

BfG-1945

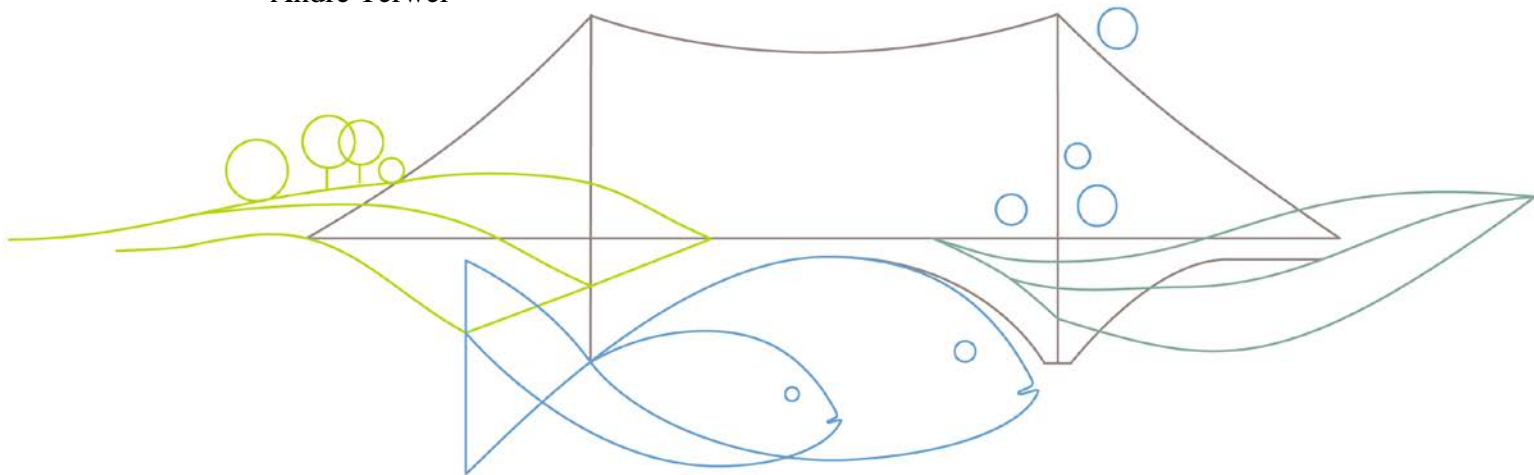
Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

## 1. Zwischenbericht „Makrophytenmonitoring“

Einfluss des schifferzeugten Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand 2015

Untersuchungen im Rahmen des Planfeststellungsbeschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maïke Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei



Koblenz, Januar 2018



# BfG-1945

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

## 1. Zwischenbericht „Makrophytenmonitoring“

Einfluss des schifferzeugten Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand 2015

Untersuchungen im Rahmen des Planfeststellungsbeschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

Uwe Schröder, Elmar Fuchs, Maike Heuner, Carolin Schmidt-  
Wygash, André Terwei

Auftraggeber:	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg
SAP-Nr.:	M39630104035
DOI:	10.5675/BfG-1945
Anzahl der Seiten:	60

Koblenz, Januar 2018

*Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung  
und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BfG*





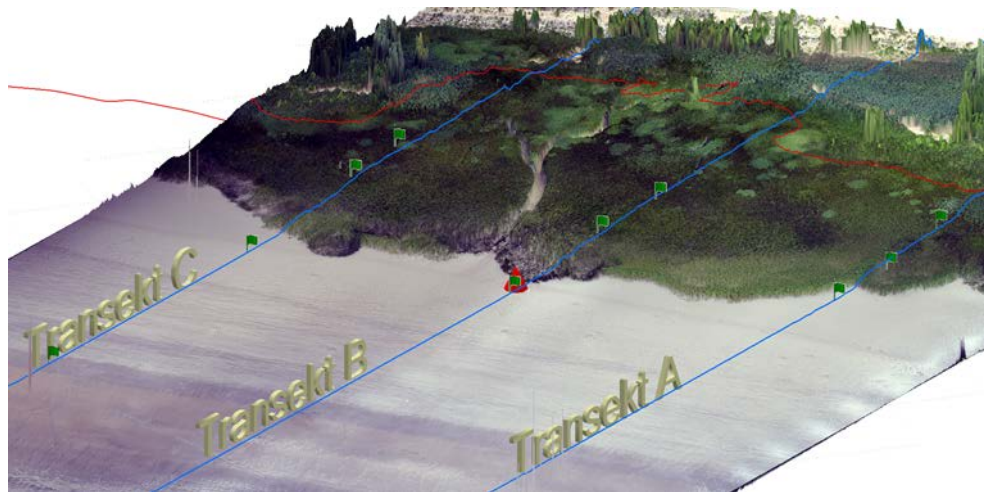
# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Untersuchungskonzept und methodische Grundlagen.....	3
2.1	Untersuchungsstandorte.....	3
2.2	Untersuchungsmethoden.....	4
2.2.1	Erweiterte Untersuchungen nach Vorgabe WRRL.....	4
2.2.2	Hochaufgelöste Erfassung der räumlichen Lage in 3 Dimensionen der Vegetationseinheiten und Erhebung von Bodenparametern.....	6
2.2.3	Sensorgestützte Erfassung schiffsbedingter Wellenereignisse.....	7
3	Auswertung.....	14
3.1	Standortübergreifende Analysen.....	16
3.2	Standort Hollerwettern.....	23
3.2.1	Abiotische Umweltparameter der Standorte.....	24
3.2.1.1	Topographie.....	24
3.2.1.2	Boden.....	24
3.2.1.3	Strömung und Wellen.....	25
3.2.2	Vegetation.....	25
3.2.2.1	Einschätzung nach BMT-Verfahren.....	25
3.2.2.2	Räumliche Verteilung der Vegetation.....	26
3.2.2.3	Sonstige Vegetationsdaten.....	28
3.2.3	Erste Einschätzung des Standortes Hollerwettern aufgrund der Ist- Zustandserfassung.....	29
3.3	Standort Bielenberg.....	31
3.3.1	Abiotische Umweltparameter der Standorte.....	31
3.3.1.1	Topographie.....	31
3.3.1.2	Boden.....	32
3.3.1.3	Strömung und Wellen.....	32
3.3.2	Vegetation.....	33
3.3.2.1	Einschätzung nach BMT-Verfahren.....	34
3.3.2.2	Räumliche Verteilung der Vegetation.....	34
3.3.2.3	Sonstige Vegetationsdaten.....	35
3.3.3	Erste Einschätzung des Standortes Bielenberg aufgrund der Ist- Zustandserfassung.....	37
3.4	Standort Schwarztonnensand.....	39

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945

3.4.1	Abiotische Umweltparameter der Standorte .....	39
3.4.1.1	Topographie .....	39
3.4.1.2	Boden .....	40
3.4.1.3	Strömung und Wellen.....	40
3.4.2	Vegetation .....	41
3.4.2.1	Einschätzung nach BMT-Verfahren.....	42
3.4.2.2	Räumliche Verteilung der Vegetation.....	42
3.4.2.3	Sonstige Vegetationsdaten .....	44
3.4.3	Erste Einschätzung des Standortes Schwarztonnensand aufgrund der Ist-Zustandserfassung .....	45
4	Synthese .....	47
5	Fazit und Ausblick.....	51
6	Vorschau - Erste Einschätzungen der Entwicklung der Makrophyten für den Zeitraum 2015 – 2017 .....	53
7	Literatur .....	57
	Anhang .....	A



**3D-Darstellung auf Grundlage des im Sommer 2015 mittels Drohne aufgenommenen Ortholuftbildes und des aus den Bilddaten photogrammetrisch abgeleiteten Digitalen Oberflächenmodells am Standort Hollerwettern (roter Kegel: Position der Wellenmeseinrichtung, grüne Fähnchen: Positionen der Standortaufnahmen)**

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Lage der Untersuchungsstandorte (Kartengrundlage: OpenStreetMaps)	3	Einfluss des schiffserzeugten Wellenschlages auf emerse Makrophyten der Tideelbe am Beispiel dreier exponierter Standorte – Ist-Zustand
Abbildung 2-2: Transektkartierung (Foto: Michael Stöber, aus STILLER (2016))	5	Untersuchungen im Rahmen des Planfeststellungs-
Abbildung 2-3: UAS - Drohne mit Spiegelreflexkamera (Foto: Hannes Sahl)	6	beschlusses zur
Abbildung 2-4: Bodenansprache im Untersuchungsgebiet (Foto: Uwe Schröder)	7	Fahrrinnenanpassung
Abbildung 2-5: Messkonzept zur Strömungs- und Wellenmessung (Abbildung nach PETERS <i>et al.</i> (2016))	8	BfG-1945
Abbildung 2-6: Definition maßgebender Kenngrößen schiffserzeugter Wellen (oben) und Strömungen (unten) für einen ortsfesten Betrachter (aus PETERS <i>et al.</i> (2016) nach BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (2006))	9	
Abbildung 2-7: Auswertungskonzept zur Erkennung und Analyse der Schiffswellenereignisse und zugehöriger Parameter (aus PETERS <i>et al.</i> (2016))	10	
Abbildung 2-8: Schematischer Schnitt zweier unterschiedlicher Uferformen und deren verfügbares Wasservolumen (bei definierter Breite des betrachteten Uferabschnitts ab Grundberührung der ankommenden Wellen, Ufertyp A (konkave Form) und Ufertyp B (konvexe Form)	13	
Abbildung 3-1: Verteilung der Schiffslängen der Schiffswellenereignisse für alle bemessenen Standorte mit den Ereignissen durch den Halunder-Jet; n = 2393 (links) und ohne den Ereignissen des Halunder-Jets; n = 2289 (rechts)	16	
Abbildung 3-2: Dichte der Werte der Schiffslängen der Schiffswellenereignisse für die drei Standorte im Vergleich (ohne Ereignisse des Halunder-Jets)	17	
Abbildung 3-3: Verteilung der Schiffsgeschwindigkeiten über Grund der Schiffswellenereignisse für alle bemessenen Standorte mit den Ereignissen durch den Halunder-Jet (links) und ohne den Ereignissen des Halunder-Jets (rechts)	17	
Abbildung 3-4: Dichte der Werte der Schiffsgeschwindigkeiten über Grund der Schiffswellenereignisse für die drei Standorte im Vergleich (ohne Ereignisse des Halunder-Jets)	18	
Abbildung 3-5: Verteilung der gemessenen Wellenparameter Wellenhöhe, -periode und -strömung der Primär- und Sekundärwellen für den Gesamtdatensatz (n=2288)	20	
Abbildung 3-6: Verteilung der gemessenen Sekundärwellenhöhen geordnet nach den durch AIS erkannten Schiffstypen	21	
Abbildung 3-7: LMs für die Sekundärwellenhöhe (Hsek) der signifikant erklärenden Parameter a) Schiffslänge (Length), Schiffsgeschwindigkeit (SiW) und Wasserstand am Sensor (d)	22	
Abbildung 3-8: GAMs der Sekundärwellenhöhe (Hsek), dargestellt als farbliche Abstufung a) für die Variablen Schiffslänge (Length) und Wasserstand am Sensor (d) und b) für die Variablen Schiffsgeschwindigkeit im Wasser (SiW) und Wasserstand am Sensor (d)	22	
Abbildung 3-9: Darstellung des Standortes Hollerwettern auf Grundlage des Ortholuftbildes Sommer 2015	23	

