<b>03</b>		<b>KURZFASSUNG</b>
<b>06</b>	<b>1</b>	<b>HINTERGRUND UND STAND DER FORSCHUNG</b>
<b>10</b>	<b>2</b>	<b>ÜBERGEORDNETE HYPOTHESE UND PROJEKTZIEL</b>
<b>11</b>	<b>3</b>	<b>FRAGESTELLUNGEN, METHODEN UND WESENTLICHE ERGEBNISSE ZUM STATUS QUO</b>
<b>12</b>	<b>3.1</b>	<b>EINFLUSS DER FLUSS- UND SCHIFFSINDUZIERTEN HYDRODYNAMIK AUF DIE RÖHRICHTHABITATE UND IHRE GRENZEN</b>
<b>13</b>	<b>3.2</b>	<b>ZWEI PIONIERRÖHRICHTEN IM FOKUS VON WELLENBELASTUNG UND WELLENREDUKTIONSLEISTUNG</b>
<b>15</b>	<b>3.3</b>	<b>DIE PFLANZENEIGENSCHAFTEN VON PIONIERRÖHRICHTEN</b>
<b>16</b>	<b>3.4</b>	<b>DIE LEBENSPHASEN DER MEER-STRANDSIMSE UND IHRE ÜBERLEBENSSTRATEGIEN</b>
<b>17</b>	<b>3.5</b>	<b>WACHSTUM UND AUSBREITUNG VON RÖHRICHTEN UND IHRE EINFLUSSFAKTOREN</b>
<b>19</b>	<b>3.6</b>	<b>AUSWIRKUNGEN VON STÖRUNGEN AUF DAS TIDERÖHRICHT</b>
<b>20</b>	<b>3.7</b>	<b>AUSWIRKUNGEN DER WINTERLICHEN SCHILFMAHD AUF DAS TIDERÖHRICHT</b>
<b>21</b>	<b>3.8</b>	<b>ÜBERFLUTUNGSTOLERANZ VON RÖHRICHT- UND NEOPHYTENARTEN</b>
<b>22</b>	<b>3.9</b>	<b>HABITATPRÄFERENZEN WESENTLICHER RÖHRICHTARTEN</b>
<b>22</b>	<b>3.10</b>	<b>QUERSCHNITTAUFGABE FERNERKUNDUNG</b>
<b>26</b>	<b>4</b>	<b>ERWARTETE KLIMABEDINGTE ÄNDERUNGEN UND BETROFFENHEIT DER WASSER- UND SCHIFFFAHRTS-VERWALTUNG SOWIE WEITERER STAKEHOLDER</b>
<b>26</b>	<b>4.1</b>	<b>ÄNDERUNG DER POTENZIELLEN RÖHRICHTHABITATE</b>
<b>27</b>	<b>4.2</b>	<b>ÄNDERUNG VON STÖRUNGSFAKTOREN UND STÖRUNGSMUSTERN</b>
<b>28</b>	<b>4.3</b>	<b>ÄNDERUNG VON LANDNUTZUNG UND BIOTOPTYPEN</b>

<b>Seite</b>	<b>Kapitel</b>	
<b>31</b>	<b>5</b>	<b>KERNAUSSAGEN ZU DEN ANPASSUNGS- UND MONITORINGOPTIONEN FÜR DIE WASSER- UND SCHIFFFAHRTSVERWALTUNG UND WEITERE STAKEHOLDER</b>
<b>31</b>	<b>5.1</b>	<b>NUTZUNGS- UND UNTERHALTUNGSOPTIONEN IM VORLAND ZUR OPTIMIERUNG DER EROSIONSSCHUTZ- UND NATURSCHUTZFUNKTION</b>
<b>32</b>	<b>5.2</b>	<b>EINSATZ DER UFERVEGETATION FÜR DEN VORLANDSCHUTZ</b>
<b>32</b>	<b>5.3</b>	<b>SCHILFMAHD IM WESERÄSTUAR</b>
<b>33</b>	<b>5.4</b>	<b>MONITORINGBEDARF UND -OPTIONEN</b>
<b>34</b>	<b>6</b>	<b>EINORDNUNG DER ERGEBNISSE IN DEN STAND DES WISSENS UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF</b>
<b>36</b>	<b>7</b>	<b>DANKSAGUNG</b>
<b>37</b>	<b>8</b>	<b>LITERATUR</b>
<b>47</b>	<b>9</b>	<b>ABKÜRZUNGEN</b>
<b>48</b>		<b>ANHANG</b>

## Beteiligte Kooperationspartner



Tim Bildstein, Dr. Bastian Schuchardt, Stefan Wittig  
Bioconsult Schuchardt & Scholle GbR, Fachbüro für Umweltplanung,  
Gewässerkunde und Umweltforschung, Bremen



Michael Frank  
Galileo Group Inc. Applied Hyperspectral Imaging,  
Melbourne, Florida



Christoph Kinkeldey, Prof. Dr Jochen Schiewe  
HafenCity Universität Hamburg, Geomatik



Hans-Hermann-Schröder  
KÜFOG GmbH, Fachbüro für Landschaftsökologische  
und biologische Studien, Loxstedt-Ueterlande



Hans-Peter Dauck, Nicole Janinhoff, Dr. Jörg Petersen  
natur-consult, Fachbüro für Vegetationsökologie,  
Naturschutz-Management, GIS, Hydrogeologie  
und Naturfotografie, Hildesheim



Dr. Tjeerd Bouma  
Royal Netherlands Institute for Sea Research  
(NIOZ, ehemaliges NIO-OCEME), Yerseke



Universiteit  
Antwerpen

Alexandra Silinski, Prof. Dr. Patrick Meire,  
Dr. Jonas Schoelynck, Prof. Dr. Stijn Temmerman  
University of Antwerp, Department of Biology



Ulrike Faude, Prof. Dr. Sebastian Schmidlein, Nele Steinmetz  
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn,  
Geographisches Institut;  
Karlsruher Institut für Technologie,  
Institut für Geographie und Geoökologie



Sieglien De Roo, Prof. Dr.-Ir. Peter Troch,  
Herman van der Elst, Tom Versluys  
Ghent University, Department of Civil Engineering



Universität Hamburg

Prof. Dr. Kai Jensen, Katharina Kleiß, Anna Roeder,  
Wiebke Schoenberg  
Universität Hamburg, Biozentrum Klein Flottbek



Dr. Dietmar Kraft, Dr. Jürgen Meyerdirks  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg,  
Institut für Chemie und Biologie des Meeres



Jana Carus, Prof. Dr. Boris Schröder  
Universität Potsdam, Institut für Geoökologie;  
Technische Universität München, Forschungsdepartment  
Ökologie und Ökosystemmanagement;  
Technische Universität Braunschweig, Institut für Geoökologie



Anke Bahls, Prof. Dr. Birgit Kleinschmit  
TU Berlin, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung



Andreas Kempe, Dr. Thea Lautenschläger,  
Prof. Dr. Christoph Neinhuis  
TU Dresden, Institut für Botanik



## Kurzfassung

Das KLIWAS-Projekt „Ästuarvegetation und Vorlandschutz“ hatte seinen Fokus auf der Analyse der Vegetation mit ihren Uferschutz- und Lebensraumfunktionen und deren mögliche Veränderungen im Klimawandel.

Dafür wurden verschiedene Skalenebenen von der Molekülebene bis zur Ökosystemebene des Ästuars genutzt. Es wurden Versuche zu den Wirkungen von Wellen auf Röhricht, zum Zusammenhang zwischen Inhaltsstoffen und biomechanischer Belastbarkeit von Pflanzen sowie zu ihrer Überflutungstoleranz durchgeführt, Vegetationsmodelle erstellt, die Landnutzung analysiert, Schilfmahdauswirkungen geprüft, das Störungsregime in Röhrichtgürteln analysiert und unterschiedliche innovative Fernerkundungsmethoden zur Erfassung von Vegetationseinheiten eingesetzt. Die Ergebnisse liefern neue Erkenntnisse zur Ökologie und Erfassung der Vorlandvegetation und erklären Zusammenhänge zwischen der Etablierung und Zonierung verschiedener Röhrichtarten:

- Die Meer-Strandsimse weist eine höhere Widerstandskraft gegenüber Wellen auf als die Salz-Teichsimse. Durch den stärkeren Widerstand besitzt der Stängel nach wiederholten Wellenereignissen eine stärkere Neigung (höherer Biegewinkel). Die höhere Flexibilität der Teichsimse spiegelt sich in ihrem 2,5-fach geringeren (hier gemessenen) Ligningehalt wider.
- Die Röhrichtarten an der Weser siedeln signifikant tiefer als an der Elbe und können viel näher an der Fahrrinnenachse wachsen. Eine ausgeprägte Zonierung der Röhrichtarten findet sich ausschließlich an stärker hydrodynamisch belasteten Elbe-Prallhängen, welches durch die Flexibilitätsunterschiede der Röhrichtarten erklärt wird.
- Die unterirdische Biomasse von Meer-Strandsimse und Schilf übersteigt i. d. R. ihre oberirdische Biomasse und nimmt landeinwärts zu. Das lässt schlussfolgern, dass Rhizome und Wurzeln einen erheblichen Anteil am Erosionsschutz haben.
- Die Untersuchungsergebnisse zur Schilfmahd im Tideröhricht sind konträr zu Ergebnissen von Binnenseen. Demnach bringt winterliche Schilfmahd im Tideröhricht aus rein botanischer Sicht mehr Vorteile als Nachteile für Erosionsschutz und Naturschutz mit sich.
- Sensoren mit höherer spektraler Auflösung jedoch geringerer räumlicher Auflösung bis zu ca. 5 m Rastergröße bieten eine geeignete Erfassungsalternative zu herkömmlichen flugzeuggestützten Multispektralsensoren. Die satellitengestützte Erfassung ist kosten- und zeiteffizienter, wenn diese auf Ebene der Haupteinheiten von Biotoptypen mit einem entspre-

chend realisierbaren Maßstab (ca. 1:10.000-1:25.000) für die jeweilige Fragestellung ausreicht. Eine Dokumentation von Datenunsicherheiten führt zu einer Verbesserung der Nutzbarkeit von Fernerkundungsdaten.

Diese Erkenntnisse sind wertvoll, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Ästuarvegetation besser erkennen und auf sie reagieren zu können. Der Klimawandel beeinflusst die Vorlandvegetation von Elbe- und Weserästuar direkt durch Veränderung von Standortfaktoren und indirekt durch Nutzungsanpassungen. Direkte Auswirkungen für die Vegetation zeigen folgende Einflussgrößen:

- Der **ansteigende Meeresspiegel** und daraus folgend das **ansteigende mittlere Tidehochwasser (MThw)** führen zu keiner Veränderung der Röhrlichtzonierung, solange das Vorland bei ausreichender Sedimentverfügbarkeit und Sedimentationsgeschwindigkeit adäquat mitwächst; andernfalls werden Biotop- und Röhrlichttypen durch überflutungstolerantere Typen ersetzt. Entsprechende Nutzungsextensivierungen oder -aufgaben führen zu neuen Röhrlichtflächen.
- Das ansteigende MThw bedingt eine **erhöhte Flutstromgeschwindigkeit**, die das Risiko der Ufererosion steigen lässt. In diesem Zusammenhang kann es zu Verlusten von ufernahen Röhrlichtflächen kommen.
- Der zukünftig projizierte **Seegang** weist eine **Zunahme der Wellenhöhen** auf, die vermehrt zu offenen Bodenstellen am Ufer führen kann. Das lässt eine Förderung von Pioniervegetation erwarten. Davon können auch invasive Neophyten profitieren.
- Die **zunehmenden Luft- und Wassertemperaturen** führen zu einem Rückgang von Eisereignissen. Das Abrasieren der Vegetation durch Eis findet daher seltener statt und verringert dadurch die Störstellen.
- Durch die **erhöhten Sturmflut-Scheitelwasserstände** lagert sich wahrscheinlich häufiger das Treibsel am Deich ab. Dadurch verringert sich die Menge des in Ufernähe abgelagerten Treibsel, so dass weniger Störstellen entstehen.
- Da **keine signifikante Zunahme der Sturmfluthäufigkeit** erwartet wird, verändert sich die Gefahr der Ufererosion hinsichtlich dieser Einflussgröße nicht.

Es konnte gezeigt werden, dass die zwei zentralen Funktionen des Tideröhrlichts, Uferschutz- und Lebensraumfunktion, durch die Auswirkungen des Klimawandels je nach Einflussgröße unverändert bleiben oder stärker beansprucht werden. Die genannten Zusammenhänge liefern einen wesentlichen Beitrag für das zukünftige integrative Management von Ufern und Vorlän-

dern, in dem sowohl naturschutzfachliche Zielvorstellungen als auch die Anpassung an den Klimawandel Berücksichtigung finden müssen.

Klimabedingte  
Änderung der  
Vorlandvegetation  
und ihrer Funktionen  
in Ästuaren  
sowie Anpassungsoptionen  
für die Unterhaltung

Folgende **Handlungsoptionen** für das Management der Ästuare von Elbe und Weser werden auf der Basis der Projektergebnisse vorgeschlagen: Die naturraumtypische Ästuardynamik sollte dort, wo es hydraulisch möglich ist, zugelassen werden. Denn es wurde gezeigt, dass intakte Röhrichte bei geeigneten Habitatbedingungen einen effektiven Schutz der Ufer auf natürlicher Grundlage liefern können. Zusammen mit den Anforderungen aus FFH-Richtlinie und WRRL kann somit an geeigneten Uferbereichen ein Uferrückbau technisch gesicherter Ufer empfohlen werden. Die notwendige Ufersicherung kann in solchen Abschnitten von der Vegetation übernommen werden. Für die Etablierung von Röhrichten an den Ufern sind an der Weser mindestens 150 m und an der Elbe mindestens 450 m Distanz zur Fahrrinnenachse notwendig. Röhrichte können durch Verminderung der Wellenbelastung Uferbereiche schützen. Wo ihre Belastungsgrenze überschritten ist und in besonders schmalen Uferstreifen sollte eine Kombination aus technischer und biologischer Ufersicherung angestrebt werden.

Die Landnutzung der Vorländer sollte im Sinne von Erosionsschutz und Lebensraumschutz optimiert werden: So können Flächen insbesondere an der Tideelbe (km 651-668) durch Extensivierung der Landnutzung naturschutzfachlich aufgewertet werden. Durch das Management kann die Extensivierung koordiniert erfolgen mit dem Vorteil einer genaueren Planung und Ertragsabschätzung für die Landwirtschaft. Ohne ein Management übernimmt die Aufgabe automatisch das ansteigende MThw. Grundsätzlich sollte auf bisher bewirtschafteten Flächen, die an den Fluss angrenzen, aus Uferschutzgründen ein wasserseitiger Randstreifen aus der Nutzung genommen werden. Dies gilt insbesondere für Rinderweiden an der Elbe und Schilfmahdflächen an der Weser.

Dieses Projekt zeigt, dass eine natürliche Toleranz der Ufervegetation gegenüber den projizierten Auswirkungen des Klimawandels und seinen Veränderungen existiert. Die wasserwirtschaftliche und verkehrliche Unterhaltung im Sinne des Uferschutzes können mit den oben genannten Maßnahmen gezielt naturschutzbezogen umgesetzt werden. Dadurch wird die Uferschutzfunktion frühzeitig im erforderlichen Umfang gestärkt.

# 1 Hintergrund und Stand der Forschung

Die Ästuarvegetation erfüllt wichtige Funktionen für Mensch und Naturhaushalt: So bildet sie einen natürlichen Schutz vor Ufererosion, ist Lebensraum für gefährdete und geschützte Tier- und Pflanzenarten, wird landwirtschaftlich genutzt, dient der Erholung, trägt zur Selbstreinigung des Fließgewässers bei und ist seit alters her Lieferant von Reet und Binsen, um nur einige Beispiele zu nennen.

Die wichtige Lebensraumfunktion der Ufervegetation muss von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) berücksichtigt werden, da fast 100 % der Ästuar- mit ihren Vorländern von Elbe und Weser unter Naturschutz stehen und die WSV seit einigen Jahren mit der wasserwirtschaftlichen Unterhaltung bundesweit in der Pflicht steht, die Bewirtschaftungsziele gemäß WRRL zu beachten (§ 39 WHG und § 8 WStrG) und somit die Ufervegetation möglichst standortgerecht zu entwickeln. Damit erlangen intakte und naturnahe Ufer in ihrer Uferschutzfunktion eine neue Betrachtung seitens der WSV.

Der Klimawandel verschiebt die meteorologischen, ozeanographischen und hydrologischen Randbedingungen und hat damit vermutlich auch Auswirkungen auf die Vegetation und ihre Funktionen. Die Analyse ökologischer Eigenschaften und Funktionen von Flussauen im Binnenland ist seit mehreren Dekaden ein Schwerpunkt ökosystemarer Prozessstudien (Scholz et al. 2005). Die Untersuchung von Ökosystemen der Vorländer von Ästuaren dagegen wurde in der Vergangenheit weniger intensiv betrieben. Oftmals sind nur einzelne ökosystemare Teilprozesse und Funktionen betrachtet worden (z. B. Vegetation, Hydrologie, Boden; Gröngröft & Schwarz 1999, Duve 1999).

Wichtige Forschungsgruppen, die sich mit **Ökosystemfunktionen** und der **nachhaltigen Bewirtschaftung** von tidebeeinflussten Vorländern, und das teilweise vor dem Hintergrund der **Klimafolgenforschung** beschäftigen, sind:

Die Arbeitsgruppe von Patrick Meire und Stijn Temmerman an der Universität Antwerpen (Ecosystem Management Research Group) untersuchen die Interaktionen zwischen Pflanzenausbreitung, Fließdynamik, Sedimenttransport und Geomorphologie (z. B. Temmerman et al. 2004, Bouma et al. 2005, Vandenbruwaene et al. 2011, Wang & Temmerman 2013) sowie Ökosystemdienstleistungen und haben auf dieser Basis sowie den Vorgaben der EG-Wasserrahmenrichtlinie ein integriertes Vorlandmanagement entwickelt (Meire et al. 2007, Temmerman et al 2013).

Die Arbeitsgruppe „Aquatische Ökologie“ um Michael Schirmer und Bastian Schuchardt hat sich an der Universität Bremen im Rahmen von BMBF-

Projekten besonders mit der Klimafolgenforschung für Landschaft, Gewässer und Gesellschaft im Bereich der Wesermündung und der Nordseeküste beschäftigt (Schirmer & Schuchardt 1999, Schuchardt et al. 2007, Schuchardt 1997, Kraft 2004, Meyerdirks 2008, Osterkamp et al. 2001, Osterkamp 2006, Schuchardt & Schirmer 2004, 2007).

Der Arbeitskreis um Kai Jensen am Biozentrum Klein Flottbek der Universität Hamburg untersucht u. a. Standortbedingungen, Diversität, Produktivität, Struktur und Dynamik der Vegetation der tidebeeinflussten Elbmarschen (Jensen & Suchrow 2010, Engels & Jensen, 2009, 2010).