Abbildung 3-10: Höhenprofile der 3 Transekte des Standortes Hollerwettern (Höhendaten Sommer 2015, RTK-GNSS)	24
Abbildung 3-11: Zusammenfassende Darstellung der Einschätzung des Makrophytenbestandes Hollerwettern nach BMT-Verfahren, aus STILLER (2016), Foto: Michael Stöber	26
Abbildung 3-12: Ausschnitt aus der Luftbildkartierung Hollerwettern Sommer 2015 (Kürzel: siehe Tabelle 3-5; im Hintergrund UAV-Ortholuftbild Sommer 2015)	27
Abbildung 3-13: Pflanzenparameter Halmstärke, 5 cm über Grund (links) und Halmhöhe (rechts) von <i>Bolboschoenus maritimus</i> an der wasserseitigen Vegetationsgrenze (n=36) und innerhalb des Bestandes (n=116) am Standort Hollerwettern (jeweils 5 Plots à 0,126 m <sup>2</sup> innerhalb Vegetation und an der Vegetationsgrenze)	28
Abbildung 3-14: Höhenlagen der kartierten Vegetationseinheiten unter MThw auf Grundlage der Verschneidung der flächenhaften Kartierung mit den Höhendaten der Transektmessungen, wt: n=55, sc: n=3, bo/sc: n=13, bo/sc/el: n=35, bo: n=23, bo/an: n=6, ph: n=4, pa: n=6 (Bedeutung der Kürzel siehe Tabelle 3-5)	29
Abbildung 3-15: Lage der kartierten Vegetationseinheiten unter MThw auf Grundlage der Verschneidung der flächenhaften Kartierung mit den Punkten der Transektmessungen zur Fahrrinnenachse (kürzeste Distanz); wt: n=55, sc: n=3, bo/sc: n=13, bo/sc/el: n=35, bo: n=23, bo/an: n=6, ph: n=4, pa: n=6 (Bedeutung der Kürzel siehe Tabelle 3-5)	29
Abbildung 3-16: Ausschnitt der Bestandskarte 2015 für Standort Hollerwettern mit den Veränderungen seit 2010 gemäß Luftbildauswertung 2010/2011 nach PETERSEN <i>et al.</i> (2011)	30
Trotz der deutlich exponierten Lage (Nähe zur Fahrrinne) und der mit ihr zusammenhängen Belastung durch Schiffswellen ( $H_{1/3} = 0,33$ m) kann sich hier offenbar ein nach BMT-Verfahren als mäßig eingestuft sehr heterogener Makrophytenstandort (STILLER 2016) halten und durchaus entwickeln. Der Einfluss hydraulischer Belastung, z.B. durch Wellen und Strömung, auf die Pflanzen ist durch die klar unterschiedliche morphologische Ausprägung der am Vegetationsgrenze wachsenden Pflanzen der Strandsimse im Vergleich mit denen geschützter wachsenden Pflanzen innerhalb des Bestandes dokumentiert (siehe Abbildung 3-17).	30
Abbildung 3-18: Darstellung des Standortes Bielenberg auf Grundlage des Ortholuftbildes Sommer 2015	31
Abbildung 3-19: Höhenprofile der drei Transekte des Standortes Bielenberg (Höhendaten Sommer 2015, RTK-GNSS)	32
Abbildung 3-20: Zusammenfassende Darstellung der Einschätzung des Makrophytenbestandes Bielenberg nach WRRL (aus STILLER (2016)), Foto: Michael Stöber	34
Abbildung 3-21: Ausschnitt aus der Luftbildkartierung Bielenberg, Sommer 2015 (Kürzel: siehe Tabelle 3-7; im Hintergrund UAV-Ortholuftbild Sommer 2015)	35
Abbildung 3-22: Pflanzenparameter Halmstärke, 10 cm über Grund (links) und Halmhöhe (rechts) von <i>Phragmites australis</i> am äußeren	

Vegetationsrand (n=83) und innerhalb des Bestandes (n=127) am Standort Bielenberg (jeweils 5 Plots à 0,126 m <sup>2</sup> innerhalb Vegetation und am Vegetationsrand)	36
Abbildung 3-23: Höhenlage der kartierten Vegetationseinheiten des Standortes Bielenberg unter MThw auf Grundlage der Verschneidung der flächenhaften Kartierung mit den Höhendaten der Transektmessungen, wt: n=42, el: n=8, ph: n=23, phe: n=1, sa: n=6, (Bedeutung der Kürzel siehe Tabelle 3-7)	36
Abbildung 3-24: Lage der kartierten Vegetationseinheiten des Standortes Bielenberg unter MThw auf Grundlage der Verschneidung der flächenhaften Kartierung mit den Punkten der Transektmessungen zur Fahrrinnenachse (kürzeste Distanz); wt: n=42, el: n=8, ph: n=23, phe: n=1, sa: n=6, (Bedeutung der Kürzel siehe Tabelle 3-7)	37
Abbildung 3-25: Ausschnitt der Bestandskarte 2015 für Standort Bielenberg mit den Veränderungen seit 2010 gemäß Luftbilddauswertung 2010/2011 nach PETERSEN <i>et al.</i> (2011)	38
Abbildung 3-26: Darstellung des Standortes Schwarztonnensand auf Grundlage des Ortholuftbildes Sommer 2015	39
Abbildung 3-27: Höhenprofile der drei Transekte des Standortes Schwarztonnensand (Höhendaten Sommer 2015, RTK-GNSS)	40
Abbildung 3-28: Zusammenfassende Darstellung der Einschätzung des Makrophytenbestandes Schwarztonnensand nach WRRL (aus STILLER (2016), Foto: Michael Stöber)	42
Abbildung 3-29: Ausschnitt aus der Luftbildkartierung Schwarztonnensand Sommer 2015 (Kürzel: siehe Tabelle 3-9; im Hintergrund UAV-Ortholuftbild Sommer 2015)	43
Abbildung 3-30: Pflanzenparameter Halmstärke, 5 cm über Grund (links) und Halmhöhe (rechts) von <i>Bolboschoenus maritimus</i> am äußeren Vegetationsrand (n=45) und innerhalb des Bestandes (n=105) am Standort Schwarztonnensand (jeweils 5 Plots à 0,126 m <sup>2</sup> innerhalb Vegetation und am Vegetationsrand)	44
Abbildung 3-31: Höhenlage der kartierten Vegetationseinheiten des Standortes Schwarztonnensand unter MThw auf Grundlage der Verschneidung der flächenhaften Kartierung mit den Höhendaten der Transektmessungen, wt: n=29, sc: n=18, bo: n=7, bo/el: n= 10, el: n=10, sc/pa: n=7, bo/pa: n=5, ph: n=41 (Bedeutung der Kürzel siehe Tabelle 3-9)	45
Abbildung 3-32: Lage der kartierten Vegetationseinheiten des Standortes Schwarztonnensand unter MThw auf Grundlage der Verschneidung der flächenhaften Kartierung mit den Punkten der Transektmessungen zur Fahrrinnenachse (kürzeste Distanz); wt: n=29, sc: n=18, bo: n=7, bo/el: n= 10, el: n=10, sc/pa: n=7, bo/pa: n=5, ph: n=41 (Bedeutung der Kürzel siehe Tabelle 3-9)	45
Abbildung 3-33: Ausschnitt der Bestandskarte 2015 für Standort Schwarztonnensand mit den Veränderungen seit 2010 gemäß Luftbilddauswertung 2010/2011 nach PETERSEN <i>et al.</i> (2011)	46
Abbildung 4-1: Profile der den Messlokationen von Hollerwettern, Bielenberg und Schwarztonnensand vorgelagerten Watten und Flachwasserbereiche (Datengrundlagen: DOM von 2015 für die Watten und DGMw 2010 für	

Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maike Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945

die Flachwasserbereiche); mittlerer Wasserstand: arithmetisches Mittel der Wasserstände über Sensor im Messzeitraum für alle Standorte; mittlere erste Grundberührung einlaufender Wellen: aus den gemessenen Wellenereignissen berechnete mittlere Wirkungstiefe der Sekundärwellen an allen drei Standorten	48
Abbildung 4-2: Darstellung der mittleren a) Wellenhöhe, b) -strömung, c) -periode und d) Sohlschubspannung für Sekundärwellen an den Standorten Hollerwettern, Bielenberg und Schwarztonnensand	49
Abbildung 4-3: Verteilung der Werte bei allen Wasserstände für die a) Sekundärwellenhöhe, b) die Sekundärwellenströmung, c) die Sohlschubspannung unter den Sekundärwellen und entsprechend d), f) und g) bei Wasserständen unter 0,6 m über Sensor	50
Abbildung 4-4: Verteilung der Werte bei allen Wasserstände für die a) Sekundärwellenhöhe, b) die Sekundärwellenströmung, c) die Sohlschubspannung unter den Sekundärwellen für die gilt ( $H > 0,4d$ )	50
Abbildung 6-1: Darstellung der Entwicklung der Ufervegetationszonen von 2015 bis 2017 am Beispiel des Standortes Hollerwettern	54
Abbildung 6-2: Entwicklung der Ufervegetationszonen (Sukzession links, Rückgang rechts) von 2015 bis 2017 in a) Hollerwettern, b) Bielenberg und c) Schwarztonnensand	55

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Gemessene und berechnete (ab Nr. 43) Parameter des Messprogramms	15	Einfluss des schiffserzeugten Wellenschlages auf emerse Makrophyten der Tideelbe am Beispiel dreier exponierter Standorte – Ist-Zustand
Tabelle 3-2: Verteilung der Schiffstypen (gemäß AIS) auf die in die Auswertung eingegangenen Schiffswellenereignisse in %	16	Untersuchungen im Rahmen des Planfeststellungsbeschlusses zur Fahrrinnenanpassung
Tabelle 3-3: Extreme und signifikante Wellenhöhen und -perioden, Min: Minimum, Max: Maximum, Mean: Mittelwert, $X_{1/3}$ : Signifikante Wellenhöhe, -periode bzw. -strömung (Mittelwert der 33% der höchsten / längsten Wellenereignisse), $X_{1/10}$ : Mittelwert der höchsten 10 % der höchsten / längsten Ereignisse, $H_P$ : Primärwellenhöhe, $T_P$ : Primärwellenperiode, $H_S$ : Sekundärwellenhöhe, $T_S$ : Sekundärwellenperiode, $V_{HP}$ : Primärwellenströmung, $V_{HS}$ : Sekundärwellenströmung	20	BfG-1945
Tabelle 3-4: Zusammenfassung der analysierten Schiffswellenereignisse am Standort Hollerwettern sowie der Kennzahlen der Sekundärwellenereignisse $H_{1/3}$ : signifikante Wellenhöhe, $T_{SM}$ : mittlere Wellenperiode, $d_M$ : mittlere Wasserstand, $C_{SWM}$ : mittlere Wellengeschwindigkeit (berechnet), $L_{SWM}$ : mittlere Wellenlänge, $U\delta m$ : mittlere Orbitalgeschwindigkeit, $\tau_{SWM}$ : mittlere Sohl Schubspannung	25	
Tabelle 3-5: Kartierte Vegetationseinheiten 2015 am Standort Hollerwettern	27	
Tabelle 3-6: Zusammenfassung der analysierten Schiffswellenereignisse am Standort Bielenberg	33	
Tabelle 3-7: Kartierte Vegetationseinheiten 2015 am Standort Bielenberg	35	
Tabelle 3-8: Zusammenfassung der analysierten Schiffswellenereignisse am Standort Schwarztonnensand	41	
Tabelle 3-9: Kartierte Vegetationseinheiten 2015 am Standort Schwarztonnensand	44	
Tabelle 4-1: Zusammenstellung der wichtigsten Kenngrößen, Veg =Vegetation	47	
Tabelle 6-1: Zuordnung der kartierten Dominanzeinheit zu Sukzessionsstadien	53	

# Abkürzungsverzeichnis

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945

AIS	Automatic Identification System
ARGE	Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe
BAW-DH	Bundesanstalt für Wasserbau - Dienststelle Hamburg
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BMT- Verfahren	Bewertung der Qualitätskomponente Makrophyten in Tidegewässern Nordwestdeutschlands gemäß EG-Wasserrahmenrichtlinie
GAM	Generalisierte Additive Modelle
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
LM	Lineare Modelle
MThw	Mittleres Tidehochwasser
RTK	RealTime Kinematic
UAS	Unmanned AerialSystems
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes

Die Bedeutung der im Bericht verwendeten Kürzel der unterschiedlichen  
Messparameter und gerechneten Parameter sowie deren Einheiten sind in Tabelle  
3-1 abgelegt.



# 1 Einleitung

Der Planfeststellungsbeschluss (WSD-NORD 2012) zur geplanten Fahrrinnenanpassung der Tideelbe fordert zur Beweissicherung der Makrophyten ein Monitoring von sechs Standorten für zwölf Jahre nach Ausbau. Diese Untersuchungen sollen entsprechend dem Messprogramm zur Qualitätskomponente Makrophyten gemäß Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2000) durchgeführt werden. Zusätzlich sind laut Planfeststellungsbeschluss noch drei weitere Standorte in exponierten Bereichen hinsichtlich der Erfassung von Vegetationsveränderungen, v. a. Röhrichtgesellschaften, durch Wellenschlag zu untersuchen (WSD-NORD 2012). Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) untersuchte bereits im Beweissicherungsverfahren zur vorangegangenen Fahrrinnenanpassung von 1999 umfassend die räumliche Entwicklung der Röhrichte (SCHRÖDER 2004a, SCHRÖDER 2004b, SCHRÖDER 2008, 2012). Seitens des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes (WSA) Hamburg wurde die BfG im aktuellen Verfahren erneut beauftragt: Es sollten drei exponierte Standorte nachvollziehbar und im Einvernehmen mit den Ländern ausgewählt, ein Untersuchungskonzept für ein Monitoring aufgesetzt und fachlich begleitet werden. Im Dezember 2013 stellte die BfG die Standortauswahl (SCHRÖDER *et al.* 2013) und im Mai 2014 das Untersuchungskonzept dem WSA vor. Im November 2014 fand die Abstimmung mit den Vertretern der Länder statt. 2015 wurde mit dem Messprogramm und dem Monitoring begonnen.

Im Rahmen der Ist-Zustandsaufnahmen wurde in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Wasserbau - Dienststelle Hamburg (BAW-DH) ein Wellenmessprogramm erstellt und seitens des WSA Hamburg die Firma Ramboll/IMS mit der Durchführung des Messprogramms beauftragt. Des Weiteren wurde gemeinsam in Kooperation mit der Universität Rostock ein Pilotprojekt aufgesetzt, um das Potenzial mittels *Unmanned Aerial Systems* (UAS)<sup>1</sup> erhobener Daten (höchstauflösende Ortholuftbilder und Digitale Oberflächenmodelle) für das Monitoring zu evaluieren. Die Dipl.-Biologin Frau Gabriele Stiller wurde vom WSA Hamburg mit der Vegetationserfassung und Bewertung der ausgewählten Standorte gemäß WRRL mit dem sogenannten BMT-Verfahren (Definition s. Kap. 2.2.1) beauftragt. Die BfG erfasste die Vegetation der Standorte anhand von Ortholuftbildern und *in situ* flächenhaft. Zudem ist die BfG seitens des WSA Hamburg beauftragt, alle erhobenen Daten zu sammeln, zu analysieren und zu bewerten.

---

<sup>1</sup> Unmanned Aerial System (UAS): Mit UAS ist ein System aus unbemannten Luftfahrzeug (Drohne, auch Unmanned Aerial Vehicle (UAV)) inklusive aller nötigen Systeme zum Betrieb (Bodenstation, Steuerelement) sowie die an Bord installierte Sensorik; in diesem Fall eine Kamera

Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maike Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945

Dieser Bericht fasst die im Rahmen der Ersterfassung erhobenen Daten und Analysen zusammen und gibt eine erste Einschätzung der Standorte hinsichtlich des Einflusses des schiffsinduzierten Wellenschlages auf die Makrophyten / Röhrichte. In Kapitel 6 wird ein erster Ausblick auf die Entwicklungstrends der Makrophyten seit der Ersterfassung bis 2017 gegeben.

## 2 Untersuchungskonzept und methodische Grundlagen

Neben den im Planfeststellungsbeschluss geforderten Bewertungen der Vegetation der Makrophyten an den ausgewählten Standorten (siehe Kapitel 2.1) und deren Bewertungen gemäß WRRL (STILLER 2005) wurden umfangreiche weitere der Standortuntersuchungen (vegetationskundlich, bodenkundlich, topographisch) durchgeführt. Zusätzlich wurden jeweils an zentraler Stelle jedes Untersuchungsstandortes Wellenschlags- und Strömungsmessungen unter fachlicher Beratung der BAW-DH durchgeführt und die Vegetationsbestände sowie die Geländehöhen des vorgelagerten Watts mittels UAS-gestützten Luftbildaufnahmen flächenhaft erfasst.

### 2.1 Untersuchungsstandorte

Im Rahmen einer Bachelorarbeit<sup>2</sup> im Fachbereich Raum- und Umweltwissenschaften der Universität Trier in Kooperation mit der BfG wurde auf Grundlage verschiedener Bewertungsparameter eine Methode erarbeitet, mit deren Hilfe mehrere exponierte Standorte als geeignet empfohlen werden konnten (SCHRÖDER *et al.* 2013, DIEDERICH 2014). In diese Auswahl an Standorten gingen verschiedene Kriterien ein, u.a. die Entfernung zur Fahrrinnenachse, das Substrat des Bodens, bzw. des Watts, die Neigung des Standortes, eine Einschätzung der Entwicklung der Röhrichte aus der vergangenen Beweissicherung, aber auch die Zugänglichkeit. Schließlich wurden drei Standorte mit den Vertretern der Länder in der Unterarbeitsgruppe Gewässerökologie ausgewählt (siehe Abbildung 2-1).



Abbildung 2-1: Lage der Untersuchungsstandorte (Kartengrundlage: OpenStreetMaps)

<sup>2</sup> Fachbereich Raum- und Umweltwissenschaften der Universität Trier in Kooperation mit der BfG

### **Hollerwettern**

Der Standort Hollerwettern liegt unterhalb der Störmündung und oberhalb von Brockdorf am schleswig-holsteinischen Ufer bei Elbe-km 681.

### **Bielenberg**

Der Standort Bielenberg ist am Bielenberger Wäldchen südlich von Glückstadt bei Elbe-km 670 gelegen.

### **Schwarztonnensand**

Der Standort Schwarztonnensand liegt mittig der gleichnamigen Insel fahrrinnenseitig bei Elbe-km 666.

## 2.2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungsmethoden ergaben sich zum Teil aus den Vorgaben des Planfeststellungsbeschlusses, z.B. die Bewertung der Standorte nach Maßgabe der WRRL. Die Erfordernisse für eine haltbare wissenschaftliche Analyse der Wirkungspfade im Ökoton Ufer der Tideelbe, auch unter Berücksichtigung benachbarter Forschungstätigkeiten der BfG (u.a. ElbStabil<sup>3</sup> und tibass<sup>4</sup>), erforderten weitere Datengrundlagen und führten zu einem umfassenden Untersuchungskonzept.

### 2.2.1 Erweiterte Untersuchungen nach Vorgabe WRRL

Im Zuge der Einführung der WRRL wurde im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe (ARGE) ein Bewertungsverfahren für die Qualitätskomponenten Makrophyten und Angiospermen in der Tideelbe erarbeitet und eingeführt (STILLER 2005). Diese Bewertung der Qualitätskomponente Makrophyten in Tidegewässern (BMT-Verfahren) umfasst im Wesentlichen folgende Komponenten:

- Erhebung der Artenzusammensetzung je Messstelle an einem 100 m langen Gewässerabschnitt (zwei Begehungen pro Untersuchungsjaar, Frühjahr und Sommer). Berücksichtigung aller im Wasser ,im Tidengebiet unterhalb des Mittleren Tidehochwassers (MThw), siedelnden Arten.
- Zuordnung der nachgewiesenen Arten zu einer von vier ökologischen Kategorien der Naturnähe. Schätzung der gemeinsamen Deckungsanteile aller Arten in einer ökologischen Kategorie. Klassen für die Deckungsanteile: bis 5 %; >5-10 %; >10-25 %; >25-50 %; >50 %.

---

<sup>3</sup> Spannungszustände und Widerstandsfähigkeit der Uferböden der Tideelbe bei hydrodynamischer Belastung, Teilprojekt in ElbService II: Interaktion und Dynamik der Ufer bildenden Böden, vorgelagerter Watten sowie Ufervegetation an der Tideelbe, ihre Ökosystemleistungen und Konsequenzen für die wasserwirtschaftliche Unterhaltung

<sup>4</sup> Tidal Bank Science and Services - Die Leistung der Vegetation zur Uferschutzfunktion in Ästuaren im Rahmen der wasserwirtschaftliche Unterhaltung

- Ermittlung der Besiedelungsstruktur des Gewässerabschnitts mit den Parametern
  - Ausdehnung (Breite) der Gewässer- und Uferpflanzen im betrachteten Gewässerabschnitt
  - Zonierung (drei Klassen)
  - Vitalität (drei Klassen)
- Berechnung des Standorttypieindex Makrophyten in Tidegewässern  $STI_M$  (STILLER 2005) und Zuordnung zu einer Klassifizierungsskala, Entwicklung der Artenzusammensetzung und der Deckungsanteile ökologischer Kategorien sowie der Parameter der Besiedelungsstruktur, des Index und der Klassifizierung im Verlauf der Beweissicherung

Zusätzlich zu den etablierten Erfassungen und Berechnungen des  $STI_M$  werden pro Standort in drei Transekten die exakte Höhe (GNSS-RTK) und die dominante Vegetation auf einer Breite von ca. 5 m erfasst (siehe Abbildung 2-2).



**Abbildung 2-2: Transektkartierung (Foto: Michael Stöber, aus STILLER (2016))**

Des Weiteren wurden Pflanzeigenschaften (Traits) wie Halmstärke, -höhe und -dichte an jeweils zehn Plots pro Standort aufgenommen. Fünf an der unmittelbaren Röhricht-Wattgrenze und fünf innerhalb des Bestandes der flussseitigen Vegetationseinheit (STILLER 2016). Nach CARUS und SCHRÖDER (2014) waren im Rahmen des KLIWAS-Projektes 3.09 untersuchte Strandsimsen (BAUER *et al.* 2014) am äußeren Rand der Vegetation in ihrer Wuchsform und auch Biomasse signifikant unterschiedlich zu den Pflanzen innerhalb der Bestände. Zudem stellten sie einen Zusammenhang zwischen der Halmstärke von Strandsimsen und der Strömungsgeschwindigkeit, die die Pflanzen ausgesetzt sind, fest. Die unterschiedliche Wuchsform scheint ein Hinweis auf eine artspezifische

Anpassung auf die jeweilige hydraulische Belastung zu sein. Den Einfluss der Pflanzenmorphologie unterschiedlicher Arten auf hydraulischen Stress beschreiben u.a. HEUNER *et al.* (2015).

### 2.2.2 Hochaufgelöste Erfassung der räumlichen Lage in 3 Dimensionen der Vegetationseinheiten und Erhebung von Bodenparametern

Für eine flächenhafte und quantifizierende Analyse der Veränderung der Vegetation an den ausgewählten Standorten wurden am 9. Juni 2015 an den Standorte Hollerwettern und Bielenberg und am 2. Juli 2015 am Standort Schwarztonnensand Luftbilder UAS-gestützt (siehe Abbildung 2-3) aufgenommen. Anschließend wurden die sich stark überlappenden Rohdaten mittels photogrammetrischer Verfahren zu True-Ortholuftbildern und Digitalen Oberflächenmodellen weiterverarbeitet (GRENZDÖRFFER 2016, GRENZDÖRFFER & SCHRÖDER 2017) und seitens der BfG ausgewertet (SCHRÖDER 2015).



**Abbildung 2-3: UAS - Drohne mit Spiegelreflexkamera (Foto: Hannes Sahl)**

Eine flächenhafte Klassifikation der Bilddaten nach Vegetationseinheiten fand bislang visuell am Bildschirm und auf Grundlage eines GNSS-gestützten Ground-Truth statt. Zusätzlich wurden die flusszugewandten äußeren Grenzen der Vegetationseinheiten mit GNSS in ihrer Höhe und Lage vermessen (WSA Hamburg). Zur Bestimmung von Dominanzverhältnissen bzw. der Heterogenität der festgestellten Vegetationseinheiten der Standorte wurde ein Landschaftsstrukturparameter (MCGARGIAL & MARKS 1995, GUSTAFSON 1998, BLASCHKE 2000), in diesem Fall der Heterogenitätsindex, berechnet. Zur Bestimmung der Heterogenität wurde auf den Ansatz nach Shannon (H) zurückgegriffen und auf die Landschaftsebene gehoben.



$$H = - \sum_{i=1}^m (p_i \ln p_i) \quad (1)$$

$p_i$  = Proportion von Flächenzahl des Flächentyps  $i$  zur Gesamtzahl  
oder Flächengröße des Flächentyps  $i$  zur Gesamtfläche,  
 $m$  = Anzahl der Flächentypen (Klassen)

Für den Vergleich der Standorte untereinander wurde letztendlich die Eveness ( $E$ )  
des Index berechnet.

$$E = \frac{- \sum_{i=1}^m (p_i \ln p_i)}{H_{max}} \quad (2)$$

$$H_{max} = \ln m$$

An repräsentativen Punkten entlang der Transekte wurden die Bodeneigenschaften  
mittels Feldansprache erhoben (siehe Abbildung 2-4). In Zusammenarbeit mit dem  
F+E Projekt ElbService, Teilprojekt ElbStabil der BfG (SCHMIDT-WYGASCH *et al.*  
2015) konnten für die Standorte auch bodenstabilitätskennzeichnende  
Eigenschaften bestimmt werden, die zum Verständnis etwaiger Prozesse, z.B. der  
Erosion, beitragen.