Die Erforschung der klimatisch bedingten Veränderung von Ökosystemdienstleistungen wird im 7. Rahmenprogramm der EU als der Forschungsbedarf der letzten Jahre angesehen. Dies spiegelt sich auch in der BMBF-Förderung „Nachhaltiges Landmanagement“ wider. Das 5-jährige BMBF-Projekt KLIMZUG Nord für die Metropolregion Hamburg hat gleichzeitig mit KLIWAS ähnliche Fragestellungen auf regionaler Ebene bearbeitet. Hier ist die Abteilung Pflanzenökologie und Nutzpflanzenbiologie neben anderen Abteilungen der Universität Hamburg, der Technischen Universität Hamburg-Harburg, der HafenCity Universität Hamburg und der Lübecker Universität Projektpartner. Das Besondere dieses regionalen Klimaprojektes ist der integrative Ansatz, der alle bedeutenden Handlungs- und Entscheidungsträger einbindet.

In den letzten beiden Jahrzehnten nimmt die Zahl der Forschungsarbeiten zu, welche die Zusammenhänge zwischen **Klima und Biodiversität** bzw. dem **Vorkommen von Pflanzenarten** untersuchen. Relevante Forschungsprojekte sind ALARM (Assessing Large Scale Environmental Risks with tested Methods), ein von der EU gefördertes Projekt, in dem die Risiken für die Biodiversität sowie für terrestrische und aquatische Ökosysteme auch im Hinblick auf den Klimawandel untersucht werden (Araújo & Rahbek 2006) sowie MACIS (Minimisation of and Adaptation to Climate change Impacts on Biodiversity), ebenfalls durch die EU gefördert. Hier werden Strategien zur Abminderung der Folgen des Klimawandels erarbeitet (Kühn et al. 2008).

Neben klimasensitiven Arten im Allgemeinen stehen auch speziell **invasive Neophyten** im Fokus der Forschung, z. B. in dem F+E-Projekt „Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora“ (Pompe et al. 2011), in dem BIOLOG-Projekt "Global change-abhängige Neophytenausbreitung und Ökosystemveränderungen in Stromtalauen, untersucht im Niederrhein-Bereich" (Lösch et al. 2007, Schmitz et al. 2008) und in der Arbeit von Berger & Walther 2007. Im Übereinkommen über die Biologische Vielfalt (CBD) werden erstmals Vorsorge, Kontrolle und Bekämpfung invasiver Arten zum Schutz der einheimischen Tier- und Pflanzenwelt völkerrechtlich festgeschrieben (§ 8h) (BMU 2007). Von Deutschland wird unter Federfüh-

rung des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) eine nationale und von der EU im Rahmen der Berner Konvention eine europaweite Strategie zur Umsetzung des § 8h erarbeitet. Auf EU-Ebene wurde im Projekt DAISIE (Delivering Alien Invasive Species Inventories for Europe) eine europaweite Inventur des Vorkommens von Neobiota vorgenommen (DAISIE 2009). Für Deutschland sind ein Themenheft (BfN 2008) sowie das Internetportal „NeoFlora“ des BfN, letzteres entstanden im F+E-Vorhaben „Internet-Handbuch zum Erkennen und Bekämpfen invasiver Pflanzenarten“, zu nennen (<http://www.floraweb.de/neoflora/>).

Der folgende Abschnitt zum Stand der Wissenschaft und Technik für **Habitatignungsmodelle** bzw. Lebensraumeignungsmodelle behandelt insbesondere statistische Modellierungen. Nach den Vordenkern der statistischen Habitatmodelle, Morrison et al. (1992), haben sich in Deutschland die Arbeitsgruppen um Carsten Dormann/Ingolf Kühn (UFZ Leipzig, CD jetzt Universität Freiburg), Boris Schröder (Universität Potsdam, später TU München, jetzt TU Braunschweig), Michael Kleyer (Universität Oldenburg) und Björn Reineking (UFZ, dann Universität Bayreuth, jetzt Université Grenoble) entwickelt. In der Schweiz sind hier Experten wie Niklas E. Zimmermann (WSL Birmensdorf) und Antoine Guisan (UNIL Lausanne) zu nennen. Sie beschäftigen sich neben den Grundlagen der Habitatmodellierung (Guisan & Zimmermann 2000, Dormann 2007, Schröder & Reineking 2004, Dormann et al. 2004, Hirzel et al. 2006) mit Themen wie der Multikollinearität (Dormann et al. 2013), der Extrapolation (Zurell et al. 2012a) oder der Prozessintegration (Zurell et al. 2012b). Bis Ende 2009 war in der Oldenburger Arbeitsgruppe Landschaftsökologie in einem ähnlichen Landschaftsraum zu dem hier betrachteten das Projekt TREIBSEL (Salt Marsh Management) angesiedelt, in dem statistische Habitatmodelle für charakteristische Vogelarten der niedersächsischen Salzwiesen erstellt wurden (Mayer et al. 2008).

Forschungsarbeiten zu **Störungsökologie und Vegetationsdynamik** sowie **Experimente zu Klimaveränderungen** führen u. a. die Arbeitsgruppen von Anke Jentsch und Carl Beierkuhnlein, Universität Bayreuth/UFZ Leipzig durch (Beierkuhnlein & Jentsch 2013, Jentsch et al. 2012). Ihre Forschungsarbeiten belegen die Wichtigkeit von Störstellen für die Etablierung von Arten in einer bestehenden Pflanzendecke und den Einfluss extremer Witterungsereignisse auf die Phänologie und damit die Reproduktion von Pflanzen. Die Studien wurden allerdings vor allem im trockenen Flügel der europäischen Vegetation durchgeführt und sind nicht auf die Verhältnisse der Ästuarie übertragbar. Zur Störungsökologie *tidebeeinflusster Vegetation* liegen eine Reihe von nordamerikanischen Arbeiten vor (z. B. Valiela & Rietsma 1995; Baldwin & Mendelssohn 1998; Minchinton 2002, Goldman Martone & Wasson 2008). Dagegen existieren bisher nur wenige Studien

zur Störungsökologie der Vegetation *europäischer* Ästuare (van Hulzen et al. 2006).

Im Bereich der **Fernerkundung** sind folgende innovative Studien zu nennen, die sich mit der qualitativen und quantitativen Erfassung der Ästuarvegetation und ihren Veränderungen auseinandergesetzt haben: Gähler et al. 2001; Ehlers et al. 2003; Schröder 2005; Petersen et al. 2010. Diese Arbeiten beruhen auf flugzeuggestützten Multispektralsensoren. Welchen Mehrwert andere Erfassungstechniken leisten wie Hyperspektralsensoren, satellitengestützte Sensoren oder auch multisaisonale Erfassung, sind bisher z. B. mit folgenden Schwerpunkten untersucht worden: Hyperspektraldaten mit ihrer hohen spektralen Auflösung zeigen eine verbesserte Detektion der Artenzusammensetzung von Weideland (z. B. Kawamura et al. 2008) wie auch von Einzelarten z. B. Neophyten (He et al. 2011). Invasive Arten können auch mit satellitengestützten Systemen wie z. B. RapidEye erfassbar werden, jedoch bedarf es hier einer Mindestflächengröße von 200 m<sup>2</sup> (Gärtner et al. 2011). Erfolgversprechende multisaisonale Ansätze in der Verwendung mit RapidEye-Daten liefern Schuster et al. 2012a und Schuster et al. 2012b.

Die Erfassung, Transparenz und Kommunikation von Unsicherheiten in GIS- und Fernerkundungsdaten ist seit mehr als 20 Jahren Teil der Forschung (Goodchild & Gopal 1989). Z. B. kann der Einsatz von Methoden zur interaktiven Visualisierung der Unsicherheiten ihre Kommunikation deutlich verbessern (Schiewe 2010).

Klimabedingte  
Änderung der  
Vorlandvegetation  
und ihrer Funktionen  
in Ästuaren  
sowie Anpassungsoptionen für  
die Unterhaltung

## 2 Übergeordnete Hypothese und Projektziel

Mit dem Klimawandel wird als Folge eines Meeresspiegelanstiegs eine verstärkte Hydrodynamik (z. B. größerer Tidehub, höhere Strömungsgeschwindigkeiten) und in der Folge ein erhöhter hydromechanischer und -dynamischer Druck auf den Lebensraum der Ufer- und Vorlandvegetation erwartet. Insbesondere in den für den Vorlandschutz bedeutsamen Röhrichtbeständen werden quantitative und qualitative Veränderungen erwartet. Fehlen Selbstanpassungsprozesse, können Röhrichte durch Verschmälerung oder Fragmentierung der Röhrichtgürtel als Uferschutz verloren gehen bzw. in ihrer Funktion geschwächt werden. An Störstellen siedeln sich Pionierarten und Hochstauden (u. a. invasive Neophyten) an. Diese besitzen oftmals ein schwächer ausgebildetes Wurzelwerk als Röhrichte. Das hat zur Folge, dass das Vorland mit seinen Bauwerken einer stärkeren Erosionsgefährdung unterliegt. Sicherungsmaßnahmen an Ufern und Deichen werden dann in höherem Maße notwendig sein. Anpassungsstrategien für Unterhaltungsmaßnahmen und Nutzungsformen in Ästuaren sind daher erforderlich. Ziel des Projektes ist es, festzustellen inwieweit sich die Eigenschaften und Funktionen der Vorlandvegetation in den Ästuaren von Elbe und Weser klimabedingt verändern können. Die oben genannte Hypothese soll an den beiden tidebeeinflussten Wasserstraßen Elbe und Weser geprüft werden. Des Weiteren werden Nutzungseinflüsse analysiert. Letztlich werden Anpassungsstrategien und Monitoringoptionen für die Unterhaltung der Ästuar- und ihrer Vorländer abgeleitet, um auch künftig sowohl die Wasserstraße als Verkehrsträger wie auch die Vegetation der Ufer und Vorländer nachhaltig zu sichern. Abb. 2-1 zeigt die Hauptabläufe zur Zielerreichung.

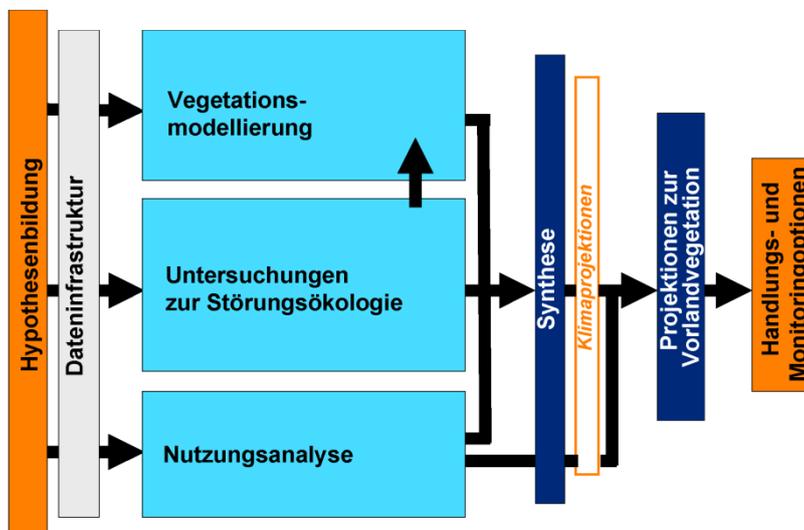


Abb. 2-1: Ablaufplan (ausführlich mit Teilprojekten siehe Anhang)

### 3 Fragestellungen, Methoden und wesentliche Ergebnisse zum Status quo

Klimabedingte Änderung der Vorlandvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung

Im Fokus des Projektes stand die Untersuchung der Ästuarvegetation, mit ihren Habitaten, bestimmten Pflanzeigenschaften sowie charakteristischen Wachstums- und Ausbreitungsstrategien.

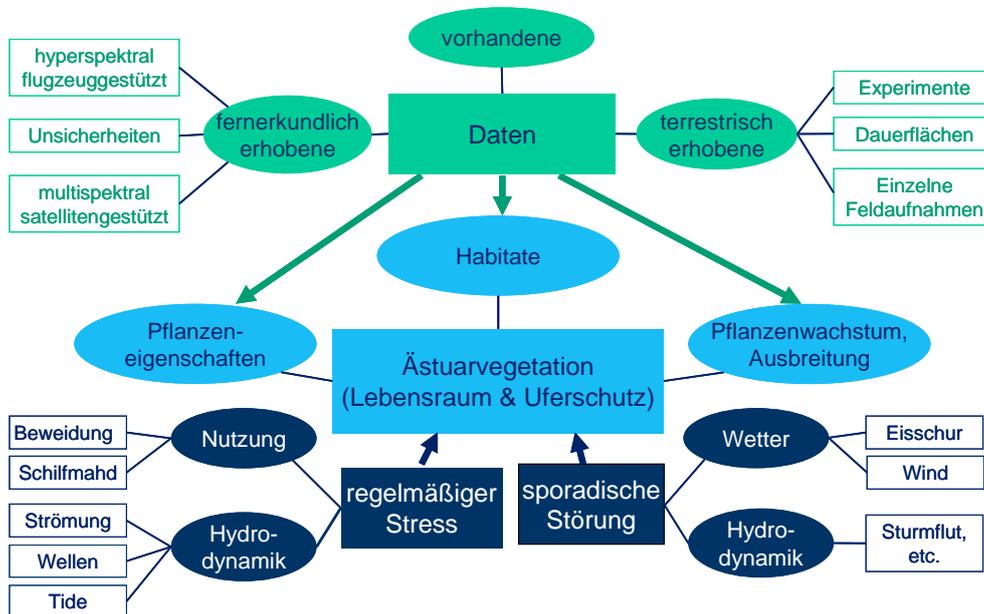


Abb. 3-1: Untersuchte Aspekte, Einflussfaktoren, verwendete Daten und Teilprojekte

In diesem KLIWAS-Projekt wurden Einflussfaktoren untersucht, die wie Landnutzung, Strömung, Wellen oder Tideparameter mehr oder weniger regelmäßig auf die Vegetation einwirken oder wie Eisschur, Sturm und sturmflutbeeinflusste Treibselablagerungen sporadisch Störungen im Röhrichtgürtel verursachen.

Für die Analyse wurden sowohl bereits vorhandene als auch eigens für das Projekt erhobene Daten verwendet. Abb. 3-1 stellt dies schematisch dar. Die schwerpunktmäßig untersuchten Zusammenhänge sowie die von den einzelnen Themenbereichen verwendeten Datentypen sind in jedem der folgenden Unterkapitel am Seitenrand in einer beigefügten verkleinerten Version von Abb. 3-1 orange markiert.

In den im Folgenden vorgestellten Themenbereichen wurden Untersuchungen auf Skalenebenen zwischen Laborexperiment und Ästuar durchgeführt. Versuche zu den Auswirkungen von Wellen (Kapitel 3.2 und 3.4), zum Zusammenhang zwischen Pflanzenstoffen und biomechanischer Belastbarkeit (Kapitel 3.3) sowie Untersuchungen zu Überflutungstoleranzen (Kapitel 3.8) und zur Geländehöhe (Kapitel 3.1, Kapitel 3.9) erklären Zusammenhänge bzgl. der Etablierung und Zonierung verschiedener Röhrichtarten. Auch die Überflutungstoleranz zweier Neophyten wurde geprüft (Kapi-

tel 3.8). Vegetationsmodelle wurden erstellt, einerseits lokal für einzelne Uferabschnitte unter Berücksichtigung von Biomassezuwachs und Wuchsform (Kapitel 3.5), andererseits bezogen auf die Röhrichtvorkommen ganzer Ästuare (Kapitel 4.1). Für beide Ästuare wurden, basierend auf vorhandenen Biotoptypenkarten, die aktuelle sowie eine mögliche zukünftige Landnutzung analysiert (Kapitel 4.3). Als Beispiel für eine traditionelle Nutzungsweise wurden die Auswirkungen der winterlichen Schilfmahd untersucht (Kapitel 3.7). Mit Hilfe von Dauerflächen wurde im Elbeästuar ermittelt, wie Störungsmuster und Röhrichtentwicklung zusammenhängen (Kapitel 3.6) und sich verändern können (Kapitel 4.2). Es wurden unterschiedliche Fernerkundungsmethoden eingesetzt und in ihrer Anwendbarkeit für Flächenkartierungen sowie für das Monitoring von Vegetations- und Störungstypen getestet (Kapitel 3.10). Schließlich wurden modellbedingte Unsicherheiten erfasst und visualisiert, um die Zuverlässigkeit von Modellierungsergebnissen zu ermitteln und zu kommunizieren (Kapitel 3.10). Diese zahlreichen Analysen waren dienlich, um Aussagen über die erwarteten klimabedingten Änderungen und Betroffenheit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung sowie weiterer Stakeholder zu treffen (Kapitel 4).

### **3.1 Einfluss der fluss- und schiffsinduzierten Hydrodynamik auf die Röhrichthabitats und ihre Grenzen**

Die Geländehöhe relativ zu einem Bezugswasserstand ist ein bedeutender Standortfaktor, der die Vegetationszonierung auf Watt- bzw. Marschflächen erklärt (Coops et al 1999, Suchrow & Jensen 2010). Er ist ein Ersatzparameter, der die Stärke der Hydrodynamik repräsentiert. Er ist insbesondere dann hilfreich, wenn flächendeckende Aussagen getroffen werden müssen. Da erwartet wird, dass sich die Hydrodynamik (z. B. Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten) der Ästuare Elbe und Weser klimabedingt ändern wird, wurde untersucht, inwieweit die Hydrodynamik die Höhe, auf der die Röhrichte wachsen (gemessen als Höhe zum mittleren Tidehochwasser), beeinflusst.

Dazu wurde ein geographisches Informationssystem für die Haupt- und Nebenarme von Elbe und Weser mit folgenden Dateninhalten aufgebaut: Die Verbreitung der Vegetationseinheiten, die aus Luftbilddaten (Elbe 2010, Weser 2008) klassifiziert wurden (Petersen et al. 2010), die Höhe zum Mittleren Tidehochwasser als Differenz zwischen den Geländehöhen (Elbe DGM 2010, Weser LIDAR 2009) und dem Mittleren Tidehochwasser (2001-2010 mit INFORM 3-Tide 2 interpoliert), die Distanz zur Fahrinnenachse als schiffsinduzierte Hydrodynamik (Schiffswellen und die daraus resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten) für den Hauptstrom von Weser und Elbe und die Klassifizierung in Prall-, Gleithängen und gerader Verlauf (abgeleitet aus dem Vergleich von Querprofilflächen entlang der Ge-

wässerachse, größere Querprofilfläche entspricht einem Prallhang) als flussinduzierte Hydrodynamik. Aus diesen Datensätzen wurden zufällig ausgewählte Datenpunkte innerhalb der Vegetation und entlang der Watt-Vegetationsgrenze für die Dominanzbestände Salz-Teichsimse (*Schoenoplectus tabernaemontani*, St), Meer-Strandsimse (*Bolboschoenus maritimus*, Bm) und Schilf (*Phragmites australis*, Pa) extrahiert. Wegen stark anthropogen veränderter Hydromechanik wurden die massiv verbauten Ufer aus den Datensätzen entfernt. Für die statistische Auswertung (ANOVA) standen insgesamt folgende Anzahlen zur Verfügung: Elbe 1073 (St 357, Bm 358, Pa 358), Weser 846 (St 275, Bm 274, Pa 297).