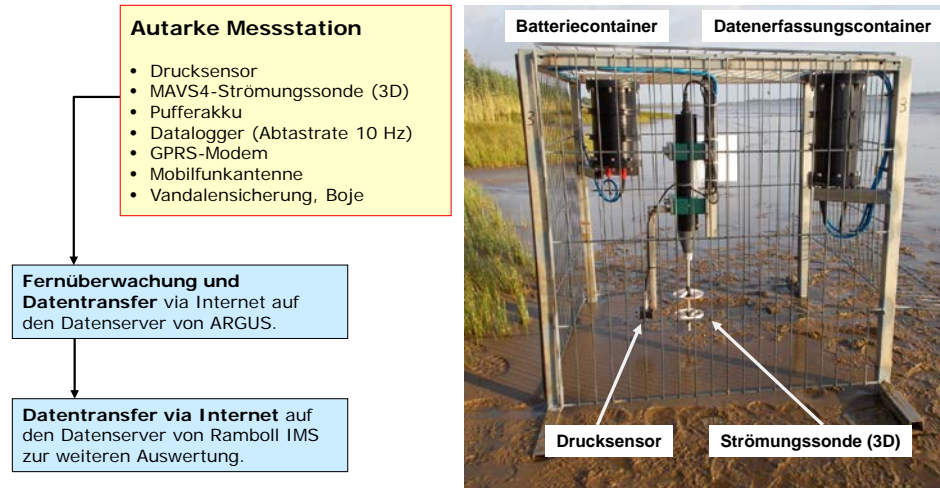


**Abbildung 2-4: Bodenansprache im Untersuchungsgebiet (Foto: Uwe Schröder)**

### 2.2.3 Sensorgestützte Erfassung schiffsbedingter Wellenereignisse

Die Parameter von Schiffswellenereignissen wurden sensorgestützt an einem  
zentralen Punkt unmittelbar vor der geschlossenen Röhrichtgrenze erhoben und mit  
den über AIS (Automatic Identifikation System) registrierten Schiffspassagen an  
den Standorten verknüpft. Messzeitraum war vom 21.09.2015 bis einschließlich  
01.11.2015. In einem Zeitraum von sechs Wochen konnte eine repräsentative

Anzahl an Schiffspassagen verschiedener Schiffstypen, Geschwindigkeiten, Passierabstände etc. erfasst werden. Die Messeinrichtungen wurden mit fachlicher Beratung der BAW-DH gesondert von der Firma Ramboll/IMS im Auftrag des WSA angefertigt (siehe Abbildung 2-5).



**Abbildung 2-5: Messkonzept zur Strömungs- und Wellenmessung (Abbildung nach PETERS *et al.* (2016))**

Die Ergebnisse der Wellenmessungen wurden zum einen statistisch nach Häufigkeiten und Größe der eintretenden Ereignisse ausgewertet und zum anderen wurde die Signifikanz zwischen den gemessenen Wellenparametern und weiteren Parametern (wie Schiffsgröße bzw. -geschwindigkeit, Wasserstand, Passierabstand etc.) geprüft. Des Weiteren wurden die Wellenparameter auf ihre Modellierbarkeit getestet. Ein weiteres Ziel war die zukünftige Prognose der Wellenbelastung an verschiedenen Standorten über einfach bestimmbare signifikante Begleitparameter.

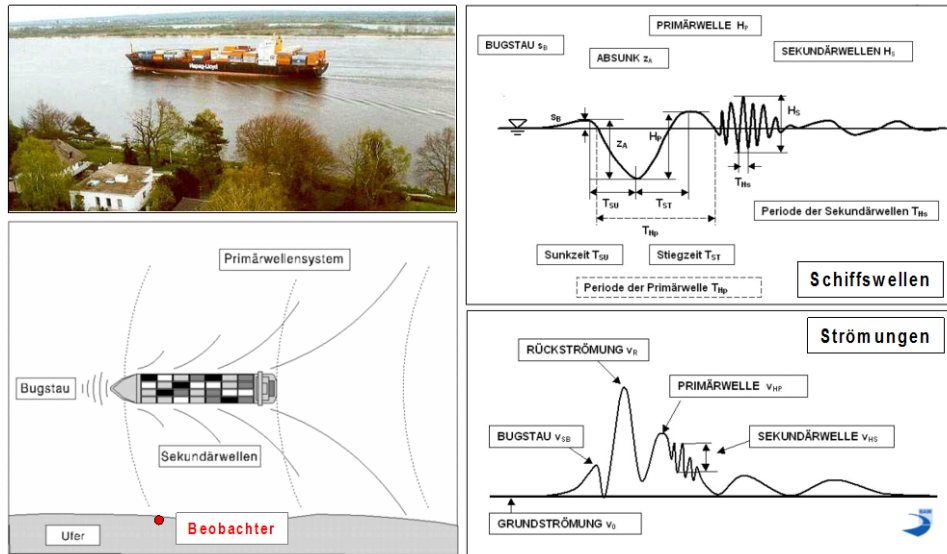
Schiffswellen sind ereignisgebunden. Aufgrund der Bewegung und Verdrängung erzeugt ein Schiff ein typisches Wellenbild, welches durch Bugstau, Primärwelle (Absenk und Schwell) und Sekundärwellen gekennzeichnet ist (siehe Abbildung 2-6).



Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maike Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945



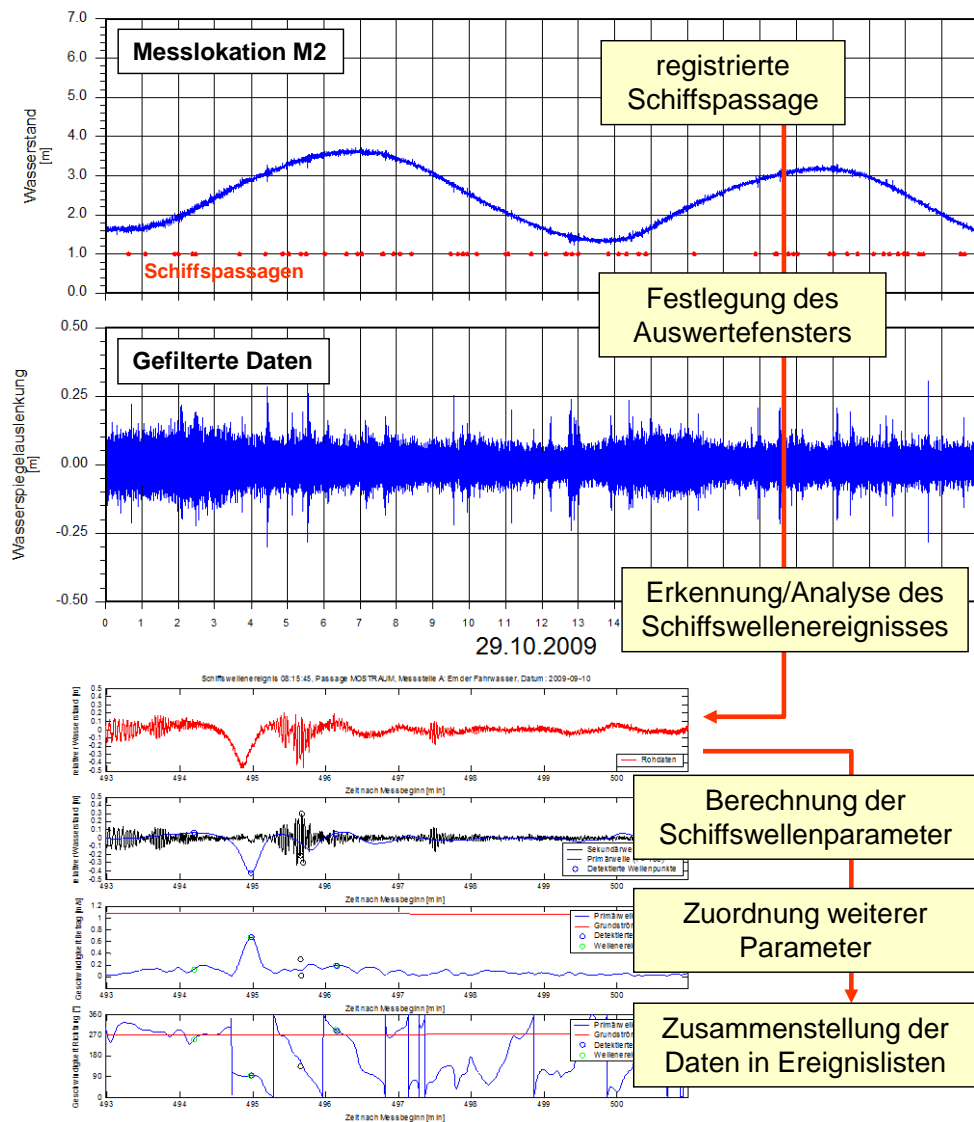
**Abbildung 2-6: Definition maßgebender Kenngrößen schiffserzeugter Wellen (oben) und Strömungen (unten) für einen ortsfesten Betrachter (aus PETERS *et al.* (2016) nach BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (2006))**

Neben diesen typischen Schiffswellen von sogenannten Verdrängern, erzeugt der die Schnellfähre Halunder Jet bei überkritischer Fahrt ein abweichendes Wellenbild, dass insbesondere durch das Fehlen der Primärwellen gekennzeichnet ist (PETERS *et al.* 2016). Die Firma Rambol/IMS hat zur Auswertung der gemessenen Wellenparameter und deren Zuordnung mittels AIS registrierter Schiffspassagen ein eigenes Auswertekonzept erarbeitet. In Abbildung 2-7 ist dieses Konzept veranschaulicht. Näheres dazu findet sich insbesondere in Anlage 6 des Abschlussberichtes der Wellenmesskampagne von PETERS *et al.* (2016).

Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maike Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945



**Abbildung 2-7: Auswertungskonzept zur Erkennung und Analyse der Schiffswellenereignisse und zugehöriger Parameter (aus PETERS *et al.* (2016))**

Zur Aufdeckung der Zusammenhänge der gemessenen Parameter in Bezug auf die Belastung der Standorte durch schiffsinduzierten Wellenschlag wurde eine multivariate Auswertung der gemessenen Parameter durchgeführt. Dazu wurden verschiedene Modelle gerechnet, mit Hilfe derer die äußeren Bedingungen auf das Wellenbild (Primär-, Sekundärwellenhöhe und -periode sowie der Wellenströmungen) der Standorte übertragen werden können. Dazu zählen insbesondere die Schiffsgröße und -geschwindigkeit, der Wasserstand und die Grundströmung. Darüber hinaus wurden belastungsbeschreibende Parameter gesucht, mit deren Hilfe beobachtete Entwicklungen der Topographie und der Vegetation nachvollzogen konnten.

Zur allgemeinen Beschreibung der Standorte hinsichtlich ihrer Belastung durch schiffsbedingten Wellenschlag können unterschiedliche Parameter herangezogen werden. Neben den gemessenen Werten (z.B. Wellenhöhe, -periode und -strömung)

gibt es zahlreiche Kennwerte, die allgemeine Gültigkeit haben und/oder aus den gemessenen Parametern abgeleitet wurden. Für die meisten Bemessungsverfahren hinsichtlich der Wirkung von Seegang und Wellen sind die signifikante Wellenhöhe  $H_{1/3}$  (Höhe von Wellental zu Wellenkamm) und -periode  $T_{1/3}$  (Zeit des Durchlaufs von Wellenkamm zu Wellenkamm) die maßgeblichen Eingangswerte. Sie werden durch den Mittelwert der 33 % höchsten Werte für Wellenhöhe und -periode ausgedrückt (EAK 2002 korrigierte Ausgabe 2007). Ab einer Wassertiefe der halben Wellenlänge  $\lambda$  (Entfernung von Wellenkamm zu Wellenkamm) verformen sich die Wellen aufgrund der beginnenden Reibung am Gewässergrund, sie werden höher und die Wellenlänge verkürzt sich. Die Wellenperiode bleibt jedoch gleich. Zur Identifikation der Belastungen der Standorte durch den schiffsbedingten Wellenschlag können weitere Parameter (z. B. die Schubspannung) aus den gemessenen Werten anhand der Wellentheorie und der Erfahrungen und Ergebnisse aus dem Küsteningenieurwesen abgeleitet werden.

Im freien Wasser ist nach der linearen Wellentheorie die Wellenlänge ( $\lambda$ ) [m] abhängig von der Wellenperiode (T) [s].

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2 \quad (3)$$

g: Erdbeschleunigung ( $\approx 9,81 \text{ ms}^{-2}$ ),  $\pi$ : Kreiszahl ( $\approx 3,141$ )

Im Übergangswasser ü ( $\frac{d}{\lambda} < 0,5$  und  $> 0,05$ ; d: Wassertiefe [m]) gilt:

$$\lambda_{\ddot{u}} = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh(kd) \quad (4)$$

k: Wellenzahl ( $\frac{2\pi}{\lambda}$ ) [ $\text{m}^{-1}$ ]

Bei Annäherung an  $\frac{d}{\lambda} < 0,05$  (Flachwasser) wird  $\tanh(kd) \approx kd$  und somit kann für die Wellenlänge in flachem Wasser die vereinfachte Gleichung lauten:

$$\lambda_s = T\sqrt{gd} \quad (5)$$

Für einen ersten Vergleich der Standorte untereinander und deren Besonderheiten für die morphologische und pflanzliche Entwicklung, wird für alle Berechnungen auf die vereinfachte Formel für Flachwasser (5) zurückgegriffen.

Um für die drei Standorte mittels der gemessenen Wellenparameter die Sohlschubspannung  $\tau_s$  als weiteren Wert der Belastung durch schiffsbedingten Wellenschlag zu ermitteln, wurde auf die Modelle von VAN RIJN (1993) und SOULSBY und CLARKE (2005) zurückgegriffen. Die für die Berechnung der Sohlschubspannung benötigte Orbitalgeschwindigkeit  $\hat{U}_\delta$  der Welle an der Grenzschicht zum Boden (siehe auch SHI *et al.* (2012)) kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\hat{U}_\delta = \frac{\pi H}{T \sinh kd} \quad (4)$$

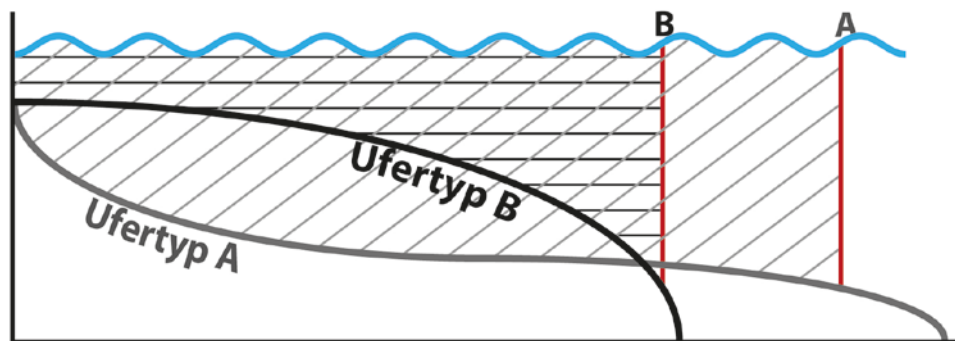
H: Wellenhöhe [m]

Das Modell von VAN RIJN (1993) berechnet dann die Sohlschubspannung mit:

$$\tau_s = 0,25 \rho_w f_{wr} \hat{U}_\delta^2 \quad (5)$$

$\rho_w$ : Dichte des Wassers (für den Vergleich vereinheitlicht auf 1000 kg/m<sup>3</sup>),  $f_{wr}$ : *rough bed friction factor* - Reibungskoeffizient (für den Vergleich vereinheitlicht auf 0,03)

BEARMAN *et al.* (2010) beschreiben für die South San Francisco Bay u. a., dass konvexe Ufertopographien ein Kennzeichen für Sedimentation und konkave Ufertopographien für zunehmenden Welleneinfluss und gröberes Substrat sind. Konvexe Ufer steigen zunächst steiler an und verflachen im weiteren Verlauf. Bei konkaven Ufern versteilen sich die Ufer eher zum Landanschluss. Konkave Ufer (Ufertyp A, siehe Abbildung 2-8) haben also bei gleichem Wasserstand in Bezug zu einer definierten Breite und Tiefe des Ufers mehr Wasservolumen zur Verfügung als konvexe Ufer (Ufertyp B, siehe Abbildung 2-8). Die Reibung am Gewässergrund und somit der Energieverlust der Wellen ist dem entsprechend geringer. Um den Einfluss der Topographie des vorgelagerten Watts auf die Dämpfung der Wellen zu bewerten, wurde aus den Daten der Sekundärwellen die Tiefe berechnet, in der im Mittel (Wellen und Wasserstand) die ankommenden Wellen Grundberührung haben werden (halbe Wellenlänge). Ab diesem Punkt nimmt die Reibung bei gleichmäßig ansteigendem Ufer (in der einen oder anderen Form) beständig zu. Je nach Uferform (konvex oder konkav) stehen den Wellen aber weniger oder mehr Wassersäule bzw. Wasservolumen bei Betrachtung eines Uferabschnittes zur Verfügung. In der schematischen Abbildung 2-8 wird deutlich, dass trotz einer früheren Grundberührung (A) der ankommenden Wellen bei Ufertyp A (konkav), den Wellen mehr tieferes Wasser zur Verfügung steht als bei Ufertyp B (konvex). Wird dieses räumlich für einen definierten Uferabschnitt (z.B. 100 m Uferbreite) betrachtet, bedeutet dies, dass bei gleichem Wasserstand, den ankommenden Wellen bei Ufertyp A mehr Wasservolumen zur Verfügung steht als bei Ufertyp B. Das Wasservolumen in dem Bereich vor einem Standort, in denen die Wellen Grundberührung und somit Reibung erfahren, kann also als ein Maß für die Größe der topographiebedingten Energiedissipation der Wellenereignisse betrachtet werden.



**Abbildung 2-8: Schematischer Schnitt zweier unterschiedlicher Uferformen und deren verfügbares Wasservolumen (bei definierter Breite des betrachteten Uferabschnitts ab Grundberührung der ankommenden Wellen, Ufertyp A (konkave Form) und Ufertyp B (konvexe Form))**

Wenn eine Welle bricht wird ihre Energie in turbulente kinetische Energie umgewandelt (MALCHEREK 2010). Der Bereich der sich brechenden Wellen wird auch als Brandung bezeichnet. Nach der Wellentheorie ist das Brechen einer Welle im Flachwasser vom Verhältnis der Wassertiefe ( $d$ ) zu Höhe der Welle ( $H$ ) abhängig MICHE (1944). Aus diesen Parametern kann also theoretisch für einen Messpunkt abgeleitet werden, ob z.B. für ein Schiffswellenereignis gebrochene oder nicht gebrochene Wellen erfasst wurden.

Im Flachwasser ist nach MICHE (1944) die theoretische maximale Wellenhöhe bei  $H_{\max} = 0,89 \cdot d$  ( $d$  = Wassertiefe) erreicht. MALCHEREK (2010) postuliert, dass reale Wellen wesentlich früher und die „höchsten“ Wellen bereits häufig bei  $H_{\max} \approx 0,4 \cdot d$  brechen. Wir können also davon ausgehen, dass Wellen, deren Verhältnis Wellenhöhe zu Wassertiefe größer als 0,4 ist, einen kritischen Wert erreicht haben. Entweder sind sie kurz zuvor gebrochen, sind in Brechung oder werden in Kürze brechen. Entsprechend sind diese Wellenereignisse ein Indikator dafür, dass die Brandung der Wellen unmittelbar an der Vegetationsgrenze (Sensorstandort) stattfindet. Wellen deren Verhältnis Wellenhöhe zu Wassertiefe kleiner als 0,4 ist, sind dementsprechend ein Indikator dafür, dass die Wellen entweder bereits gebrochen sind und „nur“ das Auslaufen der Wellen gemessen wurde (bei niedrigen Wasserständen) oder aber erst viel später brechen werden und ohne Turbulenz die Vegetationsgrenze passieren (bei hohen Wasserständen).

Die folgende Zusammenstellung der Mess- und Erhebungsergebnisse der Ist-Zustandsaufnahme im Monitoring ist eine erste Bestandsaufnahme und lässt noch keine validen Rückschlüsse auf die Wirkungszusammenhänge zur hydraulischen Belastung durch Wellenschlag und der Vegetationsentwicklung bzw. Ausprägung zu.

### 3 Auswertung

Erste allgemeine statistische Auswertungen der Wellen- und Strömungsmessungen wurde bereits von PETERS *et al.* (2016) im Rahmen der Endberichtserstellung zur Wellen- und Strömungsmessung vorgenommen. Der von der Firma Rambol/IMS (PETERS *et al.* 2016) erstellte Gesamtdatensatz enthält 43 gemessene und berechnete Parameter. Im Rahmen dieser Gesamtbetrachtung wurden anhand der in Kapitel 2.2.3 erläuterten Formeln und Modelle weitergehende multivariate Auswertungen durchgeführt (siehe Tabelle 3-1). Darunter fallen die für Flachwasserhältnisse berechneten Parameter für die Sekundärwellenlänge ( $L_{SW}$ ), die Sekundärwellengeschwindigkeit ( $C_{SW}$ ) und die Sohlschubspannung der Sekundärwellen ( $\tau_{SW}$ ).

**Tabelle 3-1: Gemessene und berechnete (ab Nr. 43) Parameter des Messprogramms**

Nr.	Bezeichnung im Datensatz	Beschreibung	Parameter und Einheit
1	No	Laufende Nummer	
2	Date	Datum	TT.MM.JJJJ
3	Time	Eintrittszeit	hh.mm.ss
4	ZA	Absunk	Z <sub>A</sub> [m]
5	Hp	Höhe Primärwelle	H <sub>P</sub> [m]
6	Hsek	Höhe Sekundärwellen (Maximum pro Ereignis)	H <sub>S</sub> [m]
7	T_Hp	Primärwellenperiode	T <sub>P</sub> [m]
8	T_Su	Sunkzeit	T <sub>Su</sub> [s]
9	T_St	Stiegzeit	T <sub>St</sub> [s]
10	T_Hsek	Sekundärwellenperiode (Mittel pro Ereignis)	T <sub>S</sub> [s]
11	GS	Grundströmung an der Messsonde	V <sub>0</sub> [m/s]
12	GSR	Richtung Grundströmung	Θ <sub>V0</sub> [Grad]
13	vRS	Rückströmung	V <sub>R</sub> [m/s]
14	qRS	Richtung Rückströmung	Θ <sub>RS</sub> [Grad]
15	VHp	Primärwellenströmung	V <sub>HP</sub> [m/s]
16	qvHp	Richtung Primärwellenströmung	Θ <sub>VHP</sub> [Grad]
17	VHsek	Sekundärwellenströmung	V <sub>HS</sub> [m/s]
18	qvHsek	Richtung Sekundärwellenströmung	Θ <sub>VHS</sub> [Grad]
19	rWT	reduzierte Wassertiefe	ja/nein
20	multiPass	multi-Passage	ja/nein
21	bmPass	beeinflusst	ja/nein
22	PassTime	Passagezeit	hh.mm.ss
23	Name	Schiffsname	[]
24	Typ	Schiffstyp	[]
25	Length	Schiffslänge	Length [m]
26	Width	Schiffsbreite	Width [m]
27	Depth	Tiefgang	Depth [m]
28	COG	Fahrtrichtung	COG [Grad]
29	Direction	Richtung (HH/Cux)	ja/nein
30	SOG	Geschwindigkeit über Grund	SOG [kn]
31	R	Rechtswert (UTM 32N) Antenne	[m]
32	H	Hochwert (UTM32N) Antenne	[m]
33	Distance	Entfernung (Antenne - Sonde)	Distance [m]
34	ManEdit	Nacheditiert	ja/nein
35	HSC	Halunder-Jet	ja/nein
36	Hs	Seegang (Wellenhöhe)	H <sub>w</sub> [m]
37	TH13	Seegang (Wellenperiode)	T <sub>w</sub> [s]
38	Date2	kombiniertes Datum	TT.MM.JJ HH.MM
39	Current	Strömung Fahrwasser	[kn]
40	qTide	Ebbe/Flut	ja/nein
41	Gauge	Wasserstand (über Sensor)	d [m] + NHN
42	Tide	Ebbe/Flut	ja/nein
43	SiW	Geschwindigkeit im Wasser (SOG im Verhältnis zu Strömung im Fahrwasser und Tide)	SIW [kn]
44	Vol	nachträglich berechneter Parameter (Volume: Produkt von Length, Width und Depth)	[m <sup>3</sup> ]
45	ShipTypes2	Zusammenfassung verschiedener Schiffstypen gemäß Einordnung AIS	[]
46	vSW	berechnete Wellengeschwindigkeit der Sekundärwellen für Flachwasser (Gauge/g)	C <sub>SW</sub> [m/s]
47	L_HsekSW	berechnete Wellenlänge der Sekundärwellen für Flachwasser (T_Hsek*vSW)	L <sub>SW</sub> [m]
48	critWaveDepth	berechnete Wassertiefe, bei der die Grundberührung der Welle beginnt (L_HsekSW/2)	[m]
49	WNsw	berechnete Wellennummer der Sekundärwellen (2*PI/L_HsekSW)	WN <sub>SW</sub> [m <sup>-1</sup> ]
50	Usw	Orbitalgeschwindigkeit der Sekundärwellen	Ū <sub>δ</sub> [m/s]
51	TwSW	Sohlschubspannung unter den Sekundärwellen	τ <sub>sw</sub> [N/m <sup>2</sup> ]