Folgende Ergebnisse können festgehalten werden:

Die Röhrichtarten an der Weser siedeln signifikant ca. 0,5 m tiefer als die an der Elbe (Heuner et al. eingereicht). Wird nur die Vegetationsgrenze betrachtet, unterscheiden sich an den Elbe-Prallhängen des Hauptarms die Arten deutlich in ihrer Vorkommenshöhe.

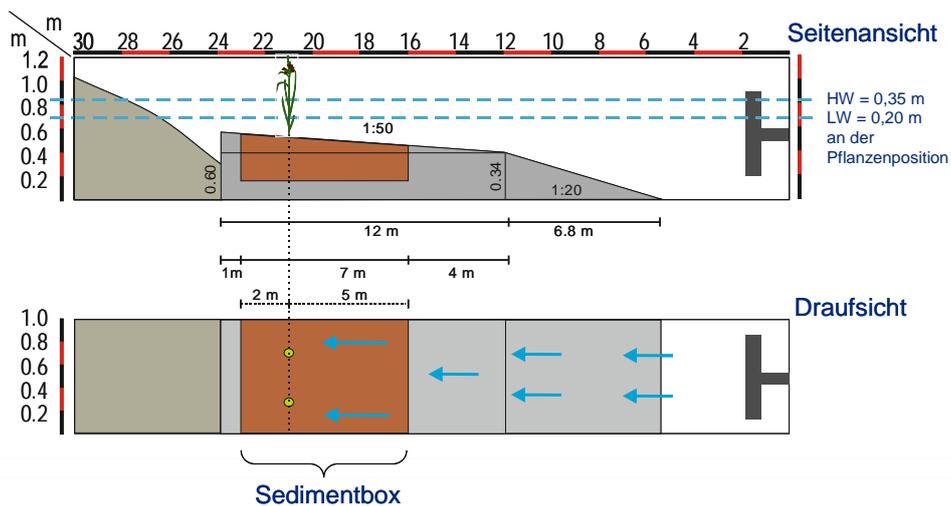
An der Vegetationsgrenze der Weser-Ufer und der Elbe-Gleithänge entlang der Hauptarme unterscheiden sich die Arten nicht in der Vorkommenshöhe, ebenso wenig wie an allen Nebenarmen. Die Röhrichte besiedeln die Ufer der Elbe ab einer größeren Entfernung von 450 m von der Fahrrinnenachse, die Ufer der Weser ab 150 m. Bei geringer Hydrodynamik z. B. in geschützten Bereichen entfällt die typische Röhrichtzonierung von Salz-Teichsimse, Meer-Strandsimse und Schilf (hinsichtlich zunehmender Höhe) zu Gunsten des Schilfs. Daraus lässt sich schließen, dass die Standorthöhe der Röhrichtpflanzen an der Vegetationsgrenze mit der Stärke der Hydrodynamik variiert.

### **3.2 Zwei Pionierröhrichte im Fokus von Wellenbelastung und Wellenreduktionsleistung**

Sollen die Ufer, so wie es die Ziele des IBP und der WRRL vorgeben, auf natürliche Weise gesichert werden, ist es wichtig zu wissen, welcher hydrodynamischen Angriffskraft z. B. durch Wellen die naturnahe Vegetation (Röhrichte) standhalten kann. Um erste Erkenntnisse über diese Thematik zu erlangen, wurden in Kooperation mit der Universität Antwerpen, der Universität Gent und dem Netherlands Institute for Sea Research (NIOZ) Experimente in Wellenkanälen durchgeführt, die sich mit folgenden Fragestellungen beschäftigten:

Welche Unterschiede gibt es in der Toleranz der Pionierröhrichte gegenüber Wellenbelastung?

Wie unterscheiden sich die Röhrichte in der Wellenreduktionsleistung?



**Abb. 3-2: Versuchsaufbau des Wellenexperiments zur Untersuchung der Wellenbelastung der Röhrichte, HW = hoher Wasserstand, LW = niedriger Wasserstand**

Die Experimente zur Untersuchung der Wellenbelastung waren so aufgebaut, dass eine naturähnliche bewachsene Wattfläche simuliert wurde. Die Hangneigung betrug 2 % (Abb. 3-2). Die eingepflanzten zwei Individuen repräsentierten die Pflanzen, die an der vordersten Vegetationskante zum Watt stehen. Als Pionierröhrichtarten wurden die Salz-Teichsimse (*Schoenoplectus tabernaemontani*) und die Meer-Strandsimse (*Bolboschoenus maritimus*) getestet. Pro Lauf wurden die Pflanzen mit 200 Wellen mit jeweils zwei verschiedenen Wassertiefen (an der Pflanzenposition 20 cm, 35 cm) und zwei Wellenperioden (2 s, 10 s) bei einer Eingangswellenhöhe von 17 cm beschickt. Pro Wasserstand, Wellenperiode und Röhrichtart sind zehn Replikate erstellt worden. Folgende Parameter wurden gemessen: Die Wellenhöhe bzw. Wassertiefe wurde an der Wellenmaschine und an der Pflanzenposition mit 40 Hz mittels „resistance wave gauges“ aufgezeichnet. An den Pflanzen wurden Stängelhöhe, Stängeldurchmesser, Blätteranzahl und Blattlänge gemessen. Die Widerstandskraft pro Pflanze wurde durch die Biegemessung eines mit den Pflanzenstängeln verbundenen Bimetalls erhoben. Nach dem Wellendurchlauf wurde der Pflanzenstängel abgeschnitten und die Eigenerosion um den Stängel herum wurde mit einem Laserscanner (EProfiler entwickelt von Aalborg University, Hydraulic & Coastal Engineering Group, Dänemark) abgetastet. Der Winkel der Ermüdung nach 200 Wellen wurde mit der ArcCos-Funktion (Distanz zwischen der zu Beginn senkrecht stehenden Pflanzen und der ermüdeten Pflanzen unterhalb der Blüte, Pflanzenhöhe) berechnet.

Wesentliche Ergebnisse sind:

Die Meer-Strandsimse leistet bei unterschiedlichen Wassertiefen einen signifikant höheren Widerstand als die Salz-Teichsimse (Heuner et al. in

Begutachtung). Durch den stärkeren Widerstand besitzt der Stängel nach wiederholten Wellenereignissen insbesondere bei höheren Wasserständen eine stärkere Neigung (höherer Biegewinkel → Ermüdung). Die Ermüdung der Pioniere ist jedoch bei durchschnittlicher Wellenbelastung (Wellenperiode = 2 s) zu vernachlässigen. Hingegen steigt sie bei überdurchschnittlicher Wellenbelastung (Wellenperiode = 10 s) enorm an. Die Erosion um den Stängel der beiden Pflanzenarten ist nicht signifikant unterschiedlich.

Die Experimente zur Wellenreduktionsleistung wurden in einem ovalen Wellen- und Strömungskanal mit einer Länge von 17,5 m und 0,6 m Breite (Bouma et al. 2009) durchgeführt. In diesen wurde jeweils ein Pflanzenbestand mit einer Lauflänge von 1,6 m der beiden oben genannten Pionierarten eingesetzt. Folgende Stängeldichten wurden getestet: 200, 300, 400, 500 und 550 Pflanzenstängel pro m<sup>2</sup>. Ebenfalls wurde die Biomasse in Gramm pro m<sup>3</sup> Trockengewicht bestimmt. Die Wassertiefe betrug 32 cm. Die Wellenhöhen bzw. Wassertiefen der Eingangswellen wurden 0,4 m vor dem Bestand und die reduzierte Wellen direkt hinter dem Bestand mit Drucksensoren gemessen. Die Eingangswelle hatte eine Wellenperiode von 2,1 s und 4 cm Wellenhöhe.

Folgende Ergebnisse können festgehalten werden.

Die Meer-Strandsimse leistet eine doppelte bis dreifache Wellenreduktion gegenüber der Salz-Teichsimse. Je dichter der Bestand desto höher die Reduktionsleistung. Dadurch kann die Meer-Strandsimse bei einer Stängeldichte von 500 pro m<sup>2</sup> und einer Breite des Vegetationsgürtels von 1,6 m ein Viertel der Wellenhöhe reduzieren. Unter Berücksichtigung der Biomasse wird der Unterschied zwischen den beiden Pionierröhrichten geringfügig kleiner, bleibt aber weiterhin deutlich signifikant.

### **3.3 Die Pflanzeigenschaften von Pionierröhrichten**

Neben den äußerlichen Pflanzeigenschaften wie Blätteranzahl oder Stängeldurchmesser hat auch die physiologische Zusammensetzung der Pflanze hinsichtlich Elastizität und Stabilität einen Einfluss auf die Belastbarkeit von Makrophyten (Schoelynck et al. 2010). Wichtige Pflanzenstoffe sind hierbei Lignin, das den Grad der Verholzung anzeigt, Cellulose, das für die Elastizität im Stängel verantwortlich ist und Silizium, das häufig für stabile und trotzdem elastische Strukturen wie das menschliche Blutgefäßsystem (Firley 2011) eingesetzt wird. Die biomechanischen Eigenschaften hinsichtlich der Belastbarkeit von Pflanzen bezüglich der Hydrodynamik lassen sich über Zug- und Druckmaschinen messen. Folgende Fragen wurden untersucht:

Wie unterscheiden sich die Pionierröhrichte in ihrer Elastizität und Stabilität?

Welche der beiden Arten Meer-Strandsimse und Salz-Teichsimse ist belastbarer und warum?

Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Pflanzenstoffen und der Belastbarkeit?

Im Labor wurden Silikat mit Natronlauge und Cellulose mit Schwefelsäure aus zehn basalen Pflanzenteilen (die unteren 10 cm) und zehn oberen Stängelteilen der Meer-Strandsimse und der Salz-Teichsimse extrahiert. Der Ligningehalt wurde durch Veraschung bestimmt (Schoelynck et al. 2010). Die Belastbarkeit durch Druck und Zug wurde an der Universität de Lyon bestimmt.

Folgende Ergebnisse sind festzuhalten:

Die Meer-Strandsimse enthält gegenüber der Salz-Teichsimse ca. das 2,5-fache an Lignin (Heuner et al. in Begutachtung). Der basale Stängelteil wird bei der Salz-Teichsimse signifikant durch mehr Cellulose verstärkt, bei der Meer-Strandsimse durch mehr Silikat. Die Biegesteifigkeit der Meer-Strandsimse ist doppelt so hoch wie die der Salz-Teichsimse, das bedeutet, dass die letztere deutlich flexibler ist. Wirken Zugkräfte, hält die Salz-Teichsimse signifikant ein Drittel mehr aus als die Meer-Strandsimse. Normiert man jedoch diesen Parameter auf die Pflanzenoberfläche (m<sup>2</sup>), gibt es keine signifikanten Unterschiede mehr. Das lässt darauf schließen, dass Stängeldurchmesser und Stängelform (Salz-Teichsimse rund-elliptisch, Meer-Strandsimse dreieckig) einen wesentlichen Einfluss auf die Belastungsfähigkeit haben. Die eingelagerte Cellulose in dem basalen Stängelteil der Salz-Teichsimse verleiht der Art einen höheren Bruchwiderstand. Durch ihre Flexibilität neigt sie eher dazu, die Belastung durch ihre Biegefähigkeit zu vermeiden, wohingegen die Meer-Strandsimse der Strömungsbelastung nicht durch Verformung ausweicht. Deshalb besiedelt die Meer-Strandsimse überwiegend höhere Standorten als die Salz-Teichsimse.

### **3.4 Die Lebensphasen der Meer-Strandsimse und ihre Überlebensstrategien**

Beobachtungen und Messungen auf den Wattflächen der Schelde (Südwestniederlande) geben Hinweise darauf, dass die Besiedlung durch Röhrichte vor allem durch klonale Ausbreitung erfolgt. Warum gelingt die Besiedlung auf Wattflächen durch Keimlinge, die wichtig für den Genaustausch sind, nur selten? Anhand der Meer-Strandsimse, die an der Schelde eine verbreitete Pionierpflanze ist, wurde in Wellenkanalexperimenten getestet, inwiefern die Lebensphase der Pflanze (adulte Ableger oder nur wenige Wochen alte Keimlinge) sowie die Wellenperiode der eintreffenden Wellen beim Überleben und Etablieren auf der Wattfläche eine Rolle spielen. Neben den beiden Lebensphasen wurden zwei Wellenperioden (2 s und 10 s) und zwei

Wassertiefen (5 cm und 20 cm) analysiert. Die erhobenen Parameter sind in Kapitel 3.2 aufgeführt.

Die Ergebnisse zeigen (Silinski et al. im Druck), dass sich die Pflanzeigenschaften je nach Alter ausprägen. Diese führen somit zu unterschiedlichen Reaktionen unter Wellenbelastung: Ableger besitzen dickere Stängel. Sie sind dadurch deutlich steifer und besitzen eine höhere Widerstandskraft insbesondere bei größerer Wassertiefe als die Keimlinge. Betrachtet man den Ermüdungszustand der Pflanzen nach dem jeweiligen Wellenlauf, so zeigt sich, dass die 2 s-Wellen (stellvertretend für Windwellen) so gut wie keine Belastung darstellen. Die 10 s-Wellen hingegen (stellvertretend für langperiodische, primäre Schiffswellen) führen vor allem bei den Keimlingen, aber auch bei den Ablegern zu erheblichen Beeinträchtigungen. Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass ein langfristiges Überleben und Etablieren von Keimlingen unter den zuletzt genannten Umständen nur eingeschränkt möglich ist. Ebenfalls geben sie einen Hinweis auf lebensphasenspezifische Überlebensstrategien: Die Keimlinge beugen einer Entwurzelung durch eine hohe Biegsamkeit vor, wohingegen die Ableger den großen Zugkräften mit einer guten Verankerung im Boden durch tiefe Wurzeln trotzen.

### **3.5 Wachstum und Ausbreitung von Röhrichtern und ihre Einflussfaktoren**

Mit Hilfe von prozessbasierten räumlich expliziten Vegetationsmodellen können Ausbreitungsprozesse der Röhrichte besser verstanden und quantifiziert werden. Die Verschiebungen, Verluste und Zunahmen der Röhrichtvegetation können nicht einzelnen abiotischen oder biotischen Faktoren zugeordnet werden. Um die generellen Muster von Vegetationsausbreitung und -rückgang zu verstehen und Projektionen über Veränderungen zu ermöglichen, ist es notwendig die zugrundeliegenden Prozesse zu quantifizieren und somit das Systemverständnis zu verbessern.

Folgende Forschungsfragen werden hierzu untersucht:

Welchen Einfluss hat die Ästuarvegetation auf die Strömung?

Wie beeinflusst das Habitat Pflanzenwachstum und Ausbreitung?

Welchen Einfluss hat die Strömung auf die Pflanzeigenschaften?

Zum Aufbau der Modelle und Beantwortung der Fragen dienten Daten, die in den Jahren 2012 und 2013 im Feld an der Tideelbe für die Röhrichtarten Meer-Standsimse (*Bolboschoenus maritimus*) und Schilf (*Phragmites australis*) erhoben wurden. Folgende Parameter wurden gemessen (Carus et al. 2014 in Vorbereitung): Die Höhe aller Pflanzen wurde in drei 0,5 m × 0,5 m-Plots an jeder der 102 auf acht Transekten angeordneten Messstellen er-

fasst. 200 Einzelpflanzen verschiedener Höhen wurden pro Untersuchungsgebiet vermessen, geerntet und gewogen, und die Biomasse pro Quadratmeter bestimmt. Es wurde eine Kalibrierungskurve für den Zusammenhang von Trockengewicht und Höhe der individuellen Sprosse erstellt. Die Beprobung der unterirdischen Biomasse (Trockenbiomasse pro m<sup>2</sup>) mit Wurzelbohrern und PVC Röhren wurde im Frühjahr 2013 durchgeführt und die gewonnenen Proben ausgewaschen, gesiebt, sortiert und gewogen. Die Vegetationsausbrei-



**Abb. 3-3: Untersuchungsgebiete, in denen Wachstum und Ausbreitung von Röhrichtern erhoben wurden.**

zung wurde monatlich gemessen. Aus Temperatur- und Lichtintensitätsmessungen mittels Onset HOB0 Loggern an vier Plots auf zwei Transekten wurde die Überflutungshäufigkeit abgeleitet. Die Strömungsgeschwindigkeit wurde mittels vier akustischer Fließgeschwindigkeitsmessgeräte (Nor-tec Vector) gemessen. Messung des Wasserstands und der Leitfähigkeit erfolgten mit Hilfe der Datensammler des Typs Ecolog (OTT Hydromet). Bodenproben wurden zur Messung von Korngrößenverteilung, organischem Kohlenstoffgehalt und pH-Wert entnommen. Die Bodensalinität wurde in HTEM Röhren mittels eines Leitfähigkeitsmessgerätes ermittelt. Die biomechanischen Eigenschaften der Pflanzen wurden im Labor (TU Dresden) mittels Drei-Punkt-Biegung erfasst.

Folgende Ergebnisse können aus den gewonnenen Daten festgehalten werden (Carus et al. 2014 in Vorbereitung):

Die Vorlandvegetation breitet sich in vielen Bereichen der beiden Untersuchungsgebiete aus. In den meisten Bereichen übersteigt die Wurzel- und Rhizombiomasse beider Röhrichtarten die der oberirdischen Biomasse. Der

Anteil der unterirdischen Biomasse nimmt von der Vegetationskante Richtung Vorland zu.

Hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeit, wird die Längsströmung (parallel zum Flussverlauf) mit Eintritt in die Vegetation um ca. 50 % reduziert. Eine Reduzierung der Geschwindigkeiten durch die Querströmung (senkrecht zum Flussverlauf) konnte hier durch die Vegetation nicht festgestellt werden.

Verallgemeinerte lineare Modelle (GLM) zeigen, dass Überflutungshöhe und Strömungsgeschwindigkeit wichtige Faktoren der Röhrichtverbreitung an der Tideelbe sind. Die vorgefundene Bodenwassersalinität im Brackwasserbereich hat keinen signifikanten Effekt auf die beiden Röhrichtarten. Das Schilf reagiert sensibel auf hohe Strömungsgeschwindigkeiten. Umso niedriger die Strömungsgeschwindigkeit, desto höher die Toleranz beider Arten gegenüber hoher Überflutung. Die Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst nicht nur die Verbreitung sondern auch die Pflanzeigenschaften der Meer-Strandsimse: Stärker der Strömung ausgesetzte Pflanzen wachsen dicker und sind somit stabiler als Pflanzen in geschützteren Bereichen.

Die mit den erhobenen Daten parametrisierten Vegetationsmodelle sind mechanistisch und modular aufgebaut. Sie ermöglichen Projektionen des Einflusses klimabedingter Änderungen, weitere Untersuchung der Funktionen der Vegetation und Simulationen von Unterhaltungsoptionen.