Einfluss des schiffserzeugten Wellenschlages auf emerse Makrophyten der Tideelbe am Beispiel dreier exponierter Standorte – Ist-Zustand Untersuchungen im Rahmen des Planfeststellungsbeschlusses zur Fahrrinnenanpassung

BfG-1945

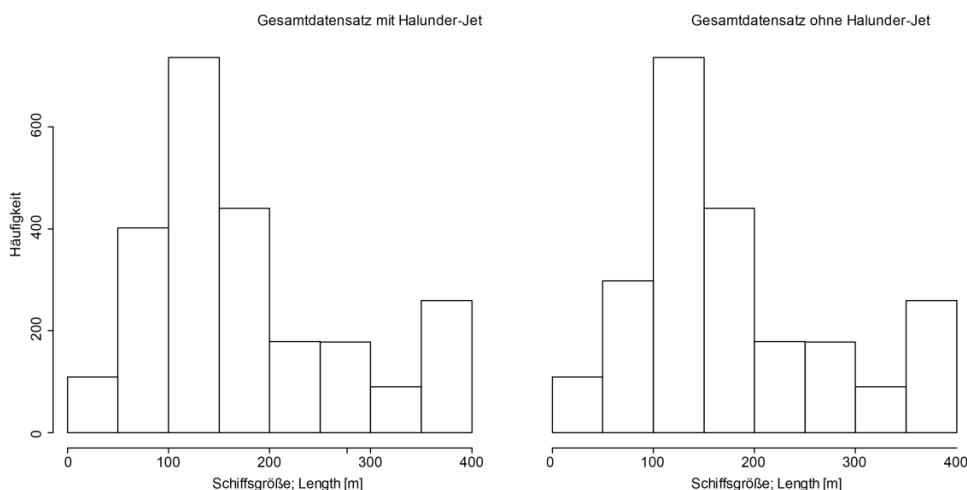
### 3.1 Standortübergreifende Analysen

*Cargo Ships*, also Fracht- und Containerschiffe, machen über 60 % der erfassten Schiffswellenergebnisse aus. Schiffe der AIS-Kategorie *Dredging or Underwater Operation* (Baggerschiffe etc.) und Tanker folgen mit jeweils ca. 15 % Anteil. Der Halunder-Jet (*High Speed Craft*) nimmt einen Anteil von ca. 4 % ein, während alle weiteren über AIS erkannten Typen jeweils nur mit 1 - 2 % für die erfassten Schiffswellenergebnisse verantwortlich sind (siehe Tabelle 3-2).

**Tabelle 3-2: Verteilung der Schiffstypen (gemäß AIS) auf die in die Auswertung eingegangenen Schiffswellenergebnisse in %**

	ohne Zuordnung	Dredging	High Speed Craft	Pilot, Tug, SAR, Law Enf.	Passenger Ship	Cargo Ship	Tanker	Other Types
Hollerwetter	1	16	4	2	1	63	12	1
Bielenberg	2	13	6	2	2	62	14	2
Schwarztonnensand	2	16	4	1	1	62	14	1
Alle Standorte	2	15	4	2	1	62	13	1

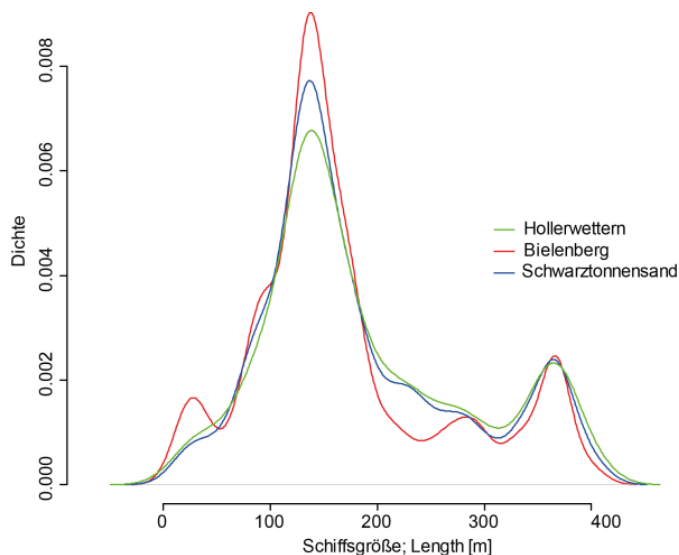
Die Schiffsgrößen, stellvertretend durch die Schiffslänge ausgedrückt, zeigen sich im Histogramm (siehe Abbildung 3-1, links) annähernd normalverteilt, mit einem zweiten leichten Peak für sehr große Schiffe (350 - 400 m Länge). Dieser zweite Peak resultiert ausschließlich aus der Passage großer Güterschiffe, in der Regel Containerschiffe. Die Herausrechnung des Halunder-Jets verändert die Verteilung der Schiffsgrößen nur unwesentlich (siehe Abbildung 3-1, rechts). Lediglich die Klasse der Schiffslängen 50 - 100 m fällt etwas kleiner aus (der Halunder-Jet ist 52 m lang).



**Abbildung 3-1: Verteilung der Schiffslängen der Schiffswellenergebnisse für alle bemessenen Standorte mit den Ereignissen durch den Halunder-Jet; n = 2393 (links) und ohne den Ereignissen des Halunder-Jets; n = 2289 (rechts)**

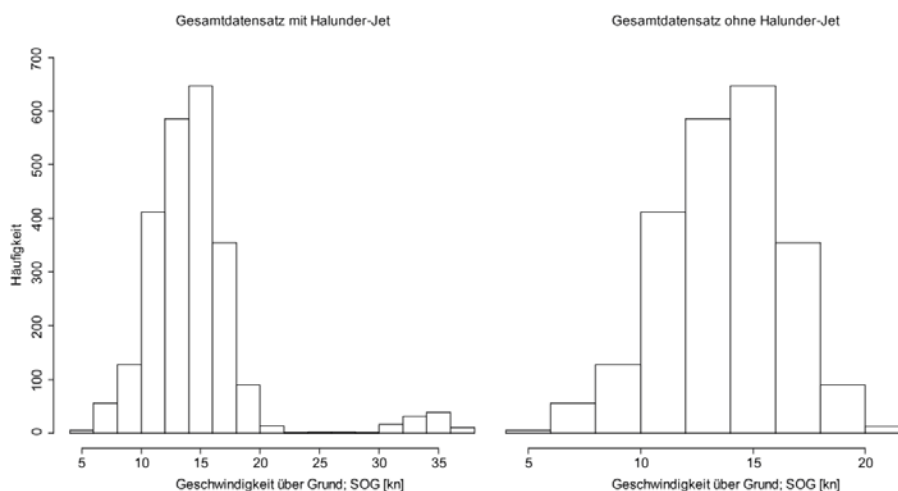


Da alle drei Standorte an der derselben Schiffsroute liegen, weisen auch alle Standorte eine sehr ähnliche und vergleichbare Verteilung der Schiffgrößen auf (siehe Abbildung 3-2). Die meisten Schiffe passieren auf ihrer Fahrt alle drei Standorte.



**Abbildung 3-2: Dichte der Werte der Schiffslängen der Schiffwellenereignisse für die drei Standorte im Vergleich (ohne Ereignisse des Halunder-Jets)**

Die Verteilung der registrierten Geschwindigkeiten der den Wellenereignissen zugeordneten Schiffe stellt sich für den Gesamtdatensatz bimodal verteilt dar, mit einer zweiten separaten Verteilung bei sehr hohen Geschwindigkeiten (siehe Abbildung 3-4, links). Werden die Ereignisse, die durch den Halunder-Jet ausgelöst werden, herausgerechnet, ist der Datensatz annähernd normalverteilt, da die Schnellfähre allein für diese Ereignisse der hohen Geschwindigkeiten verantwortlich ist.



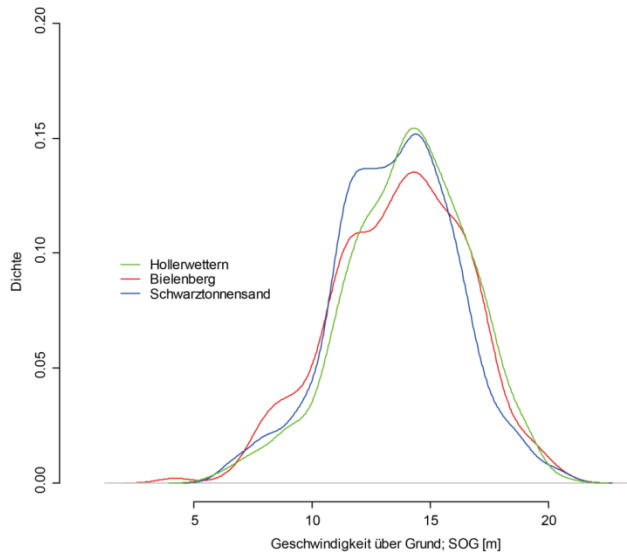
**Abbildung 3-3: Verteilung der Schiffsgeschwindigkeiten über Grund der Schiffwellenereignisse für alle bemessenen Standorte mit den Ereignissen durch den Halunder-Jet (links) und ohne den Ereignissen des Halunder-Jets (rechts)**

Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maike Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945

Wie bereits für die Schiffgrößen festgestellt sind die Verteilungen der gemessenen Schiffsgeschwindigkeiten an den drei Standorten sehr ähnlich und unter Herausrechnung des Halunder-Jets auch nahezu normalverteilt (siehe Abbildung 3-4).



**Abbildung 3-4: Dichte der Werte der Schiffsgeschwindigkeiten über Grund der Schiffwellenereignisse für die drei Standorte im Vergleich (ohne Ereignisse des Halunder-Jets)**

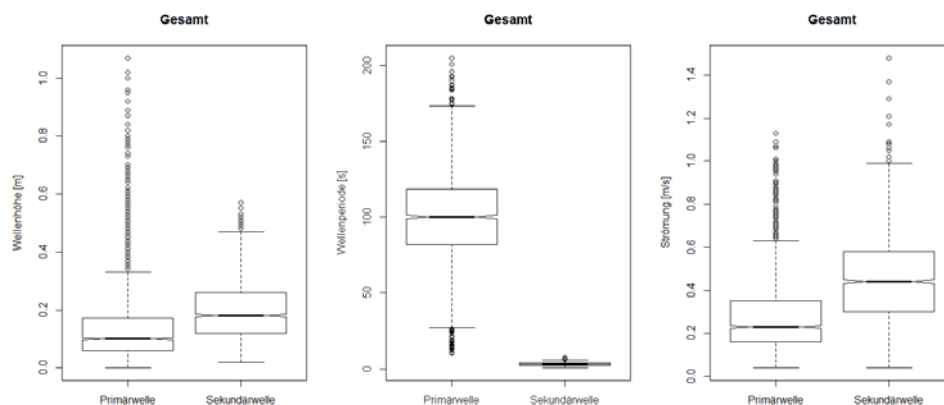
In

Tabelle 3-3 sind die Standardwellenparameter aller drei Standorte zusammengefasst. Die höchsten gemessenen Wellenereignisse sind Primärwellen von 1,07 m, beide eingetreten am Standort Hollerwettern am 20.10.2015 durch die Ym Witness (Containerschiff, Länge: 368 m, aktueller Tiefgang: 12,2 m, Geschwindigkeit im Wasser: 18,1 kn) im Begegnungsverkehr mit der OCCL Singapore (Containerschiff, Länge: 366 m, aktueller Tiefgang: 12,3 m, Geschwindigkeit im Wasser: 17,1 kn). Bereits die mittleren Wellenhöhen der höchsten 10 Prozent Wellen ( $H_{1/10}$ ) und die signifikanten Wellenhöhen ( $H_{1/3}$ ) sind bedeutend niedriger und zeigen nur unwesentliche Unterschiede zwischen Primär- und Sekundärwellen. Im arithmetischen Mittel sind die Sekundärwellen signifikant höher als die Primärwellen. Das höchste Sekundärwellenereignis wurde am 30.09.2015 vor Schwarztonnensand gemessen. Zugeordnet wurde dieses Ereignis der Passage der Baltic Klipper (Massengutfrachter, Länge: 165 m, aktueller Tiefgang: 8,3 m, Geschwindigkeit im Wasser: 16 kn). Sekundärwellen weisen auch die höheren Strömungswerte auf, mit Ausnahme  $X_{1/3}$ . Die deutlichsten Unterschiede zwischen Primär- und Sekundärwellen werden in der Wellenperiode sichtbar.