### 3.6 Auswirkungen von Störungen auf das Tideröhricht

In den durch Dynamik geprägten Ästuarsystemen spielen unregelmäßig auftretende und mehr oder weniger kurzfristig wirksame Störungen, die immer wieder Vegetationsstrukturen und/ oder -typen verändern, eine große Rolle. Folgende störungsökologische Fragen wurden bearbeitet:

Welche Ursachen liegen den Störungsmustern zugrunde?

Wie läuft die „Selbstreparatur“ (Sukzession) nach den verschiedenen Störungen ab?

Auf 56 Dauerflächen im Elbeästuar wurden 2010 bis 2013 Störungen, Artenzusammensetzung und Daten zur Vegetationsstruktur erfasst. Ergänzend wurden Ergebnisse der Hyperspektralanalysen (vgl. Kapitel 3.10) sowie Digitale Geländemodelle (WSA Hamburg & BfG) genutzt.

Folgende Ergebnisse für den Status quo wurden erarbeitet:

Für ufernah abgeschorene Bereiche im Röhrichtgürtel sind Treib- und Randeis verantwortlich. Betroffen sind Schilf-Röhricht (*Phragmites australis*) und Pionierrohrichte (mit Salz-Teichsimse, *Schoenoplectus tabernaemontani*, und Meer-Strandsimse, *Bolboschoenus maritimus*), die im Folgsommer hier wieder aufwachsen. Abgeschorene Schilfgürtel bieten Frühblühern wie der Roten Liste-Art Sumpfdotterblume (*Caltha palustris*) sowie

dem Scharbockskraut (*Ficaria verna*) Licht und Raum.

Erhöhte Wellenhöhe des Seegangs (Bülow et al. 2014) und erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten im Flutstrom (Seifert et al. 2014) können im Systemzusammenhang offene Bodenstellen im Röhrichtgürtel verursachen, die zunächst von Pionierarten und später ggf. wieder von Schilf-Röhricht überwachsen werden.

Sturmfluten bestimmen die Lage der Treibselgürtel. Diese werden häufig von Pionierfluren besiedelt und/ oder von Schilf bzw. Rohrkolben (*Typha* spp.) durchwachsen.

### **3.7 Auswirkungen der winterlichen Schilfmahd auf das Tideröhricht**

Die Mahd von Schilf (*Phragmites australis*) zur Reetgewinnung ist eine traditionelle Nutzungsweise der Vorlandvegetation in den Ästuaren. Heute wird sie noch im Weserästuar praktiziert, u. a. auch von Pächtern auf WSV-Flächen. Folgende Fragen wurden bearbeitet:

Welchen Einfluss hat die winterliche Schilfmahd auf die Bestandsstruktur des Schilfs und wie wirkt sich diese auf die Erosionsschutzfunktion des Röhrichts aus?

Welchen Einfluss hat die Mahd auf naturschutzfachlich relevante Pflanzenarten?

In acht Gebieten entlang Tideweser und Wümme wurden 21 Transekte und 52 Probeflächen untersucht. Diese waren jeweils mindestens drei Jahre in Folge einheitlich bewirtschaftet (bzw. ungenutzt). Zusätzlich wurde der Neophyt Drüsiges Springkraut (*Impatiens glandulifera*) an der Wümme kartiert, um zu beurteilen, ob dieser durch die Mahd gefördert wird.

Folgende Ergebnisse wurden erarbeitet:

Winterliche Schilfmahd im Tideröhricht bewirkt im Folgesommer eine erhöhte Dichte von Schilfhalmen pro m<sup>2</sup> sowie einen erhöhten Anteil von Halmen mit Blüten. Da der mittlere Halmdurchmesser auf den gemähten Flächen keinen Einfluss der Mahd zeigt, lässt die höhere Halmdichte auf einen verbesserten Erosionsschutz durch Mahd ab der Vegetationsperiode bis zur nächsten Mahd schließen. Dagegen ist der Erosionsschutz ab dem Zeitpunkt der Mahd bis zur Vegetationsperiode herabgesetzt.

Schilfmahd fördert Vorkommen und Blühhäufigkeit der Rote Liste-Art Sumpfdotterblume (*Caltha palustris*).

Es konnte keine Förderung des Drüsiges Springkrauts durch Schilfmahd festgestellt werden. Größere Bestände dieses Neophyts wurden ausschließlich auf ungemähten Flächen kartiert. Eine ausführlichere Darstellung des Themenbereichs ist Bauer (in Vorbereitung) zu entnehmen.

### 3.8 Überflutungstoleranz von Röhricht- und Neophytenarten

Die Standortbedingungen in den tidebeeinflussten Vordeichflächen (Marschen) wurden durch menschliche Eingriffe wie Deichbau und Fahrrinnenanpassungen verändert: In der Folge kam es z. B. zu einem Anstieg des Mittleren Tidehochwassers (MThw) bei gleichzeitigem Absenken des Mittleren Tideniedrigwassers (

MTnw), wodurch Überflutungshäufigkeit und -dauer der Marschen und somit die Standortbedingungen der Tideröhrichte beeinflusst werden. In die typische Röhrichtvegetation mischen sich heute auch eingewanderte Pflanzenarten (Neophyten), zu denen das Drüsige Springkraut (*Impatiens glandulifera*) und der Japan-Knöterich (*Fallopia japonica*) zählen. Der Klimawandel wird voraussichtlich aufgrund des Meeresspiegelanstiegs den Tidehub weiter verstärken und fördert aufgrund steigender Temperaturen das Vorkommen der genannten Neophyten. Daher wurden folgende Fragen untersucht:

Wie wirkt sich die veränderte Tideamplitude auf die Röhrichtarten Schilf (*Phragmites australis*), Salz-Teichsimse (*Schoenoplectus tabernaemontani*), Gewöhnliche Strandsimse (*Bolboschoenus maritimus*) sowie den Schmalblättrigen Rohrkolben (*Typha angustifolia*) einzeln und in Konkurrenz zueinander aus?

Wie wirkt sich Überflutung auf die Neophyten Drüsiges Springkraut und Japan-Knöterich aus?

Es wurden speziell entwickelte Tidetreppen im Elbeästuar installiert, die es ermöglichen, Pflanzen einer unterschiedlichen Überflutungsdauer und -höhe auszusetzen.

Folgende Ergebnisse wurden erarbeitet:

Bei gleicher Lage zu MThw bzw. MTnw variieren Überflutungsdauer und -höhe in Abhängigkeit von der räumlichen Lage. Werden das MThw bzw. das MTnw als vegetationsökologische Bezugspunkte genutzt, müssen diese Effekte der räumlichen Lage berücksichtigt werden.

Die Überflutungstoleranz des Neophyten Drüsiges Springkraut ist deutlich geringer als die des Japan-Knöterichs (Roeder 2010).

Die untersuchten Röhrichtarten haben das Potenzial zur Besiedlung tiefer gelegener Standorte als in der Literatur (z. B. Raabe 1986) dokumentiert. Jedoch nimmt (mit und ohne Konkurrenz) die Biomasseproduktion bei allen Arten mit abnehmender Überflutungshäufigkeit zu (Schoenberg et al. 2012).

Konkurrenz durch andere Röhrichtarten führt bei Schilf und auf tief gelegenen, häufig überfluteten Standorten auch bei der Salz-Teichsimse zu höherer Biomasseproduktion (facilitation). Strandsimse und Rohrkolben zeigen unter Konkurrenzbedingungen meist eine verringerte Biomasseproduktion. Das Zusammenspiel von Überflutungsregime, Konkurrenz und Anpassungsfähigkeit einer Art beeinflussen die Vegetationszonierung. Die hohe Überflutungstoleranz der Tideröhrichte ermöglicht auch unter Konkurrenzbedingungen eine Besiedelung von Standorten unterhalb von 1,50 m unter MThw.

### **3.9 Habitatpräferenzen wesentlicher Röhrichtarten**

Um die potenziellen Röhrichthabitats und ihre klimabedingten Änderungen an Weser und Elbe zu modellieren, wurden für die Röhrichtarten Salz-Teichsimse, Meer-Strandsimse und Schilf verallgemeinerte lineare Modelle aufgebaut. Signifikante erklärende Modellparameter sind Höhe zum Mittleren Tidehochwasser, (bzw. den kollinearen Faktor Distanz zur Mittleren Tidehochwasserlinie), Flussname (Elbe/Weser) und für die Meer-Strandsimse auch die Flussordnung (Hauptarm/Nebenarm). Diese Parameter spiegeln unterschiedliche hydrodynamische Bedingungen wider.

Diese Modelle besitzen folgende Modellgüten: Salz-Teichsimse: AUC (area under the curve) = 0.85, Meer-Strandsimse: AUC = 0.77, Schilf: AUC = 0.76. Das perfekte Modell hat einen AUC-Wert von 1.0.

Die Modelle zeigen, dass sich die Habitatpräferenzen der einzelnen Arten mit den hydrodynamischen Bedingungen ändern: Die Salz-Teichsimse verträgt höhere hydrodynamische Belastungen als die Meer-Strandsimse, die wenn die Hydrodynamik geringer wird auch tiefer siedelt und somit stärker mit der Teichsimse konkurriert. Das gleiche gilt für Schilf in Bezug auf die Meer-Strandsimse.

### **3.10 Querschnittsaufgabe Fernerkundung**

Neben der großflächigen Erfassung von Vegetation und Störungen im Röhrichtgürtel war zu prüfen, ob innovative Fernerkundungstechnologien, Analysen und Visualisierungen von Unsicherheiten einen signifikanten Mehrwert für das Vorland- und Ästuarmonitoring darstellen. Folgende Fragen wurden untersucht:

Bis zu welchem Skalenniveau können verschiedene Typen von Störungen im Röhrichtgürtel verlässlich voneinander unterschieden werden?

Wie gut lassen sich Vegetationstypen und Arten (u. a. Neophyten) detektieren?

Welche Vor- und Nachteile bietet die satellitengestützte gegenüber der

flugzeuggestützten Luftbilderfassung hinsichtlich eines Langzeitmonitors zur Beobachtung von Auwald- und Röhrchententwicklung?

Welche Unsicherheiten lassen sich wie modellieren und wie lassen sich diese Ergebnisse als Zusatzinformation visualisieren?

Zur Erfassung der Datensätze wurde zum einen das multispektrale Satellitensystem RapidEye (6,5 m räumliche Auflösung) genutzt, zum anderen der hyperspektrale flugzeuggestützte Linienscanner ASIA Eagle eingesetzt (Heuner et al. 2013a). Mit beiden Sensoren wurden die Vorlandbereiche von Heuckenlock/Bunthäuser Spitze, Eschschallen und St Margarethen der Elbe von jeweils 350-410 ha Größe in den Monaten Mai, Juli/August und Oktober (ASIA Eagle) bzw. im Frühjahr und Sommer (RapidEye) untersucht. Zusätzlich erfolgten Feldaufnahmen bzgl. der verschiedenen Vegetations- bzw. Störungsklassen in einem stratifiziert-randomisierten Design (Faude & Schmidtlein 2012), die mit Ordinationen analysiert wurden. Zur Auswertung der Satellitenbilder wurden Klassifikationsmethoden wie Nearest Neighbour (NN), Classification and Regression Trees (CART) und Support Vector Machine (SVM) verwendet (Kleinschmit & Bahls 2012). Es wurden Regressionsverfahren (wie Partial Least Squares Regression) angewendet, welche die Feld- und Bilddaten in Beziehung zueinander setzen.

Folgende Ergebnisse zeigten die Auswertungen der hyperspektralen Flugzeugdaten:

Sie sind für eine schnelle Detektion von relevanten Pflanzenveränderungen geeignet. Die Störstellen sind gut im Frühjahr, die Dominanzbestände der Röhrchentypen sind gut im Sommer detektierbar. Erste Neophytenklassifizierungen erwiesen sich als vielversprechend. Eine räumliche Auflösungen von ca. 5 m bringt das wenigste Datenrauschen mit sich (Faude & Schmidtlein 2012).

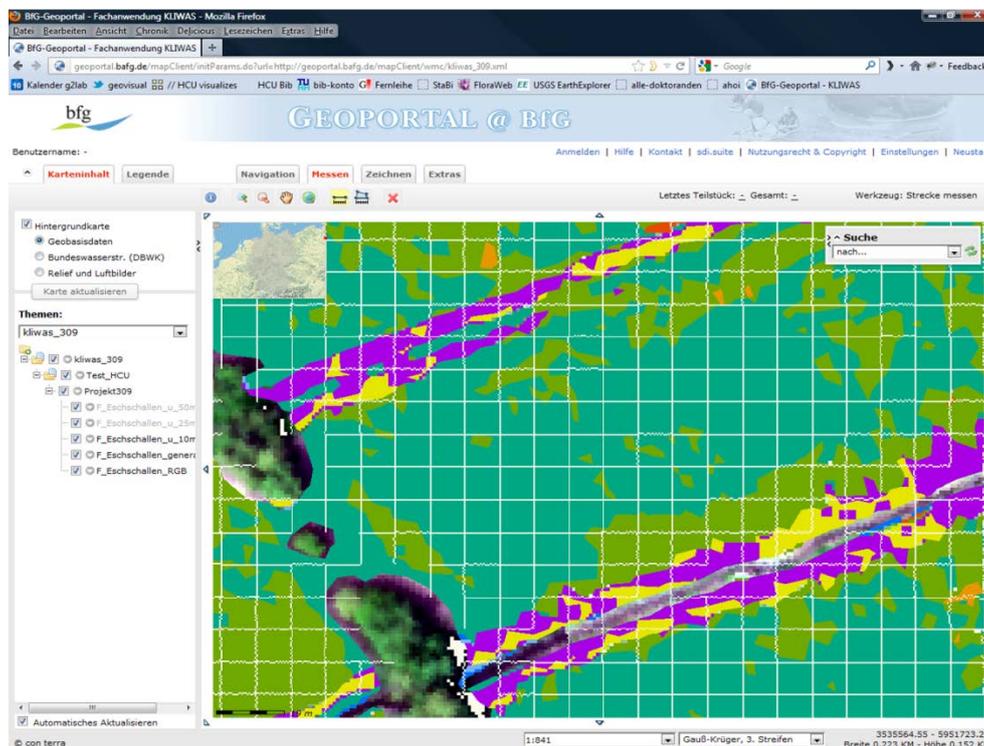
Folgende Ergebnisse können für die multispektralen Satellitendaten festgehalten werden:

Obergruppen wie Gehölz, Vegetation, photosynthetisch wenig aktive Vegetation (Störstellen) und Wasser konnten sicher erfasst werden. Wenn die Satellitenaufnahme bei Niedrigwasser erfolgt, ist auch die Trennung der Watt-Vegetationsgrenze verlässlich. Die Klassifikation der Obergruppen lässt sich auf andere Zeitpunkte und Flächen übertragen.

Auf Ebene der Dominanzarten kann eine Gesamtgenauigkeit von 70 % nur durch das Einbeziehen einer breiteren Wissensbasis wie z. B. Nachbarschaftsregeln (Kleinschmit & Bahls 2012, Kinkeldey & Schiewe 2012), Digitales Geländemodell, Schwellwerte von Vegetationsindizes erreicht werden. Weitere Voraussetzung sind ausreichende Referenzdaten und Mindestflächengrößen von 200 m<sup>2</sup>. Störstellen können somit im Frühjahr sicher typisiert werden, besonders das Treibsel. Der Einsatz von RapidEye-Daten ist für ein Langzeitmonitoring auf Obergruppenebene inklusive Störstel-

lenerfassung geeignet, auf Dominanzartenebene nur bedingt. Eine multi-temporale (Frühjahr & Sommer) Erfassung, ein stetiges Netz von Referenzflächen (30 pro Klasse) und das Hinzunehmen von Zusatzdaten ist empfehlenswert (Kleinschmit & Bahls 2012, Heuner et al. 2013b). Die robuste Analyseverfahren lässt eine einfache Übertragbarkeit auf andere Abschnitte des Elbeästuars zu. In Zukunft kann die Kombination optischer Sensoren (RapidEye, Sentinel2) mit Radar (TerraSAR-X) die Detektion optimieren.

Sowohl Satellitendaten als auch flugzeuggestützte Luftbilddaten lassen Freiräume bei der Auswertung, so dass bestimmte Unsicherheiten und Fehlinterpretationen unvermeidbar sind. Dies führt häufig zu Überschätzung der Datenqualität. Deshalb wurden innerhalb der Querschnittsaufgabe Fernerkundung die Unsicherheiten definiert, modelliert und visualisiert (Schiewe & Kinkeldey 2012). Zunächst wurden Objekt-Unsicherheiten (thematisch) von Unsicherheiten im Grenzverlauf (thematisch-geometrisch) unterschieden. Bei Objekt-Unsicherheiten wird ein Wert einem Objekt spezifisch zugeordnet. Sie entstehen z. B. durch Klassifikationsunsicherheiten und durch die Klassifikationsgüten wie den Klassenzugehörigkeitswerten.



**Abb. 3-4: Beispiel der klassifizierten Hyperspektraldaten mit Unsicherheitsinformation (Objekt-Unsicherheiten) im Geoportal der BfG, scharfe weiße Linien: niedrige Unsicherheit, unscharfe weiße Linien: hohe Unsicherheit**

Bei Unsicherheiten im Grenzverlauf wird ein Wert je Klassenpaar zugeordnet und beschreibt somit die Grenzscharfen von z. B. spektraler Ähnlichkeit der Klassen oder Nachbarschaften. Universelle und leicht verständliche Me-

thoden zur Darstellung thematischer Unsicherheiten sind Noise Annotation Lines (Gitter mit unterschiedlicher Darstellungsschärfe) und Ghost Lines (Linie mit unterschiedlichem Grad an Strichelung) (Kinkeldey & Schiewe 2012). Die Kommunikation von Unsicherheiten trägt ebenfalls zur Optimierung von Monitoringaufgaben (speziell Veränderungsanalysen) bei. Die hier entwickelten Methoden sind frei verfügbar unter <http://code.google.com/p/kliwas/>, erweiterbar und übertragbar z. B. auf die Vegetationsmodellierung. Die klassifizierten Daten und Unsicherheitslayer können unter <http://geoportal.bafg.de> eingesehen und als GIS-Anwendung eingebunden werden (Abb. 3-4).

Klimabedingte  
Änderung der  
Vorlandvegetation  
und ihrer Funktio-  
nen in Ästuaren  
sowie Anpas-  
sungsoptionen für  
die Unterhaltung

## **4 Erwartete klimabedingte Änderungen und Betroffenheit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung sowie weiterer Stakeholder**

### **4.1 Änderung der potenziellen Röhrichthabitats**

Neben den Erkenntnissen des Modellaufbaus (Kapitel 3.9) fließen in die Aussagen über die Änderungen der Röhrichthabitats, auch das im Projekt erlangte Wissen über die Überflutungstoleranz (Kapitel 3.8), die Wachstum- und Ausbreitungseigenschaften (Kapitel 3.5) und die Grenzen bezüglich der fluss- und schiffsinduzierten Hydrodynamik der untersuchten Röhrichtarten (Kapitel 3.1) ein.

Es wurden zwei Fallstudien für Beispielgebiete an der Elbe mit den aufgebauten Modellen durchgeführt:

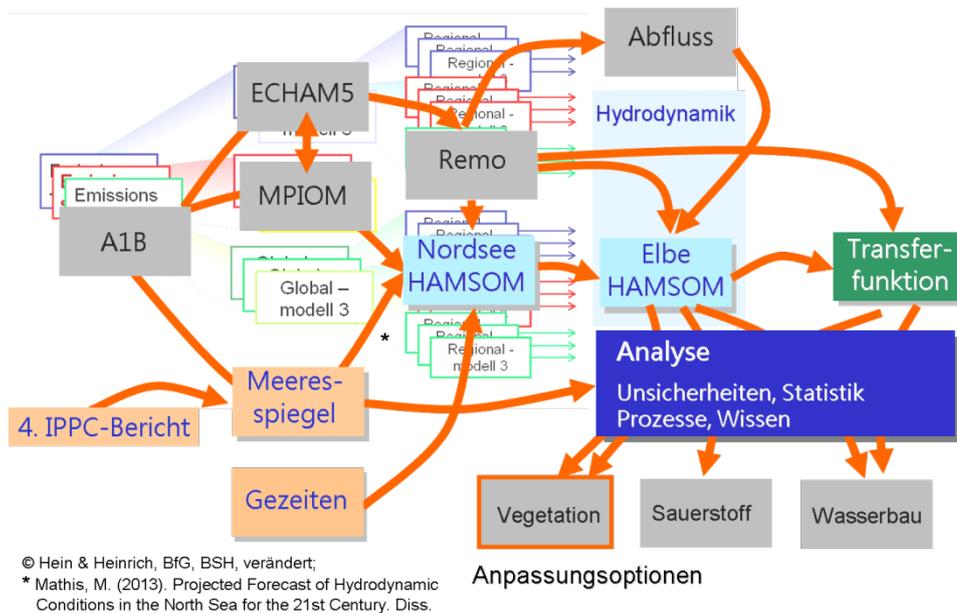
Fall A nahm für die nahe Zukunft einen Meeresspiegelanstieg von 30 cm an. Da im Ästuar das MThw gegenüber dem Meeresspiegelanstieg 10-30 % höher ansteigt (Hein et al. 2013), wurden 39 cm MThw-Anstieg auf das Referenz-MThw 2001-2010 hinzugerechnet. Des Weiteren ist die Annahme getroffen worden, dass die Topographie des Vorlandes mit dem Meeresspiegelanstieg mitwächst. Die Sedimentmenge wurde aus der Differenz der DGM 2010-1998 für die Sedimentationsflächen von Röhrichten und Watten berechnet (Fuchs et al. 2013). Die Mitwachsrates wurde nach Temmerman et al. (2004) bestimmt. Die Habitatmodelle wurden angewendet auf den reinen MThw-Anstieg ohne Veränderung der Topographie und auf den MThw-Anstieg inklusive mitwachsender Topographie.

In der Fallstudie B wurden die Habitatmodelle mit den Werten des MThw-Anstiegs angewendet, so wie der durchgängige Lauf der Modellkette Küste sie berechnet hat (Abb. 4-1). Das Anwendungsgebiet war der Bereich Hollerwettern (Elbe-km 679-681). Das MThw (NHN) im Referenzzustand betrug 155 cm. Für die Best-case-Betrachtung in der nahen Zukunft (2031-2050, Zeitraum ist nodaltidenbedingt) wird ein MThw-Anstieg von 11 cm erwartet, für die Worst-case-Betrachtung 23 cm. Dieser Wert war gleich mit der Best-case-Betrachtung in der fernen Zukunft (2081-2100). Die Worst-case-Betrachtung ging in diesem Gebiet von 59 cm MThw-Anstieg aus.

In der Fallstudie A war deutlich erkennbar, dass lokal in naturnahen Gebieten die potenziellen Schilfhabitats zu Gunsten der potenziellen Habitats der Pionierrohrichte schrumpfen, wenn die Topographie konstant bleiben sollte. Großflächig betrachtet wird jedoch erwartet, dass die Schilfhabitats zunehmen, da der MThw-Anstieg in dieser Größenordnung für die nahe und ferne Zukunft eine bedeutende Nutzungsaufgabe erzwingt. Wächst die Topogra-

phie in derselben Größenordnung mit, sind für die nahe und ferne Zukunft keine wesentlichen Änderungen hinsichtlich der einzelnen Habitats zu erwarten.

Klimabedingte Änderung der Vorlandvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung



**Abb. 4-1: Realisierter Modellauf bis zu den Endgliedern der Modellkette**

In der Fallstudie B zeigte sich, dass die nahe Zukunft auch bei gleichbleibender Topographie keine nennenswerten Habitatveränderungen mit sich bringt, sofern Windrichtung und Windstärke gleichbleiben. Doch bei der Worst-case-Betrachtung in der fernen Zukunft ist in den naturnahen Gebieten mit stärkeren Verlusten der Röhrichthabitats zu rechnen. Flache Ufer sind besonders betroffen.

Die Fallstudien haben gezeigt, dass die Habitatveränderungen der Röhrichte im Klimawandel wesentlich von dem Maß des Sedimentdargebots im Ästuar und dem Grad des Meeresspiegelanstiegs abhängen. Ein weiterer Aspekt, den die Modellierung bisher nicht abdeckt, sind die Habitatveränderungen durch Nutzungsänderungen. Die Aufgabe heute landwirtschaftlich genutzter Flächen lässt neue Röhrichthabitats entstehen.

## 4.2 Änderung von Störungsfaktoren und Störungsmustern

Die bestimmenden Faktoren im Störungsregime des Tideröhrichts werden alle durch den Klimawandel beeinflusst. Es wurden Ergebnisse der KLIWAS-Projekte 1.02 „Klimamodelle“, 2.01 „Klimawandelszenarien Küste“, 2.03 „Tidekennwerte/ Seegangstatistik“, 3.01 „Schifffahrt“, 3.02 „Anpassungsoptionen“ sowie 3.08 „Sauerstoffgehalt“ herangezogen (Mehling et al. 2013), um qualitative Aussagen zu den zu erwartenden klimawandelbedingten Veränderungen des Störungsregimes zu treffen.

Wesentliche Ergebnisse sind:

Infolge erhöhter Sturmflut-Scheitelwasserstände ist in Zukunft mit häufigerer Ablagerung von Treibseln in Deichnähe zu rechnen.

Eine Abnahme von Eisereignissen durch zunehmende Lufttemperaturen bedingt auch eine Abnahme von Eisschurflächen entlang der Ufer.

Aufgrund der Zunahme von Wellenhöhen kann zusätzlicher Offenboden Pioniervegetation (ggf. auch invasive Neophyten) fördern und somit Schilfflächen reduzieren. Letztlich wird dadurch der natürliche Schutz der Ufer gegenüber Erosion geschwächt.

### **4.3 Änderung von Landnutzung und Biotoptypen**

Die naturraumtypische Biotopausstattung der Ästuarare ist stark von der Nutzung durch den Menschen überprägt. Lebensraum- und Erosionsschutzfunktion der Ästuarvegetation wie auch ihr naturschutzfachlicher Wert hängen von der Biotopausstattung ab. Deshalb wurde untersucht, wie sich die Ausprägung des Vorlandes im Klimawandel in Abhängigkeit von der Nutzung verändern kann, welche Konsequenzen dies wiederum für die Nutzungen hat und wie Anpassungsoptionen aussehen können (vgl. Kap. 5.1).

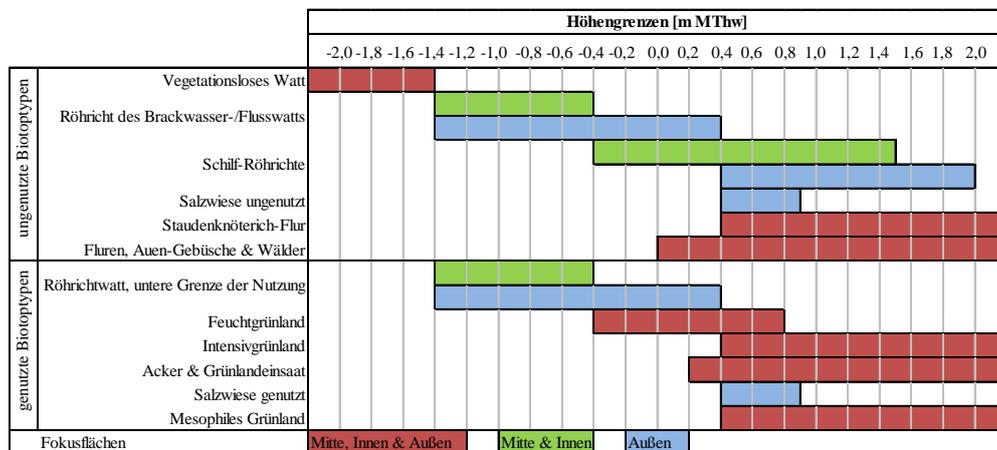
Für die Analysen wurden für „Fokusflächen“ des inneren, mittleren und äußeren Weser- und Elbästuars Biotoptypenkarten sowie Höhendaten verwendet (Schuchardt et al. 2013a). Die Karten und Rasterdaten zur Geländehöhe (DGM) wurden aus Daten der WSV, der Länder und der BfG zusammengeführt, wobei die Geländehöhe über mittlerem Tidehochwasser (MThw) in Form des Medians pro Biotop in „virtuelle Geländemodelle“ einging. Um mögliche zukünftige Geländehöhen abschätzen zu können, wurde das Mitwachsvermögen und -verhalten der einzelnen Biotoptypen aus den Ergebnissen einer Literaturrecherche abgeleitet (Schuchardt et al. 2013b).

Es konnten mit zwei „Mitwachs-Szenarien“ („worst case“-Annahmen) für nahe Zukunft (2050) und ferne Zukunft (2100) in einem stark vereinfachten Ansatz mögliche Veränderungen der Biotope aufgezeigt werden. Für die nahe Zukunft wurde angenommen (Schuchardt et al. 2013c), dass das MThw in Elbe und Weser 30 cm höher sein wird als heute. Für die ferne Zukunft wurden von der BAW Erhöhungen von 89-93 cm in der Elbe und 77-89 cm in der Weser modelliert (Seifert et al. 2014). Diese genannten Werte werden hier für eine Szenarienstudie zur Vegetationsentwicklung herangezogen. Zudem wurden aus der Biotoptypenverteilung außerhalb der Sommerpolder im Status Quo Regeln zur Abfolge der Biotoptypen abgeleitet (Abb. 4-2).

Wichtige Ergebnisse sind:

Die jährlichen **Mitwachsraten der Biotoptypen** des Vorlandes liegen außerhalb der Sommerpolder je nach Vegetationsdichte und lageabhängigem Sedimenteintrag zwischen 4,25 und 10,5 mm/ a (Tab. 4-1).

Aus den Szenarios der BAW (siehe oben, Seifert et al. 2014) berechnete Schuchardt et al. 2013c eine jährliche Anstiegsrate des MThw von 6,8 mm bis 2050, so dass ein **Mitwachsen des Vorlandes** in diesem Szenario voraussichtlich weitestgehend möglich ist. Durch den nach 2050 beschleunigten Meeresspiegelanstieg mit Anstiegsrate des MThw zwischen 8,2 und 9,9 mm/a ist das Mitwachsen des Vorlandes im Szenario 2100 im oligohalinen Abschnitt weitgehend möglich und im mesohalinen mäßig bzw. im limnischen Abschnitt deutlich eingeschränkt. Die Geländehöhe über MThw nimmt je nach Mitwachsvermögen der Biotoptypen um bis zu 53 cm ab. Kleinräumig sind daher **Vorlandverluste** zu erwarten, während Veränderungen der Biotoptypen in der fernen Zukunft auch großräumiger eintreten können.



**Abb. 4-2: Höhengrenzen betrachteter Biotoptypen (Ist-Zustand)**

Die Verteilung der Biotoptypen in den Szenarien (Schuchardt et al. 2013c) zeigt, dass die Veränderungen durch nicht ausreichendes Mitwachsen auf

**Tab. 4-1: Jährliche Mitwachsraten der Biotoptypen für die nahe und ferne Zukunft (Schuchardt et al. 2013b)**

Jährliche Mitwachsraten [mm/a]	Biotoptypen mit dichter Vegetation	Biotoptypen mit lichter Vegetation	Biotoptypen mit sehr lichter Vegetation
Beispiele	Röhrichte, Auwälder	Salzwiesen, mesophil. Grünland	Äcker
Mitwachsvermögen	hoch	mittel	(sehr) gering
Fokusfläche Innen	5,25	4,75	4,25
Fokusfläche Mitte	10,5	9,5	8,5
Fokusfläche Außen	8,4	7,6	6,8

Biotoptypen-Ebene im Szenario 2050 an Weser und Elbe voraussichtlich sehr gering sein werden. Im Szenario 2100 sind an der Weser auf Biotoptypen-Ebene voraussichtlich nur kleinräumig Veränderungen zu erwarten

(Fokusfläche „Außen“ 2%, „Mitte“ 0%, „Innen“ unklar (fehlende Daten), während an der Elbe größere Anteile des Vorlandes betroffen sind (Fokusfläche „Außen“ 15%, „Mitte“ 18%, „Innen“ 37%).

## **5 Kernaussagen zu den Anpassungs- und Monitoringoptionen für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung und weitere Stakeholder**

### **5.1 Nutzungs- und Unterhaltungsoptionen im Vorland zur Optimierung der Erosionsschutz- und Naturschutzfunktion**

Der WSV wird empfohlen, im Rahmen ihrer Planungen für Betrieb, Unterhaltung (gegebenenfalls auch Grundinstandsetzung bzw. Neubau bestehender Objekte/Ufersicherungen) und Ausbaumaßnahmen zu überprüfen, ob insbesondere an den Nebenarmen der Elbe, aber auch am Hauptstrom von Elbe und Weser, geeignete Uferbereiche existieren, an welchen probeweise technische Uferbefestigungen durch Erosionsschutzstreifen mit natürlichen Sicherungsfunktionen wie z. B. Röhrichte ersetzt werden können, so dass zu entwickelnde Röhrichte und Auenstrukturen den Uferschutz übernehmen. Sofern sich diese Erosionsschutzstreifen bewähren, können diese in den genannten Bereichen dauerhaft den Uferschutz übernehmen. Durch die Umsetzungen solcher geplanten und überprüften Maßnahmen wird das ökologische Potenzial genutzt, um die Ufer im Sinne des Naturschutzrechtes ökologisch "aufzuwerten". Dadurch werden Ökopunkte geschaffen, die dem Ökokonto zu Gute kommen. Eine analoge Überprüfung bzw. Vorgehensweise kann die WSV auch im Hinblick auf die Nutzungen im Vorland bzw. realisierbare Nutzungsextensivierungen durchführen. Diese Maßnahmen können dann auch positive Beiträge für die Erreichung der Ziele der WRRL liefern.

Aufgrund der im Klimawandel eingeschränkten Nutzbarkeit sowie zur Optimierung der Erosionsschutz- und Naturschutzfunktion ist es empfehlenswert, jegliche Ackernutzung im Vorland einzustellen, wie sie an der Weser noch zu finden ist.

Durch eine Nutzungsextensivierung des Grünlands insbesondere an der Tideelbe (die Ufer der Tideweser sind weitestgehend extensiviert) der Naturschutzwert deutlich erhöht werden, tendenziell auch der Erosionsschutzwert. Aufgrund bestehender naturschutzfachlicher Wertigkeiten von Grünland kann es zu Schutzkonflikten kommen. Für die Umsetzung sollte zunächst ein flächenscharfes Schutzkonzept erarbeitet werden, wo alle schutzbedürftigen Kompartimente inklusive des Ufers Berücksichtigung finden.

Die Sicherung und Erhöhung der Resilienz (Toleranz gegenüber Störungen) muss ein wesentlicher Teil des Risikomanagements des Klimaschutzes sein.

Für das Vorland heißt das u. a.: Das Mitwachspotenzial ist zu sichern und zu erhöhen. Dieses kann insbesondere erfolgen, wenn mehr Flächen identifiziert und geschaffen werden, in denen **ästuarine Überflutungsdynamik** wirken darf (vgl. Temmerman et al. 2013).

## 5.2 Einsatz der Ufervegetation für den Vorlandschutz

Die Wellenexperimente (Kapitel 3.2) haben gezeigt, dass Röhrichte eine messbare und quantifizierbare Reduktion der Wellenhöhe bewirken. Das gibt den Hinweis, dass breite Röhrichtufer zur Dämpfung der Hydrodynamik beitragen. Dadurch bilden sich breitere Röhrichtgürtel aus, die einen größeren Vorlandschutz als bisher bieten können. Erste Ansätze konnten in diesem Projekt geschaffen werden, um die Beschaffenheit solcher Naturufer inklusive ihrer quantifizierten Schutzfunktion zu berechnen. Entsprechende Maßnahmen dienen gleichzeitig Zielen der WRRL. Schröder et al. 2012 erläutert solche Maßnahme.

Zunächst sollten geeignete Flächen in ausreichender Größe für einen Uferrückbau identifiziert werden. An Ufern, die zu schmal für eine rein biologische Sicherung sind, bietet sich z. T. eine **Kombination aus technischem und biologischem Uferschutz** an.



**Abb. 5-1: Uferabbruch mit wieder angesiedelter Meer-Strandsimse an der Tegeler Plate**

Durch **die Förderung von unteren Wattbereichen und Flachwasserbereichen** verlieren die Wellen hier schon an Energie, so dass die Wellenbelastung für das Röhricht verträglicher wird. Die Röhrichte können dadurch die verbleibende Wellenenergie effektiver reduzieren. Das Zulassen von mehr Überflutungsdynamik bedeutet auch, dass es stellenweise zu Vorlandverlusten kommen kann. Abb. 5 2 zeigt, dass sich aber das Ufer nach stärkerer Erosion z. B. durch eine Sturmflut selbstständig regenerieren kann.

## 5.3 Schilfmahd im Weserästuar

Um Ufererosion im Tideröhricht vorzubeugen, sollten auch bei der Schilfmahd flusswärts ungemähte Randstreifen (Erosionsschutzstreifen) verbleiben.

Winterliche Schilfmahd bringt für Erosionsschutz- und Lebensraumfunktion des Tideröhrichts aus botanischer Sicht mehr Vorteile als Nachteile mit sich. Für eine Gesamtbewertung der Schilfmahd müssen außer botanischen auch zoologische, landschaftsbildbezogene und sozioökonomische Aspekte be-

rücksichtigt werden. Hierzu sollten im Weserästuar eingehende Untersuchungen durchgeführt werden.