**Tabelle 3-3: Extreme und signifikante Wellenhöhen und -perioden, Min: Minimum, Max: Maximum, Mean: Mittelwert,  $X_{1/3}$ : Signifikante Wellenhöhe, -periode bzw. -strömung (Mittelwert der 33% der höchsten / längsten Wellenereignisse),  $X_{1/10}$ : Mittelwert der höchsten 10 % der höchsten / längsten Ereignisse,  $H_P$ : Primärwellenhöhe,  $T_P$ : Primärwellenperiode,  $H_S$ : Sekundärwellenhöhe,  $T_S$ : Sekundärwellenperiode,  $V_{HP}$ : Primärwellenströmung,  $V_{HS}$ : Sekundärwellenströmung**

	$H_P$ [m]	$H_S$ [m]	$T_P$ [s]	$T_S$ [s]	$V_{HP}$ [m/s]	$V_{HS}$ [m/s]
<b>Min</b>	0.01	0.02	0.70	0.60	0.04	0.04
<b>Max</b>	1.07	0.57	204.90	7.60	1.38	1.48
<b>Mean</b>	0.15	0.18	95.54	2.73	0.29	0.45
<b><math>X_{1/3}</math></b>	0.29	0.29	152.76	4.11	0.59	0.53
<b><math>X_{1/10}</math></b>	0.46	0.47	104.02	4.86	0.49	0.73

Ein differenzierteres Bild auf die Verteilungen der gemessenen Höhen, Perioden und Strömungen der Primär- und Sekundärwellenereignisse ist in Abbildung 3-5 zu erkennen. Während die Primärwellen bezgl. der Wellenhöhe zwar für die höchsten Einzelereignisse verantwortlich sind, sind sie im Mittel signifikant niedriger als die Sekundärwellen. Auch sind die den Sekundärwellen zugeordneten Strömungen signifikant höher als die der Primärwellen. Diamentral (Abbildung 3-5, mitte) unterscheiden sich die Wellenperioden zwischen Primär- und Sekundärwellen und weisen hier die größten Unterschiede bei den Wellenparametern auf.

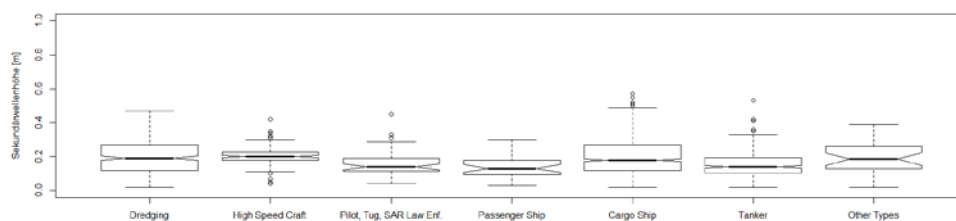


**Abbildung 3-5: Verteilung der gemessenen Wellenparameter Wellenhöhe, -periode und -strömung der Primär- und Sekundärwellen für den Gesamtdatensatz (n=2288)**

Da die Sekundärwellen in ihrer mittleren Gesamtheit die höheren Werte zu Höhe und Strömung aufweisen und im Gegensatz zu den Primärwellen ein Ereignis aus vielen Wellen besteht, wird im folgenden in erster Linie die Belastung der Standorte anhand der Sekundärwellen beschrieben. Des weiteren werden in den folgenden Analysen auch die Schiffswellen des Halunder-Jets nicht weiter betrachtet, da das Wellenbild in Kombination mit anderen Paramtern (Geschwindigkeit, Schiffsgröße) abweichend von allen anderen Schiffen ist und im Datensatz als Ausreißer markiert würden (siehe oben sowie die Abbildung 3-1, Abbildung 3-2, Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4).

Die erkannten Sekundärwellen dieser Schiffstypen variieren alle in einem ähnlichen Bereich. Auffällig sind dabei insbesondere die Fracht- und

Containerschiffe (Cargo Ship), die eine sehr große Variation aufzeigen und auch die höchsten Ausreißer aufweisen (siehe Abbildung 3-6).



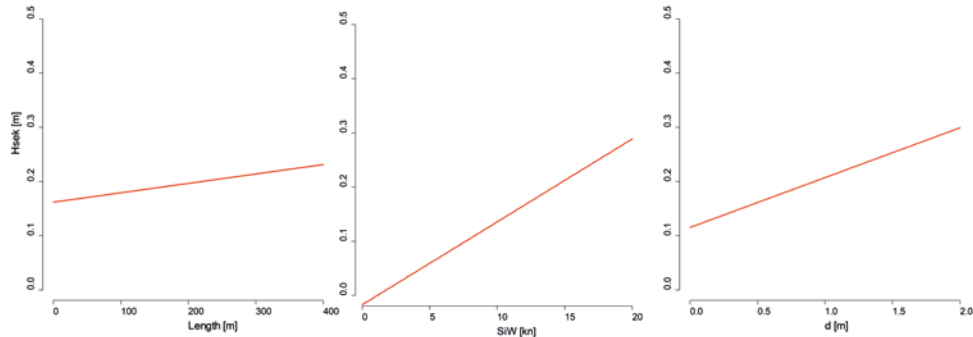
**Abbildung 3-6: Verteilung der gemessenen Sekundärwellenhöhen geordnet nach den durch AIS erkannten Schiffstypen**

Von Interesse ist dabei nicht nur der Abgleich der gemessenen Belastung mit der morphologischen und biologischen (Vegetation / Makrophyten) Dynamik der Standorte, sondern auch die Frage, welche Parameter allein oder in Kombination (z.B. Schiffsgröße, -tiefgang, -art, -geschwindigkeit, Wasserstand etc.) den größten erklärenden Anteil für die Ausbildung der Wellenereignisse in Größe und Art haben. Hierfür wurden verschiedene statistische Vorauswertungen vorgenommen und schließlich Regressionsmodelle mit den in Frage kommenden Parametern gerechnet. Dazu wurden zunächst die Autokorrelationen der Parameter untereinander bestimmt. Parameter die ein Korrelationskoeffizienten über 0,7 aufweisen gelten als zu stark autokorreliert, als dass sie gemeinsam als unabhängige Variablen in die Modellbildung eingehen könnten. Die Parameter Length, Width, Depth und Vol weisen alle einen Korrelationskoeffizienten von  $> 0,8$  auf. In den weiteren Analysen wird daher nur der Parameter Length zur Beschreibung der Schiffsgröße verwendet. Da die Wellenparameter Sekundärwellenhöhe und -strömung stark und Sekundärwellenhöhe und -periode zumindest schwach miteinander korrelieren (siehe Anhang IV), wird zunächst der Einfluss der äußeren schiffsgebundenen Parameter auf die Sekundärwellenhöhe stellvertretend für die weiteren Wellenparameter in die Modellbildung übernommen.

Die Sekundärwellenhöhe wird insbesondere durch die Parameter Schiffslänge (Length), Schiffsgeschwindigkeit im Wasser (SiW), Entfernung des Schiffes zum Standort (Distance), und Wasserstand (d) beschrieben. Distance ist nur im Gesamtdatensatz aller drei Standorte signifikant erklärend für die Sekundärwellenhöhe, da die drei Standorte unterschiedlich weit von der Fahrrinne entfernt liegen. Werden die drei Standorte separat betrachtet, ist die Varianz des Parameters zu gering, da die sie allein durch die Breite der Fahrrinne am Messpunkt festgelegt ist.

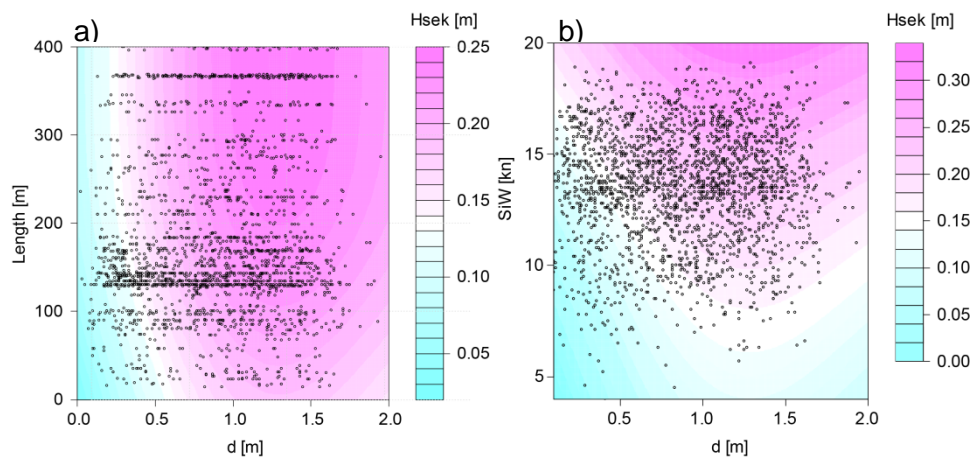
Für die Sekundärwellenhöhe wurden mit den Parametern Schiffslänge, -geschwindigkeit und Wasserstand am Sensor als Prädiktorvariablen Lineare Modelle (LM) gerechnet. Zwar werden alle Prädiktorvariablen als signifikant ausgegeben. Ihr Erklärungsanteil beträgt allerdings max. 15 % für

Schiffsgeschwindigkeit und Wasserstand und lediglich 3 % für die Schiffslänge,  
bzw. -größe (siehe Abbildung 3-7).



**Abbildung 3-7: LMs für die Sekundärwellenhöhe (Hsek) der signifikant erklärenden Parameter a) Schiffslänge (Length), Schiffsgeschwindigkeit (SiW) und Wasserstand am Sensor (d)**

Neben der Schiffsgeschwindigkeit, und im geringen Maße die Schiffgröße, ist der Wasserstand am Messstandort für die messbare Wellenhöhe verantwortlich. Je höher der Wasserstand, desto höher können Wellen auflaufen. Da die Geschwindigkeit der Schiffe vom lokalen / ufernahen Wasserstand unabhängig ist, muss davon ausgegangen werden, dass die höchsten Wellen bei entsprechend hoher Überflutung des Messstandortes und schnell fahrenden Schiffen möglich sind. Um diesen Zusammenhang sichtbar zu machen wurden zudem Generalisierte Additive Modelle (GAM) gerechnet und jeweils zwei Variablen gemeinsam (jeweils auf den Achsen), die die Sekundärwellenhöhe (Farbabstufung) erklären, in einen Plot dargestellt (Abbildung 3-8). Während in Abbildung 3-8 a) die Dominanz des Wasserstandes (d) gegenüber der Schiffslänge (Length) deutlich heraustritt, so ist in Abbildung 3-8 b) gut zu erkennen, dass die Sekundärwellenhöhe (Hsek) von den beiden Parametern Wasserstand und Schiffsgeschwindigkeit im Wasser (SiW) in etwa gleich abhängig ist, wobei allerdings beachtet werden muss, dass für kleine Schiffswellen der Wasserstand unbedeutend ist.