#### **5.4 Monitoringbedarf und -optionen**

Die WSV ist gesetzlich mit der wasserwirtschaftlichen Unterhaltung beauftragt. Hierzu gehört die standortgerechte Entwicklung der Ufervegetation. Die Aufstellung eines Monitoringkonzepts für die Ufer- und Vorlandvegetation und die kontinuierliche Durchführung des Monitorings kann wesentlich bei der erfolgreichen Umsetzung des genannten Auftrags helfen. Ein Teil des Monitorings kann durch fernerkundliche Datenerfassung übernommen werden. Im Rahmen des KLIWAS-Projektes 3.09 wurden konkrete Vorschläge formuliert. Diese sind in Abschnitt 3.10 und ausführlicher in Heuner et al. (2013a, 2013b) nachzulesen. Einer der zentralen Punkte ist das Potenzial eines Monitorings mit Satellitendaten, das für Biotoypenerfassungen in Maßstäben von kleiner 1:10.000 eine kosten- und zeiteffiziente Möglichkeit darstellt. Hiermit lässt sich z. B. die Entwicklung von geschützten Lebensräumen wie Auwäldern, Röhrichtbeständen und Watt dokumentieren, um ggf. Maßnahmen gegen unerwünschte Veränderungen ergreifen zu können. Bei ähnlicher räumlicher Auflösung können mit flugzeuggestützten Hyperspektraldaten weiterreichende Auswertungen zur Vegetationsbedeckung vorgenommen werden als mit satellitengestützten Multispektraldaten.

## **6 Einordnung der Ergebnisse in den Stand des Wissens und weiterer Forschungsbedarf**

Die dargestellten Ergebnisse liefern neue Erkenntnisse zur Ökologie der Vorlandvegetation, auf Skalenebenen zwischen Laborexperiment und Ästuar und erklären Zusammenhänge bzgl. der Etablierung und Zonierung verschiedener Röhrichtarten. Auf der Basis von Vegetationsmodellen sowie der Nutzungsanalyse konnten Aussagen zur zukünftigen Verteilung von Röhricht- und anderen Biotoptypen getroffen werden.

Die Untersuchungsergebnisse zur Schilfmahd im Tideröhricht sind konträr zu Ergebnissen von Binnenseen. Dies zeigt die Wichtigkeit naturraumspezifischer Untersuchungen.

Hinsichtlich der durchgeführten Röhrichtuntersuchungen konnten neue Erkenntnisse erlangt werden über die Zonierung typischer Arten und ihre Wuchsformen in Abhängigkeit mit der Hydrodynamik, über einzelne Pflanzeigenschaften der Pionierröhrichte z. T. unter Welleneinfluss, über ihre Wellenreduktionsleistung, über ihre Vitalität bei unterschiedlichen Überstauungszeiten mit und ohne Konkurrenz, über ihre unterschiedliche Biomasseausprägungen und wie die einzelnen Einflussfaktoren das Röhrichtwachstum bestimmen.

Anwendung und Vergleich unterschiedlicher innovativer Fernerkundungsmethoden ergaben neue Monitoringoptionen. Es konnte gezeigt werden, dass zwei zentrale Funktionen wie die Uferschutz- und Lebensraumfunktion des Tideröhrichts durch die Auswirkungen des Klimawandels stärker beansprucht werden.

Bei der Arbeit am hier vorgestellten Projekt wurde deutlich, dass zu den folgenden Punkten dringender weiterer Forschungsbedarf besteht:

- Die hydro-morphodynamischen Schwellenwerte bzgl. Belastbarkeit der Vorlandvegetation sind erst teilweise bekannt.
- Der Einflussfaktor Wind in seiner Stärke, Richtung und Häufigkeit bedarf ebenfalls einer genaueren Betrachtung hinsichtlich der Ausbildung der Röhrichthabitats.
- Die Rückkopplung der Wirkung der Vegetationsveränderungen (klimabedingt und aufgrund vorgeschlagener Anpassungsoptionen) auf die Hydro- und Morphodynamik ist noch ungeklärt.
- Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere deutsche Ästuarare (insbesondere die Ems) ist zu prüfen.

- Der Einfluss des Bodensalzgehaltes auf die Vorlandvegetation ist nicht ausreichend geklärt.
- Der Einfluss wichtiger Neophytenarten auf die Uferstabilität ist bisher strittig.

Klimabedingte  
Änderung der  
Vorlandvegetation  
und ihrer Funktio-  
nen in Ästuaren  
sowie Anpas-  
sungsoptionen für  
die Unterhaltung

## 7 Danksagung

Wir erhielten Daten und praktische Unterstützung von den Wasser- und Schifffahrtsämtern Bremen, Bremerhaven und Hamburg, der Hamburg Port Authority (HPA) sowie Bremenports.

Ebenfalls Daten und/oder Betretungsgenehmigungen bekamen wir vom Bremischen Deichverband am rechten Weserufer, vom II. Oldenburgischen Deichband, von der Niedersächsische Wattenmeerstiftung, von der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg (BSU), dem Bezirksamt Hamburg-Mitte, dem Senator für Umwelt, Bau und Verkehr Bremen, dem Landesbetrieb Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN), dem Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR), dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), den Landkreisen Cuxhaven, Pinneberg, Stade, Steinburg und Wesermarsch, der Gesellschaft für Ökologische Planung e. V. (GÖP), planungsgruppe grün sowie zahlreichen Landeigentümern und Pächtern an Elbe und Weser.

Die Universität Lyon hat die Belastungsmessungen der Röhrichthalme von Meer-Standsimse und Salz-Teichsimse 2012 spontan übernommen. Des Weiteren bedanken wir uns für die konstruktive Anmerkungen und Vorschläge von Herrn Lange, Herrn Steege und Herrn Zierul zum Schlussbericht. Ihnen allen sei hiermit herzlich gedankt.

## 8 Literatur

- Araújo, M.B. & Rahbek, C. (2006): How does climate change affect biodiversity? *Science* 313 (5792): 1396-1397.
- Bauer, E.M. (in Vorbereitung): Auswirkungen der winterlichen Schilfmahd auf das Tideröhricht. Untersuchungsergebnisse für Weser und Wümme. (Zeitschriftenartikel).
- Beierkuhnlein, C. & Jentsch, A. (2013): Ökologische Auswirkungen klimatischer Extremereignisse. In: Essl F. & Rabitsch W. (Hrsg.): Biodiversität und Klimawandel in Mitteleuropa. Springer, 40-49.
- Berger, S. & Walther, G.R. (2007): Klimawandel und biologische Invasionen. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 46: 57-64.
- BfN (Hrsg.) (2008): Themenheft „Invasive Arten“. *Natur und Landschaft* 83, Heft 9/10.
- BMU (Hrsg.) (2007): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt.
- Bouma, T.J., De Vries, M.B., Low, E., Kusters, L. P., Herman, M.J., Tánzos, I.C., Temmerman, S., Hesselink, A., Meire, P. & van Regenmortel, S. (2005): Flow hydrodynamics on a mudflat and in salt marsh vegetation: identifying general relationships for habitat characterisations. *Hydrobiologia* 540: 259-274.
- Bouma, T.J., Friedrichs, M., van Wesenbeeck, B.K., Temmerman, S., Graf, G. & Herman, P.M.J. (2009): Density-dependent linkage of scale-dependent feedbacks: a flume study on the intertidal macrophyte *Spartina anglica*. *Oikos* 118: 260-268.
- Bratrich, C. & Jorde, K. (1997): Hydraulische und morphologische Modellierung von Fließgewässern mit dem Simulationsmodell CASIMIR: *Gewässerbiologie und Habitatmodellierung*. *Wasserwirtschaft* 7/8 97: 370-371.
- Bülow, K., Ganske, A., Hüttl-Kabus, S., Klein, B., Klein, H., Löwe, P., Möller, J., Schade, N., Tinz, B., Heinrich, H., Rosenhagen, G. (2014): Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse der Klimawandelszenarien für die Nordseeregion, Projektschlussbericht, KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-31/2014, KLIWAS-Projekt 2.01. BSH, DWD, Hamburg, 57 S.
- Carus, J. & Schröder, B. (2014 in Vorbereitung): Entwicklung und Anwendung mechanistischer Populationsmodelle für Tideröhricht und deren Aussagekraft für die zukünftige Röhrichtentwicklung. Abschlussbericht. KLIWAS Schriftenreihe. KLIWAS-?/2014, KLIWAS-Projekt 3.09.

- Carus, J., Unkelbach, M., Laß, J. & Schröder, B. (2014 in Vorbereitung): Analyse abiotischer und biotischer Treiber der Röhrchententwicklung im tidebeeinflussten Bereich der Elbe. Entwicklung und Parametrisierung von mechanistischen Wachstumsmodellen. Abschlussbericht. KLIWAS Schriftenreihe. KLIWAS-?/2014, KLIWAS-Projekt 3.09.
- Coops, H., Geilen, N. & Van der Velde, G. (1999): Helophyte zonation in two regulated estuarine areas in the Netherlands: Vegetation analysis and relationships with hydrological factors. *Estuaries* 22: 657-668.
- DAISIE (2009): Handbook of Alien Species in Europe. Springer, Dordrecht, <http://www.europe-aliens.org>.
- Dormann, C.F. (2007): Promising the future? Global change projections of species distributions. *Basic and Applied Ecology* 8: 387-397.
- Dormann, C.F., Blaschke, T., Lausch, A., Schröder, B. & Söndgerath, D. (Hrsg. / 2004): Habitatmodelle. Methodik, Anwendung, Nutzen. Tagungsband zum Workshop vom 8.-10. Oktober 2003 am Umweltforschungszentrum UFZ Leipzig/Halle. UFZ-Bericht 9/2004, 171 S.
- Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J.R.G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P.J., Münkemüller T., McClean, C., Osborne, P., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A., Zurell, D., Lautenbach, S. (2013): Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36(1): 27-46.
- Duve, J. (1999): Bilanzierung des Stoffaustausches zwischen Elbe und Deichvorland am Beispiel zweier tidebeeinflußter Untersuchungsgebiete. *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten*, Band 43, Hamburg.
- Ehlers, M., Janowsky, R., Gähler, M. (2003): Computergestützte Klassifizierung und Kartierung von Biotoptypen auf der Grundlage digitaler hochauflösender multispektraler Scannerdaten Wiederholungsbefliegung 2002. Hochschule Vechta Institut für Umweltwissenschaften, Vechta, 34 S.
- Engels, J.G. & Jensen, K. (2009): Patterns of wetland plant diversity along estuarine stress gradients of the Elbe (Germany) and Connecticut (USA) Rivers. *Plant Ecology & Diversity* 2: 301-311.
- Engels, J.G. & Jensen, K. (2010): Role of biotic interactions and physical factors in determining the distribution of marsh species along an estuarine salinity gradient. *Oikos* 119: 679-685.
- Faude, U. & Schmidlein, S. (2012): Querschnittsaufgabe Fernerkundung. Analyse von Störstellen, Röhricht- und Neophytenarten -

Abschlussbericht. KLIWAS Schriftenreihe, KLIWAS-5/2012,  
KLIWAS-Projekt 3.09. BfG, Koblenz, 86 S.

Faude, U., Heuner, M., Bauer, E.M., Kleinschmit, B., Schiewe, J., Schröder, U. & S. Schmidtlein (2011): Detektion von Störstellen und Neophyten im Ästuarvorland der Elbe mittels neuartiger Fernerkundungsdaten und –verfahren. In: Traub, K.-P., Kohlhus, J. & T. Lüllwitz: Geoinformationen für die Küstenzone, Band 3: 213-223.

Firely, F. (2011): Was ist Silicium bzw. Kieselsäure? <http://www.silicium-kieselsaeure.com/>, letzter Zugriff: 19.12.2013.

Fuchs, E., Bauer, E.M., Heuner, M., Schmidt-Wygasch, C. & Schröder, U. (2013): Interdisciplinary research on new approaches for future management of the River Elbe, Proceedings of HP1. IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly. Deltas: Landforms, Ecosystems and Human Activities, Gothenburg, Sweden, 168-175.

Gähler, M., Janowsky, R., Schröder, U. (2001): Automatisierte Biotoptypenklassifizierung auf Basis höchstauflösender Flugzeugscannerdaten, In: Blaschke, T. (Hrsg.), Fernerkundung und GIS, Neue Sensoren – innovative Methoden, Heidelberg, 233-240.

Goldman Martone, R. & Wasson, K. (2008): Impacts and interactions of multiple human perturbations in a California salt marsh. *Oecologia* 158: 151-163.

Goodchild, M. F. & Gopal, S. (1989): *The Accuracy of Spatial Databases*. (Taylor & Francis) London.

Gröngröft, A. & Schwartz, R. (1999): Eigenschaften und Funktionen von Auenböden an der Elbe. *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten*, Band 44.

Guisan, A. & Zimmermann, N. (2000): Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135: 147-186.

He, K. S., Rocchini, D., Neteler, M. & H. Nagendra (2011): Benefits of hyperspectral remote sensing for tracking plant invasions. *Diversity and Distributions*, Vol.17, 381-392.

Hein, H., Mai, S. & Barjenbruch, U. (2013): The long way from uncertain data and knowledge to adaptive management of coastal waterways, Conference Proceedings of the European Climate Change Adaptation Conference, Hamburg.

Heuner, M., Bahls, A., Bauer, E.M., Faude, U., Kinkeldey, C., Kleinschmit, B., Schmidtlein, S., Schiewe, J. & Schröder, U., (2013b): Querschnittsaufgabe Fernerkundung. Synoptische Betrachtung fernerkundungsgestützter Vegetationserfassung - ihre Genauigkeit,

Unsicherheiten und Grenzen. KLIWAS Schriftenreihe, KLIWAS-15/2013, KLIWAS-Projekt 3.09. BfG, Koblenz, 36 S.

Heuner, M., Bahls, A., Bauer, E.M., Kinkeldey, C., Faude, U., Kleinschmit, B., Schiewe, J., Schmidlein, S. & Schröder, U., (2013a): Erfassung der Vorlandvegetation durch innovative Fernerkundungsmethoden unter Berücksichtigung von Unsicherheiten. In: Traub, K.-P., Kohlus, J. & Lüllwitz, T. (Hrsg.): Geoinformationen für die Küstenzone. Band 4, Beiträge des 4. Hamburger Symposiums zur Küstenzone und Beiträge des 9. Strategie-Workshops zur Nutzung der Fernerkundung im Bereich der BfG/Wasser- und Schifffahrtsverwaltung. Sokrates & Freunde, Koblenz, 247-259.

Heuner, M., Schröder, B., Schröder, U. & Kleinschmit, B. (eingereicht)  
Hydrodynamics essentially drive responses in marsh vegetation to the elevational gradient in North Sea estuaries.

Heuner, M., Silinski, A., Schoelynck, J., Bouma, B., Puijalon, S., Troch, P., Fuchs, E., Schroeder, B., Schroeder, U., Meire, P. & Temmerman, S. (in Begutachtung): Ecosystem engineering by plants on wave-exposed intertidal flats is governed by cross-level feedbacks from cellular up to population traits.

Hirzel, A. H., Le Lay, G., Helfer, V., Randin, C. & Guisan, A. (2006): Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences. *Ecological Modelling* 199(2): 142-152.

Jensen, K. & Suchrow, S. (2005): Salzrasen entlang der deutschen Nordseeküste: Einfluss von standörtlichen Gradienten und Nutzungsintensität auf die Vegetationsverteilung. In: Fansa, M. (Hrsg.): Kulturlandschaft Marsch. Natur, Geschichte, Gegenwart. Isensee-Verlag, Oldenburg, 214-229.

Jentsch, A, Buhk, C, Beierkuhnlein, C, Steinbauer, M & Alt, M. (2012): Disturbances and Biodiversity in the Fichtelgebirge, *Biodiversity & Ecology*, 4, 364-364, doi:10.7809/b-e.00155

Kawamura, K., Watanabe, N., Sakanoue, S., & Y. Inoue (2008): Estimating forage biomass and quality in a mixed sown pasture based on partial least squares regression with waveband selection. *Grassland Science*, Vol. 54, 131-145

Kinkeldey, C. & Schiewe, J. (2012): Visualisierung thematischer Unsicherheiten mit „Noise Annotation Lines“ Visualization of Thematic Uncertainties Using “Noise Annotation Lines”. *Kartographische Nachrichten* 62 (5): 241-249.

Kleinschmit, B. & Bahls, A. (2012): Querschnittsaufgabe Fernerkundung. Konzeption für ein Langzeitmonitoring der gezeitenbeeinflussten

- Vegetation mit hochauflösenden Satellitendaten. Abschlussbericht. KLIWAS Schriftenreihe, KLIWAS-13/2012, KLIWAS-Projekt 3.09. BfG, 86 S.
- Kraft, D. (2004): Modellierung klimabedingter Nutzungsveränderungen: Bewertung von Klimaveränderungen durch das GIS-gestützte Computermodell BONU. Dissertation, Universität Bremen, GCA-Verlag, 125 S.
- Kühn, I., Sykes, M.T., Berry, P.M., Thuiller, W., Piper, J.M., Nigmann, U., Araújo, M.B., Balletto, E., Bonelli, S., Cabeza, M., Guisan, A., Hickler, T., Klotz, S., Metzger, M., Midgley, G., Musche, M., Olofsson, J., Paterson, J.S., Penev, L., Rickebusch, S., Rounsevell, M.D.A.R., Schweiger, O., Wilson, E., Settele, J. (2008): MACIS: Minimisation of and Adaptation to Climate change Impacts on biodiversity. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 17/4: 393-395
- Lösch, R., Schmitz, U. & Dericks, G. (2007): Neophyten und Global Change – am Beispiel der Stromtalau des Rheins. *Jahrbuch für Naturschutz und Landschaftspflege* 56 (1): 128-137.
- Maier, M., Exo, K.-M., Stahl, J. (2008): Nationalpark Wattenmeer als Chance für Wiesenpieper und Rotschenkel? Auswirkungen von Nutzungsänderungen in Salzwiesen auf Wiesenbrüter. *Eureco-GfÖ 2008*, Leipzig. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie* 38: 829.
- Meire, P., van Damme, S., Struyf, E., Maris, T. & Backx, H. (2007): Ecosystem services: a key element in protecting biodiversity of wetlands, rivers and estuaries. In: Bourdeau, P. (Hrsg.): *The millennium ecosystem assessment: implications for Belgium: proceedings of a conference held in Brussels, Belgium, 27 October 2006*, Brussels, Royal Academies of Sciences and the Arts of Belgium, 41-56.
- Meyerdirks, J. (2008): Analyse der Klimasensitivität von Gebieten mit besonderer Bedeutung für Natur und Landschaft im Bereich der deutschen Nordseeküste: Ermittlung des naturschutzfachlichen Wertbestandes durch das GIS-gestützte Bewertungssystem INFAB. Dissertation, Universität Bremen, GCA-Verlag, 175 S.
- Minchinton, T.E. (2002): Disturbance by wrack facilitates spread of *Phragmites australis* in a coastal marsh. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 281: 89-107.
- Osterkamp, S. (2006): GIS-gestützte Modellierung der räumlichen Verteilung der Vegetation im Tidebereich von Ästuaren unter den Bedingungen einer Klimaänderung mittels der Klassifikations- und Regressionsanalyse (CART) am Beispiel der Unterweservorländer. Dissertation, Universität Bremen, Netzpublikation, Deutsche Nationalbibliothek.

- Osterkamp, S., Kraft, D. & Schirmer, M. (2001): Climate Change and the Ecology of the Weser Estuary Region: assessing the impact of an abrupt change in climate. - *Journal of Climate Research* 18, 97-104
- Petersen, J., Dassau, O., Dauck, H.P., Janinhoff, N. (2010): Applied vegetation mapping of large-scale areas based on high resolution aerial photographs – a combined method of remote sensing, GIS and near comprehensive field verification, In: Marencic, H., Eskildsen, K., Farke, H., Hedtkamp, S. (Hrsg.), 12th International Scientific Wadden Sea Symposium. Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, Germany, 75-79.
- Peterson, J., Dassau, O., Dauck, H.P. & Janinhoff, N. (2010): Applied vegetation mapping of large-scale areas based on high resolution aerial photographs - a combined method of remote sensing, GIS and near comprehensive field verification. In: Marencic, H., Eskildsen, K., Farke, H., Hedtkamp, S. (Hrsg.), 12th International Scientific Wadden Sea Symposium. Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, Germany, 75-79.
- Pompe, S., Berger, S., Bergmann, J., Badeck, F., Lübbert, J., Klotz, S., Rehse, A.-K., Söhlke, G., Sattler, S., Walther, G.-R. & Kühn, I. (2011): Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora und Vegetation in Deutschland. BfN-Skripten 304. S. 95 + Anhang.
- Pompe, S., Berger, S., Walther, G.R., Badeck, F., Hanspach, J., Sattler, S., Klotz, S. & Kühn, I. (2009): Mögliche Konsequenzen des Klimawandels für die Pflanzenwelt in Deutschland. *Natur & Landschaft* 84, 2-7.
- Raabe, E.W. (1986): Die Gliederung der Ufervegetation der Elbe unterhalb Hamburg (Abschrift eines Manuskripts aus dem Jahr 1974). *Mitteilungen zum Natur- und Umweltschutz in Hamburg* 2, 117-141.
- Reineking, B. & Schröder, B. (2004): Variablenselektion. *UFZ-Bericht* 9/2004, 39-45.
- Roeder, A. (2010): Überflutungstoleranz der Neophyten *Impatiens glandulifera* und *Fallopia japonica*. Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Biozentrum Klein Flottbek, 67 S.
- Schiewe, J. & Kinkeldey, C. (2013): Querschnittsaufgabe Fernerkundung Abschlussbericht Modellierung und Visualisierung von Unsicherheiten. KLIWAS Schriftenreihe, KLIWAS-14/2013, KLIWAS-Projekt 3.09. BfG, Koblenz, 64 S.
- Schiewe, J. (2010): Einsatz von Methoden zur interaktiven Visualisierung und Analyse von Unsicherheiten bei der Auswertung von Geodaten. *GIS Science* 23-1, 26–33.

- Schirmer, M., Kraft, D. & Wittig, S. (2004): Küstenökologische Aspekte des Klimawandels. Endbericht des Teilprojekt 3 im Projekt "Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste (KRIM)".
- Schirmer, M. & Schuchardt, B. (Hrsg.) (1999): Die Unterweserregion als Natur-, Lebens- und Wirtschaftsraum. Eine querschnittsorientierte Zustandserfassung. Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung.
- Schmitz, U., Ristow, M., May, R. & Bleeker W. (2008): Hybridisierung zwischen Neophyten und heimischen Pflanzenarten in Deutschland. Untersuchungen zur Häufigkeit und zum Gefährdungspotential. *Natur und Landschaft* 83: 444-451.
- Schoelynck, J., Bal, K., Baclx, H., Okruszko, T., Meire, P. & Struyf, E. (2010): Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: a strategic choice between silica, lignin and cellulose? *New Phytol.* 186: 385-391.
- Schoenberg, W., Kleiß, K. & Jensen, K. (2012): Effekte des Überflutungsregimes auf tidebeeinflusste Röhrichte. Abschlussbericht, Biozentrum Klein Flottbek, Universität Hamburg, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 42 S.
- Scholz, M, Stab, S., Dziock, F. & Henle, K. (Hrsg.) (2005): Lebensräume der Elbe und ihrer Auen. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft. Bd. 4, Weißensee, Berlin.
- Schröder, B. & Reineking, B. (2004): Validierung von Habitatmodellen. *UFZ-Bericht 9/2004*: 47-56.
- Schröder, U. (2005): Analysis of Shift in Reed Habitats along the Tidal River Elbe. In: Erasmi, S., Cyffka, B., M., K. (Hrsg.), *Remote Sensing & GIS for Environmental Studies: Applications in Geography*; Göttinger Geographische Abhandlungen, Göttingen, 109-115.
- Schröder, U., Heuner, M. & Fuchs, E. (2012): Habitatmodelle für Tideröhrichte und ihr Nutzen für eine naturnahe Ufergestaltung im Elbästuar. 1. Ökologisches Kolloquium 14./15. Februar 2012. Bundesanstalt für Gewässerkunde, 3-17.
- Schuchardt, B. & Schirmer, M. (Hrsg.) (2004): Klimawandel und Küste. Die Zukunft der Unterweserregion. Springer: Umweltnatur- & Umweltsozialwissenschaften.
- Schuchardt, B. & Schirmer, M. (Hrsg.) (2007): Land unter? Klimawandel, Küstenschutz und Risikomanagement in Nordwestdeutschland: die Perspektive 2050. oekom Verlag, München: 243 S.
- Schuchardt, B. (1997): Auenrevitalisierung an der Unterweser bei stark anthropogen verändertem Tidehub: Leitbilder und

Umsetzungsmöglichkeiten. Bremer Beiträge für Naturkunde und Naturschutz 3: 53-61.

Schuchardt, B., Bildstein, T., Huber, A., Kraft, D. & Meyerdirks, J. (2013a): KLIWAS 3.09 „Änderung der Vorlandvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung“. Teilprojekt „Nutzungsanalyse Ästuare für die Vorländer von Elbe- und Weserästuar vor dem Hintergrund des Klimawandels“. Teil 1: Status Quo Vorland Elbe und Weser. Bericht, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 184 S.

Schuchardt, B., Wittig, S., Bildstein, T. & Kraft, D. (2013b): KLIWAS 3.09 „Änderung der Vorlandvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung“. Teilprojekt „Nutzungsanalyse Ästuare für die Vorländer von Elbe- und Weserästuar vor dem Hintergrund des Klimawandels“. Teil 2: Ableitung von klimabedingten Topographieänderungen (Szenarien) der Vorländer des Weser- und Elbe Ästuars (Ergebnis der Literaturrecherche und Ableitung der „Mitwachs-Szenarien“). Bericht, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 90 S.

Schuchardt, B., Bildstein, T., Wittig, S. & Kraft, D. (2013c): KLIWAS 3.09 „Änderung der Vorlandvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung“. Teilprojekt „Nutzungsanalyse Ästuare für die Vorländer von Elbe- und Weserästuar vor dem Hintergrund des Klimawandels“. Teil 3: Zukunftsszenarien. Bericht, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 96 S.

Schuchardt, B., Bildstein, T., Lange, H., Lange, J., Lee, C., Pestke, S., Osthorst, W., Schirmer, M., David, W. & Winter, G. (2004): Retrospektive Analyse größerer Planverfahren in der Küstenzone unter der Perspektive „IKZM-Tauglichkeit“. EUCC - Die Küsten Union Deutschland e.V. (Hrsg.), Coastline Reports 3, Rostock. 121 S.

Schuchardt, B., Scholle, J., Schulze, S. & Bildstein, T. (2007): Vergleichende Bewertung der ökologischen Situation der inneren Ästuare von Eider, Elbe, Weser und Ems: Was hat sich nach 20 Jahren verändert? In: Gönnert, G., Pflüger, B. & Bremer, J.A. (Hrsg.), Von der Geoarchäologie über die Küstendynamik zum Küstenzonenmanagement. Coastline Reports 9: 15-26.

Schuster, C., Förster, M., Kleinschmit, B. (2012a): Testing the red edge channel for improving land-use classifications based on high-resolution multi-spectral satellite data. In: International Journal of Remote Sensing, 33:17. 5583-5599.

Schuster, C., Förster, M., Schmidt, T., Kolbe, M., Frick, A., Kleinschmit, B. (2012b): Change Detection Analyse für das flächendeckende

Biodiversitätsmonitoring zur Erfüllung der EU FFH-Richtlinie mit Hilfe von RapidEye und TerraSAR-X Satellitendaten. Schlussbericht CARE-X-Projekt, S. 103.

- 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 Ästuare. Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports. Projektschlussbericht. KLIWAS Schriftenreihe, KLIWAS-36/2014, KLIWAS-Projekt 2.04 und 3.02. BAW, Hamburg, 103 S.
- Silinski, A.; Heuner, M.; Schoelynck, J.; Puijalon, S.; Schröder, U.; Fuchs, E.; Troch, P.; Bouma, T.; Meire, P.; Temmerman, S. (im Druck): Effects of Wind Waves versus Ship Waves on Tidal Marsh Plants: A Flume Study on different Life Stages of *Scirpus maritimus*. PLOS ONE.
- Suchrow, S. & Jensen, K. (2010): Plant Species Responses to an Elevational Gradient in German North Sea Salt Marshes. *Wetlands* 30: 735-746.
- Temmerman, S., Govers, G., Wartel, S. & Meire, P. (2004): Modelling estuarine variations in tidal marsh sedimentation: response to changing sea level and suspended sediment concentrations. *Marine geology* 212: 1-19.
- Temmerman, S., Meire, P., Bouma, T.J., Herman, P.M.J., Ysebaert, T. & De Vriend, H.J. (2013): Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature* 504, 79-83.
- Valiela, I. & Rietsma, C.S. (1995): Disturbance of salt marsh vegetation by wrack mats in Great Sippewissett Marsh. *Oecologia* 102: 106-112.
- Van Hulzen, J.B., Bouma, T.J. & van Soelen, J. (2006): The significance of spatial and temporal patterns of algal mat deposition in structuring salt marsh vegetation. *Journal of Vegetation Science* 17(3): 291-298.
- Vandenbruwaene, W., Temmerman, S., Bouma, T.J., Klaassen, P.C., de Vries, M.B., Callaghan, D.P., van Steeg, P., Dekker, F., van Duren, L.A., Martini, E., Balke, T., Biermans, G., Schoelynck, J., Meire, P., (2011): Flow interaction with dynamic vegetation patches: Implications for biogeomorphic evolution of a tidal landscape. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 116, F01008. 116, DOI: 10.1029/2010JF001788.
- Vogt, J., Fonti, P., Conedera, M. & Schröder, B. (2006): Temporal and spatial dynamics of stool uprooting in abandoned chestnut coppice forests. *Forest Ecology and Management* 235(1-3): 88-95.

Wang, C. & Temmerman, S. (2013): Does bio-geomorphic feedback lead to abrupt shifts between alternative landscape states? An empirical study on intertidal flats and marshes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. DOI: 10.1002/jgrf.20027.

Zurell D., Grimm, V., Rossmannith, E., Zbinden, N., Zimmermann, N.E., Schröder, B. (2012b): Uncertainty in predictions of range dynamics: Black grouse climbing the Swiss Alps. *Ecography* 35: 590-603

Zurell, D., Elith, J., Schröder, B. (2012a): Predicting to new environments: tools for visualizing model behaviour and impacts on mapped distributions. *Diversity and Distributions* 18(6): 628–634.

## 9 Abkürzungen

ANOVA	Analysis of Variance
AUC	Area under the curve
DGM	Digitales Geländemodell
GIS	Geographisches Informationssystem
IBP	Integrierter Bewirtschaftungsplan
LIDAR	Light Detection and Ranging
MThw	Mittleres Tidehochwasser
UW	Unterweser
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WStrG	Wasserstraßengesetz
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung

# Anhang

## Anhang I: Produkt- und Publikationsliste

Abschließende Zeitschriftenartikel sind in Vorbereitung.

- Bauer, E.M. & Heuner, M. (2010): Ästuarvegetation und Vorlandschutz im Klimawandel. Poster, 06./07.10.2010, 3. Hamburger Symposium "Geoinformationen für die Küstenzone", HCU Hamburg. [http://www.gis-kueste.de/2010/sbt/KLIWAS\\_309\\_Poster\\_Gesamtprojekt\\_A4\\_20101005.pdf](http://www.gis-kueste.de/2010/sbt/KLIWAS_309_Poster_Gesamtprojekt_A4_20101005.pdf)
- Bauer, E.M. & Heuner, M. (2013): Die Vegetation an Tideelbe und Tideweser im Klimawandel. Ergebnisse aus dem KLIWAS-Projekt „Ästuarvegetation und Vorlandschutz“ sowie dem BfG-Projekt „Biogene Uferstabilisierung“. DOI: 10.5675/Tideelbe\_Tideweser\_Klima\_2013  
[http://doi.bafg.de/BfG/2013/Tideelbe\\_Tideweser\\_Klima\\_2013.pdf](http://doi.bafg.de/BfG/2013/Tideelbe_Tideweser_Klima_2013.pdf)
- Bauer, E.M. & Sundermeier, A. (2011): The increasing importance of reed harvest in the Weser estuary and its influence on the vitality of Common reed (*Phragmites australis*). Abstractband, 54th Symposium of the IAVS: “Vegetation in and around water: Patterns, processes and threats”, 20-24.6.2011, Lyon, S 61.
- Bauer, E.M. (in Vorbereitung): Auswirkungen der winterlichen Schilfmahd auf das Tideröhricht. Untersuchungsergebnisse für Weser und Wümme. (Zeitschriftenartikel).
- Bauer, E.M., Faude, U. & Heuner, M. (2013): Ursachen und Wirkungen von Störungen in der Ästuarvegetation. Poster, Geobotanisches Kolloquium, 5.7.2013, Universität Freiburg.
- Bauer, E.M., Faude, U. & Heuner, M. (2013): Causes and effects of disturbances estuarine vegetation. Poster, European Vegetation Survey, 22th Workshop, 8-11.4.2013, Accademia dei Lincei-Orto Botanico, Rom.
- Bauer, E.M., Heuner, M., Fuchs, E., Schröder, U. & Sundermeier, A. (2013): Vorlandvegetation in Nordseeästuaren. In: Mehling, A.: Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt. Entwicklung von Anpassungsoptionen. Ausgewählte, vorläufige Ergebnisse zur 3. Statuskonferenz am 12./13.11. 2013, KLIWAS-22/2013, 44-46  
[http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/02\\_Aktuelles/12\\_statuskonf\\_2013/kliwas\\_kompakt\\_1311.pdf?\\_blob=publicationFile](http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/02_Aktuelles/12_statuskonf_2013/kliwas_kompakt_1311.pdf?_blob=publicationFile)
- Bauer, E.M., Heuner, M., Fuchs, E., Schröder, U. & Sundermeier, A. (2012): Ästuarvegetation und Vorlandschutz. In: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland, 2. Statuskonferenz, 25./26.10.2011, Berlin, 144-146.  
[http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Service/Downloads/Publikationen/tagung\\_sband\\_oktober\\_2011\\_berlin.pdf?\\_blob=publicationFile](http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Service/Downloads/Publikationen/tagung_sband_oktober_2011_berlin.pdf?_blob=publicationFile)
- Bauer, E.M., Heuner, M., Fuchs, E., Schröder, U. & Sundermeier, A. (2011): Ästuarvegetation und Vorlandschutz im Klimawandel. 2. KLIWAS-Statuskonferenz, 25/26.10.2011, Berlin. Poster.  
[http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/02\\_Aktuelles/07\\_statuskonf\\_2011/04\\_pos](http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/02_Aktuelles/07_statuskonf_2011/04_pos)

[ter/Downloads/Poster20\\_Aestuarvegetation\\_Vorlandschutz.pdf?\\_blob=publicationFile](#)

- Bauer, E.M., Heuner, M., Fuchs, E., Schröder, U. & Sundermeier, A. (2010): Vegetation shift in German estuaries due to climate change? Conference Proceedings "Deltas in Times of Climate Change", 29.9.-1.10.2010, Rotterdam, 84-85.
- Bauer, E.M., Heuner, M., Schröder, U., Kleinschmit, B., Schiewe, J. & Schmidtlein, S. (2010): Ästuarvegetation und Vorlandschutz im Klimawandel. Nutzung von Fernerkundungsmethoden. Poster, 06./07.10.2010, 3. Hamburger Symposium "Geoinformationen für die Küstenzone", HCU Hamburg.  
[http://www.gis-kueste.de/2010/sbt/KLIWAS\\_309\\_Poster\\_TeilprojektFernerkundg\\_A4\\_20101005.pdf](http://www.gis-kueste.de/2010/sbt/KLIWAS_309_Poster_TeilprojektFernerkundg_A4_20101005.pdf)
- Bräuer, P. (2013a): Biomechanik der Strandsimse (*Bolboschoenus maritimus*). Bericht, Technische Universität Dresden, Fakultät für Biologie, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 22 S. + Anhang.
- Bräuer, P. (2013b): Biomechanik des Schilfrohrs (*Phragmites australis*). Bericht, Technische Universität Dresden, Fakultät für Biologie, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 24 S. + Anhang.
- Carus, J., Heuner, M. & Schröder, B. (2013): Influence of tidal hydrodynamic on marsh vegetation in the Elbe estuary. In: Jelsch, F. & Joshi, J. (Hrsg.): 43rd Annual Meeting of the Ecological Society of Germany, Austria and Switzerland (GfÖ): "Building bridges in ecology – linking systems, scales and disciplines", Book of Abstracts, 9-13.9.2013, Potsdam, S. 92/93.
- Carus, J., Unkelbach, M., Laß, J. & Schröder, B. (2014 in Vorbereitung): Analyse abiotischer und biotischer Treiber der Röhrichtentwicklung im tidebeeinflussten Bereich der Elbe. Entwicklung, Parametrisierung und Anwendung von mechanistischen Wachstumsmodellen. Abschlussbericht. KLIWAS Schriftenreihe. KLIWAS-?/2014, KLIWAS-Projekt 3.09.
- Faude, U. & Schmidtlein, S. (2012): Querschnittsaufgabe Fernerkundung. Analyse von Störstellen, Röhricht- und Neophytenarten. KLIWAS-5/2012, KLIWAS-Projekt 3.09, 54 S., Koblenz. DOI: 10.5675/KLIWAS\_5.2012\_Fernerkundung\_1.  
[http://doi.bafg.de/KLIWAS/2012/Kliwas\\_5.2012\\_Fernerkundung\\_1.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2012/Kliwas_5.2012_Fernerkundung_1.pdf)
- Faude, U., Feilhauer, H., Heuner, M., Bauer, E.M., Schröder, U., Kleinschmit, B., Schiewe, J. & Schmidtlein, S. (2011): Multiseasonal mapping of tidal floodplains at the Elbe estuary. GfÖ, 05-09.09.2011, Oldenburg. Poster.
- Faude, U., Feilhauer, H., Heuner, M., Bauer, E.M., Schröder, U., Kleinschmit, B., Schiewe, J. & Schmidtlein, S. (2011): Multiseasonal mapping of tidal floodplains at the Elbe estuary. In: Minden, V. (2011): 41st Annual Meeting of the Ecological Society of Germany, Austria and Switzerland (GfÖ): "Ecological Functions, Patterns, Processes", Book of Abstracts. 5-9.09.2011, Oldenburg, Abstract number L1-P5.
- Faude, U., Heuner, M., Bauer, E.M., Kleinschmit, B., Schiewe, J., Schröder, U. & Schmidtlein, S. (2011): Detektion von Störstellen und Neophyten im Ästuar-

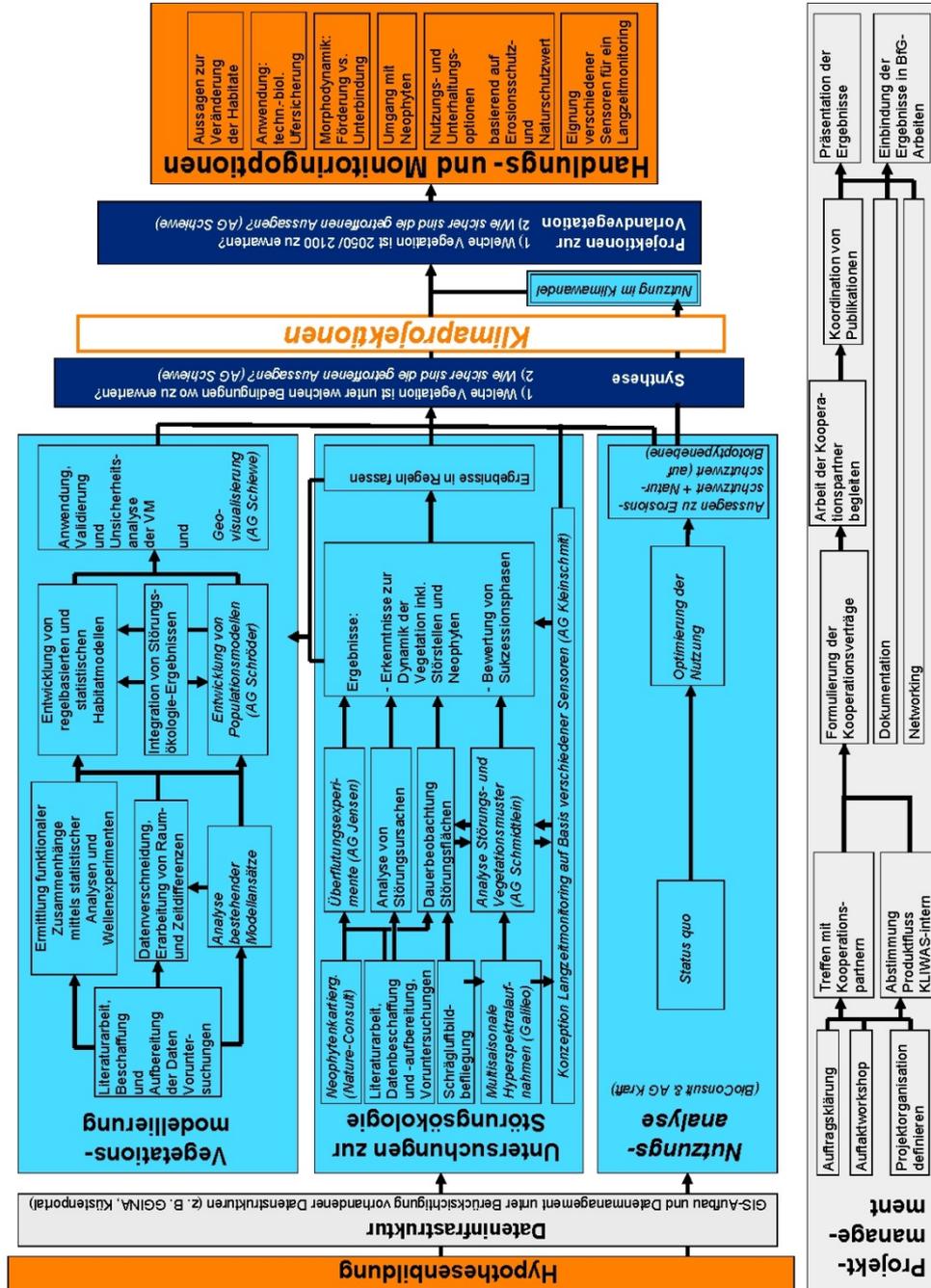
- vorland der Elbe mittels neuartiger Fernerkundungsdaten und -verfahren. In: Traub, K.P., Kohlhus, J. & T. Lüllwitz (Hrsg): Geoinformationen für die Küstenzone, Beiträge des 3. Hamburger Symposiums zur Küstenzone, 8. Strategie-Workshop zur Nutzung der Fernerkundung im Bereich der BfG/ WSV, 06.-08.10.2010, HCU Hamburg, Points Verlag Norden, 213-224.
- Frank M. (2010): Multitemporale Erfassung von gestörten Röhrichtflächen im Deichvorland der Tideelbe für die Vegetationsperiode 2010 mittels eines hyperspektralen, flugzeuggestützten Sensors. Technischer Bericht der Galileo Group Inc., Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde. 18 S.
- Galileo Group, Inc (2011): Multitemporale Hyperspektraldaten zur Erfassung von gestörten Röhrichtflächen im Deichvorland der Tideelbe für die Vegetationsperiode 2010 im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde im Rahmen des KLIWAS-Projekts 3.09 Ästuarvegetation. Datensatz. DOI: 10.5675/BFG\_KLIWAS\_Multitemporale\_Hyperspektraldaten\_Tideelbe\_2010.
- Geiger, J. (in Vorbereitung): Untersuchung von Störungsmustern und Sukzession im Röhrichtgürtel der Tideelbe. Auswertung eines Passiven Monitorings im Zeitraum von 2010-2013. Bachelorarbeit, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf.
- Gevers, J. & Schröder, B. (2011): A mechanistic population model for *Phragmites australis* in tidal marshes. Poster, GfÖ-Tagung, 5.-9.9.2011, Oldenburg.
- Gevers, J. & Schröder, B. (2011): A mechanistic population model for *Phragmites australis* in tidal marshes. In: Minden, V. (Hrsg.): Abstractband, 41st Annual Meeting of the Ecological Society of Germany, Austria and Switzerland (GfÖ): “Ecological Functions, Patterns, Processes”, 5.-9.9.2011, Oldenburg, Abstract number F1-P4.
- Gevers, J., Unkelbach, M., Laß, J. Schröder, B. (2013): Analyse abiotischer und biotischer Treiber der Röhrichtentwicklung im tidebeeinflussten Bereich der Elbe. Entwicklung und Parametrisierung von mechanistischen Wachstumsmodellen. Zwischenbericht. Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde. 71 S.
- Gevers, J. & Schröder, B. (2011): Development of a mechanistic population model for tidal reeds. Poster, IAVS-Conference, 20.-24.06.2011, Lyon.
- Gevers, J. & Schröder, B. (2011): Mechanistic modelling of *Phragmites australis* in tidal marshes. Poster, 2. KLIWAS-Statuskonferenz, 25/26.10.2011, Berlin. [http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/02\\_Aktuelles/07\\_statuskonf\\_2011/04\\_poster/Downloads/Poster19\\_Mechanistic\\_modelling\\_Phragmites.pdf?\\_blob=publicationFile](http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/02_Aktuelles/07_statuskonf_2011/04_poster/Downloads/Poster19_Mechanistic_modelling_Phragmites.pdf?_blob=publicationFile)
- Gevers, J. (2011): Development of a mechanistic population model for tidal reeds. Abstractband, 54th Symposium of the IAVS: “Vegetation in and around water: Patterns, processes and threats”, 20-24.6.2011, Lyon, 118.
- Heuner, M, Schröder, U. & Kleinschmit, B. (2011): Hydrodynamics – effects on habitat niches of marsh species in the Elbe estuary. Poster (wissenschaftliche Version), GfÖ, 5-9.9.2011, Oldenburg.

- Heuner, M, Schröder, U. & Kleinschmit, B. (2011): Hydrodynamics. Effects on habitat niches of marsh species in the Elbe estuary. Poster (gekürzte Version), 2. KLIWAS-Statuskonferenz, 25/26.10.2011, Berlin.
- Heuner, M, Schröder, U. & Kleinschmit, B. (2011): Modellierung von Röhricharten in Ästuaren entlang des Longitudinalgradienten. In: Haase, D. & Kleinschmit, B (Hrsg.): Abstractband, IALE-D Jahrestagung, 12-14.10.2011, Erwin-Schrödinger-Zentrum Berlin.  
[http://www.iale.de/fileadmin/user\\_upload/PDFs/IALE-Jahrestagung\\_2011/Tagungsband\\_2011.pdf](http://www.iale.de/fileadmin/user_upload/PDFs/IALE-Jahrestagung_2011/Tagungsband_2011.pdf)
- Heuner, M. & Kleinschmit, B. (2011): Hydrodynamics – Its effect on habitats of reed species along North Sea estuaries. In: Minden, V. (Hrsg.): 41st Annual Meeting of the Ecological Society of Germany, Austria and Switzerland (GfÖ): “Ecological Functions, Patterns, Processes”, Abstractband, 5-9.9.2011, Oldenburg, Abstract number F1-P3.
- Heuner, M. & Schröder, U. (2011): Neue Sensoren, neue Methoden – Neue Wege der Fernerkundung in der Vegetationskunde. In: BfG-Veranstaltungen 3/2011: Zeitgemäße Erfassung und Bereitstellung von Geobasisdaten für die WSV, 06.-07.04.2011, Koblenz, 125-134. ISSN 1866-220X.
- Heuner, M., Bahls, A., Bauer, E.M., Kinkeldey C., Faude, U., Kleinschmit, B., Schiewe, J., Schmidlein, S. & Schröder, U. (2013): Synoptische Betrachtung fernerkundungsgestützter Vegetationserfassung – ihre Genauigkeit, Unsicherheiten und Grenzen. Querschnittsaufgabe Fernerkundung. KLIWAS-Projekt 3.09. KLIWAS-15/2013, KLIWAS-Projekt 3.09, 26 pp. DOI: 10.5675/Kliwas\_15.2013\_Fernerkundung\_4.  
[http://doi.bafg.de/KLIWAS/2013/Kliwas\\_15.2013\\_Fernerkundung\\_4.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2013/Kliwas_15.2013_Fernerkundung_4.pdf)
- Heuner, M., Bahls, A., Bauer, E.M., Kinkeldey C., Faude, U., Kleinschmit, B., Schiewe, J., Schmidlein, S. & Schröder, U. (2013): Erfassung der Vorlandvegetation durch innovative Fernerkundungsmethoden unter Berücksichtigung von Unsicherheiten. In: Traub, K.P., Kohlus, J. & Lüllwitz, T. (Hrsg): Geoinformationen für die Küstenzone, Band 4, Beiträge des 4. Hamburger Symposiums zur Küstenzone und Beiträge des 9. Strategie-Workshops zur Nutzung der Fernerkundung im Bereich der BfG/Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, Points Verlag Norden, 247-259.
- Heuner, M., Bauer, E.M., Burger, B., Fuchs, E., Gehres, N., Kleisinger, C., Pelzer, J. & Simon, M. (2012): Voruntersuchungen. Vorlandflächen als Senke von Sedimenten und Schadstoffen. KLIWAS-4/2012, 89 pp., Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_4/2012\_Vorlandflächen.  
[http://doi.bafg.de/KLIWAS/2012/Kliwas\\_4.2012\\_Vorlandflaechen.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2012/Kliwas_4.2012_Vorlandflaechen.pdf)
- Heuner, M., Bauer, E.M., Fuchs, E., Schröder, U. & Sundermeier, A. (2010): Climate adapted marsh management on German estuaries. Proceedings of the PI-ANC MMX Congress, 10.-14.5.2010, Liverpool, 8 S.
- Heuner, M., Bauer, E.M., Fuchs, E., Schröder, U. & Sundermeier, A. (2010): Anpassungsoptionen für das Vorlandmanagement deutscher Ästuare angesichts

- des Klimawandels. PIANC-Kongress 2010, 10.-14.5.2010, Liverpool, Deutsche Beiträge, 125-130.
- Heuner, M., Bauer, E.M., Fuchs, E., Schröder, U. & Sundermeier, A. (2010): Climate adapted marsh management for German estuaries. Poster, 10.-14.05.2010, PIANC MMX Congress, Liverpool.
- Heuner, M., Bauer, E.M., Fuchs, E., Schröder, U. & Sundermeier, A. (2010): Klimawandel in Flussmündungen: Anpassungsoptionen für den Uferschutz. Poster, 21.-22.08.2010, BMVBS, Berlin.
- Heuner, M., Mosner, E., Schröder, U. & Kleinschmit, B. (2011): The effect of bank slope types on reed species distribution patterns along marsh edges. Poster, Hydroeco 2011, 2.-5.5.2011, Wien.
- Heuner, M., Schröder, U. & Kleinschmit, B. (2011): Responses of different reed species to morphological bank conditions along the marsh edges. In: Nachtnebel, H.P. & Kovar, K. (Hrsg.): Abstractband, HydroEco 2011, 3rd International Multidisciplinary Conference on Hydrology and Ecology Ecosystems, Groundwater and Surface Water. Pressures and Options, 2.-5.5.2011. Wien. Abstract number 93.  
<http://web.natur.cuni.cz/hydroeco2011/download/HydroEco2011,%20Volume%20of%20Abstracts,%20abstracts,%20electronic%20version,%20UPDATE%20for%20web.pdf>
- Heuner, M., Schröder, U., Fuchs, E., Schröder, B. & Bauer, E.M. (2013): Effects of regional climate change for marsh vegetation along the Weser and Elbe estuaries. Abstractband, Open Landscape. Ecology, Management and Nature Conservation, S. 31.
- Kinkeldey, C. & Schiewe, J. (2012): Visualisierung thematischer Unsicherheiten mit „Noise Annotation Lines“. Kartographische Nachrichten 62: 241–249.
- Kinkeldey, C. & Schiewe, J. (2013): Modellierung und Kommunikation von Unsicherheiten. Querschnittsaufgabe Fernerkundung. KLIWAS-Projekt 3.09. KLIWAS-14/2013, KLIWAS-Projekt 3.09, 44 S. DOI: 10.5675/Kliwas\_14.2013\_Fernerkundung\_3.  
[http://doi.bafg.de/KLIWAS/2013/Kliwas\\_14.2013\\_Fernerkundung\\_3.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2013/Kliwas_14.2013_Fernerkundung_3.pdf)
- Kleinschmit, B. & Bahls, A. (2012): Querschnittsaufgabe Fernerkundung. Konzeption für ein Langzeitmonitoring der gezeitenbeeinflussten Vegetation mit hochauflösenden Satelliten-Daten. KLIWAS-13/2012, KLIWAS-Projekt 3.09, 44 pp., Koblenz. DOI:10.5675/Kliwas\_13.2012\_Fernerkundung\_2  
[http://doi.bafg.de/KLIWAS/2012/Kliwas\\_13.2012\\_Fernerkundung\\_2.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2012/Kliwas_13.2012_Fernerkundung_2.pdf)
- Petersen, J. (2009): Neophyten-Erfassung im Rahmen der Vegetationskartierung (2008/2009) der Deichvorländer an Unter- und Außenweser und im Gebiet Lesum/Hamme/Wümme. Bericht, nature-consult, Hildesheim, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 21 S.
- Roeder, A. (2010): Überflutungstoleranz der Neophyten *Impatiens glandulifera* und *Fallopia japonica*. Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Biozentrum Klein Flottbek, 67 S.

- Schoenberg, W., Kleiß, K. & Jensen, K. (2012): Effekte des Überflutungsregimes auf tidebeeinflusste Röhrichte. Abschlussbericht, Biozentrum Klein Flottbek, Universität Hamburg, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 42 S.
- Schröder, H.H., Köhler-Loum, U. & Müller, N. (2011): Recherche zu naturschutzfachlich bedeutsamen Arten im Elbeästuar. Bericht, KÜFOG, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 8 S. + Anhang.
- Schröder, H.H., Köhler-Loum, U. & Müller, N. (2012): Recherche zu naturschutzfachlich bedeutsamen Arten im Weserästuar. Bericht, KÜFOG, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 11 S.+ Anhang.
- Schuchardt, B., Bildstein, T., Huber, A., Kraft, D. & Meyerdirks, J. (2013): KLIWAS 3.09 „Änderung der Vorlandvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung“. Teilprojekt „Nutzungsanalyse Ästuar für die Vorländer von Elbe- und Weserästuar vor dem Hintergrund des Klimawandels“. Teil 1: Status Quo Vorland Elbe und Weser. Bericht, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 184 S.
- Schuchardt, B., Bildstein, T., Wittig, S. & Kraft, D. (2013): KLIWAS 3.09 „Änderung der Vorlandvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung“. Teilprojekt „Nutzungsanalyse Ästuar für die Vorländer von Elbe- und Weserästuar vor dem Hintergrund des Klimawandels“. Teil 3: Zukunftsszenarien. Bericht, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 96 S.
- Schuchardt, B., Wittig, S., Bildstein, T. & Kraft, D. (2013): KLIWAS 3.09 „Änderung der Vorlandvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung“. Teilprojekt „Nutzungsanalyse Ästuar für die Vorländer von Elbe- und Weserästuar vor dem Hintergrund des Klimawandels“. Teil 2: Ableitung von klimabedingten Topographieänderungen (Szenarien) der Vorländer des Weser- und Elbe Ästuars (Ergebnis der Literaturrecherche und Ableitung der „Mitwachs-Szenarien“). Bericht, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 90 S.
- Silinski, A., Heuner, M., Dauwe, S., Puijalon, S., Troch, P., Bouma, T.J., Van Belzen, J., Schöder, U., Fuchs, E., Meire, P. & Temmerman, S. (2013): Interactions between waves, sediments and pioneer plants in tidal marshes. Results from a full scale flume experiment. Abstractband, 8th IAG International Conference on Geomorphology, 27.-31.8.2013, Paris. Abstract number 447.  
<http://www.geomorphology-iag-paris2013.com/fr/programme-detaille>
- Steinmetz, N. (2012): Skaleneinflüsse auf die Vegetationsfernerkundung im Elbeästuar. Bachelorarbeit am Geographischen Institut Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. 37 S.

## Anhang II: Ablaufplan des Projektes mit den einzelnen Teilprojekten







**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:** Maike Heuner, Eva-Maria Bauer  
Bundesanstalt für Gewässerkunde

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

**Druck:** Bundesanstalt für Gewässerkunde

**DOI:** 10.5675/Kliwas\_24/2014\_3.09