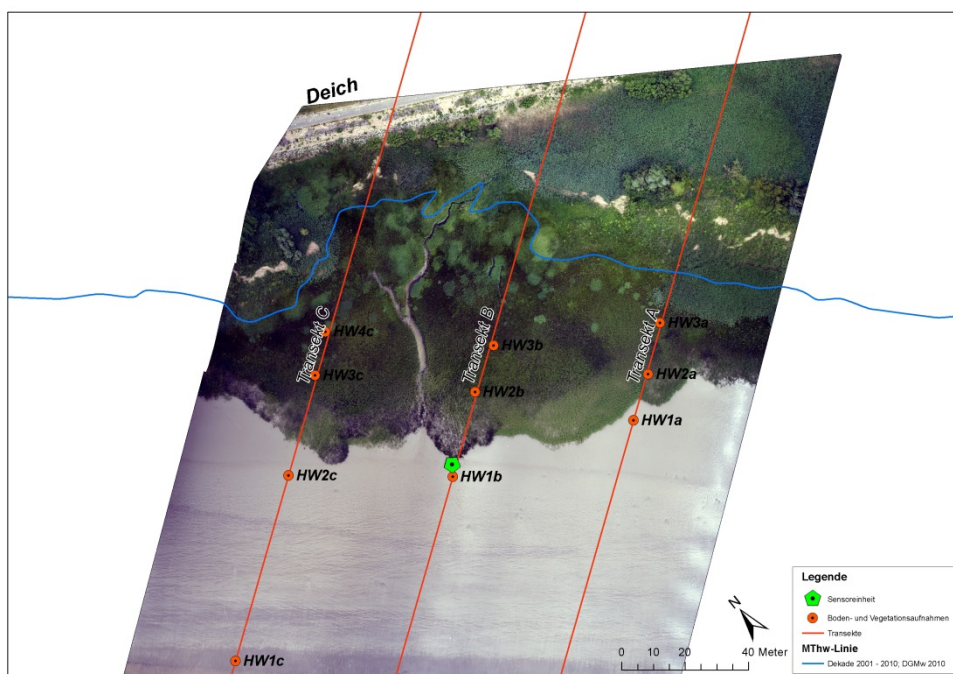


**Abbildung 3-8: GAMs der Sekundärwellenhöhe (Hsek), dargestellt als farbliche Abstufung a) für die Variablen Schiffslänge (Length) und Wasserstand am Sensor (d) und b) für die Variablen Schiffsgeschwindigkeit im Wasser (SiW) und Wasserstand am Sensor (d)**

### 3.2 Standort Hollerwettern

Der Standort Hollerwettern ist auf Höhe von Elbe-km 681 am schleswig-holsteinischen Ufer der Elbe zwischen der Störmündung und Brokdorf gelegen. Der Standort ist dem oligohalinen Abschnitt (Salzgehalt zwischen 0,5 und 5 ‰) des Übergangsgewässers Tideelbe nach WRRL zuzuordnen. Er ist durch ein flaches Sandwatt geprägt. Das Vorland wurde im Zuge des 13,5 m Ausbaus der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe 1974 - 1978 am vormals weitgehend schaarliegenden Deich mit Baggergutmaterial aufgespült. Es wurden Buhnen gebaut und der Deichfuß des neuen Landschutzdeiches durch ein Deckwerk befestigt (REUTER & REINER 1975).

In Abbildung 3-9 ist auf Grundlage der UAS-gestützten Luftbildaufnahme das Untersuchungsgebiet am Standort Hollerwettern dargestellt.



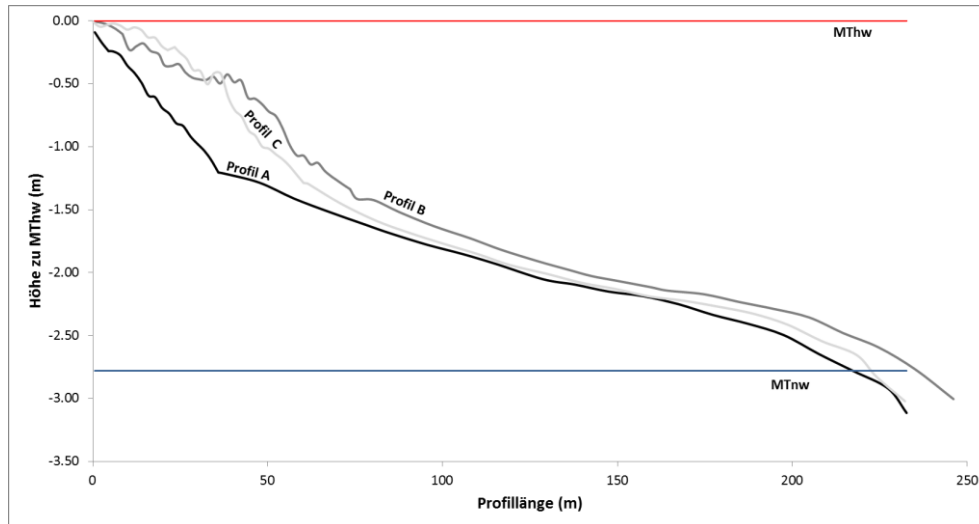
**Abbildung 3-9: Darstellung des Standortes Hollerwettern auf Grundlage des Orthoairbildes Sommer 2015**

Der Zentralpunkt (Standort Sensoreinheit) ist ca. 750 m von der Fahrinnenachse und 550 m vom Fahrrinnenrand entfernt. Nach Analysen von HEUNER (2006) zur Erstellung von Habitateignungsmodellen für Tideröhrichte ist ersichtlich, dass erst ab ca. 500 m Entfernung zur Fahrinnenachse Vegetationseinheiten von Röhrichten auftreten. Damit ist der Standort als deutlich exponiert zum Fahrwasser anzusprechen.

### 3.2.1 Abiotische Umweltparameter der Standorte

#### 3.2.1.1 Topographie

Für die seitens des WSA HH mit GNSS eingemessenen Transekte A, B und C beträgt der Abstand von der MTnw-Linie (ca. -1,23 m NHN) zur Vegetationsgrenze ca. 230 m. Das Gelände steigt relativ gleichmäßig von der MTnw-Linie zur Vegetationsgrenze an. Die mittlere Steigung beträgt im flachen Wattbereich ca. 1:100. Von der Vegetationsgrenze landwärts und ab der MTnw-Linie wasserwärts versteilen sich die Profile auf ca. 1:30 (siehe Abbildung 3-10).



**Abbildung 3-10: Höhenprofile der 3 Transekte des Standortes Hollerwettern (Höhendaten Sommer 2015, RTK-GNNS)**

Am Standort Hollerwettern beträgt die Tiefe, der im Mittel ersten Grundberührung der ankommenden Wellen -3,6 m NHN. Für den 100 m breiten Uferstreifen wurde ein entsprechendes Segment des DGMw 2010 von der Vegetationsgrenze bis zur genannten Tiefe ausgeschnitten. Der Raum über diesem Gelände bis zum mittleren Wasserstand im Messzeitraum (Median von  $d$  minus Höhe des Sensors) = 0,82 m NHN entspricht dem Wasservolumen, welches den ankommenden Wellen im Mittel zur Verfügung steht. Für Hollerwettern beträgt dieses Volumen 39 647 m<sup>3</sup>.

#### 3.2.1.2 Boden

Am Standort Hollerwettern herrscht Brackwatt (IWb) mit meist sandigem, kalkhaltigem Substrat vor. Am weitesten innerhalb der Vegetation finden sich an den Probenahmestellen Übergänge zur Rohmarsch (IWb-Mrb). Dort ist auch der Lehm- bzw. Schluffanteil (meist schluffig-lehmiger Sand (Slu) oder schwach sandiger Lehm (LS2)) jeweils höher als an den Probenahmestellen in der vorgelagerten Pionierzone (vorwiegend Mittelsand (mS)) und an den Wattstandorten (überwiegend feinsandiger Mittelsand (mSfs)). Dort finden sich zudem vereinzelt schwach lehmige Sande (Sl2) oder schluffig-lehmige Sand (Slu)) (siehe auch Aufnahmeblätter Böden im Anhang).



### 3.2.1.3 Strömung und Wellen

Im Messzeitraum wurden 3 282 Schiffspassagen über das automatische Identifikationssystem (AIS) festgestellt. Daraus konnten 921 Schiffswellenereignisse für den Standort Hollerwettern abgeleitet werden. Viele Schiffspassagen entfielen auf Zeiträume, in denen der Sensor nicht überflutet war (Ebbe). 538 Std. war der Sensor im Messzeitraum überflutet (siehe Tabelle 3-4).

**Tabelle 3-4: Zusammenfassung der analysierten Schiffswellenereignisse am Standort Hollerwettern sowie der Kennzahlen der Sekundärwellenereignisse  $H_{1/3}$ : signifikante Wellenhöhe,  $T_{SM}$ : mittlere Wellenperiode,  $d_M$ : mittlere Wasserstand,  $C_{SWM}$ : mittlere Wellengeschwindigkeit (berechnet),  $L_{SWM}$ : mittlere Wellenlänge,  $\hat{U}_{\delta m}$ : mittlere Orbitalgeschwindigkeit,  $\tau_{SWM}$ : mittlere Sohlschubspannung**

Standort Hollerwettern	
registrierte Schiffspassagen im Messzeitraum (20.09.2015 – 01.11.2015)	3 282
Anzahl der im Messzeitraum (6 Wochen) analysierten Schiffswellenereignisse	921
Anteil Schiffswellenereignisse [%]	28
Mittlere Anzahl Schiffswellenereignisse pro Tag	22
Höhenlage Messstation [m + NHN]	0.13
Entfernung Messstation – Fahrwassermitte [m]	750
signifikante Wellenhöhe: $H_{1/3}$ [m]	0.33
mittlere Wellenperiode: $T_{SM}$ [s]	4.23
mittlere Wasserstand: $d_M$ [m]	1.18
mittlere Wellengeschwindigkeit: $C_{SWM}$ [m/s]	3.4
mittlere Wellenlänge: $L_{SWM}$ [m]	11.91
mittlere Orbitalgeschwindigkeit: $\hat{U}_{\delta m}$ [m/s]	0.26
mittlere Sohlschubspannung unter der Sekundärwelle: $\tau_{SWM}$ [N/m <sup>2</sup> ]	1.02

### 3.2.2 Vegetation

Hollerwettern ist ein sehr heterogener Standort mit teilweise typischer Zonierung von Dominanzbeständen in der Abfolge Salz-Teichsimse (*Schoenoplectus tabernaemontani*), Strandsimse (*Bolboschoenus maritimus*) und Schilf (*Phragmites australis*). In den Zonen der Pionier-Röhrichte finden sich in einigen Bereichen flächendeckende Rasen der Einspelzigen Sumpfsimse (*Elocharis uniglumis*) im Unterwuchs. Auf erhöhten sandigen Rücken überwiegen Röhrichte mit Rohr-Glanzgras (*Phalaris arundinacea*). Diese kommen auch z. T. inselhaft und oftmals mit Hochstauden (z. B. Blutweiderich (*Lythrum salicaria*)) vergesellschaftet in den weiter rückwärtigen Gebieten der Pionier-Röhrichtzone vor. In den letzten 10 Jahren haben sich die Pionier-Röhrichte deutlich in das Watt ausgebreitet, zum Teil bis zu 20 m, insbesondere im Bereich des Transektes A.

#### 3.2.2.1 Einschätzung nach BMT-Verfahren

Der Zustand der Makrophyten wurde nach dem BMT-Verfahren als mäßig eingeschätzt (STILLER 2016).

Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maike Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945

TEL-MP-W3-H - Hollerwettern	Übergangsgewässer T1 - oligohalin /
	<p><u>Ufermorphologie:</u> naturnahes, unverbautes Ufer mit relativ festem Sandwatt, wasserseitig zunächst mit Sandrippeln, anschließend stellenweise mit freigespülten, oberflächlich anstehenden Schlicklinsen; Ufer flach und breit, fahrrinnennah</p> <p><u>Gewässerumfeld:</u> Ufervegetation: Röhricht Umland: Deich mit Intensivgrünland</p>
<p>Der Standort wird von einem artenreichen Tideröhricht mit typischen Begleitarten geprägt, wobei der Frühjahrsaspekt mit Sumpf-Dotterblume (<i>Caltha palustris</i>) nur mäßig ausgebildet ist. Die Zonierung ist mitunter undeutlich ausgeprägt. Uferwärts dominiert teils Schilf (<i>Phragmites australis</i>), teils Strandsimse (<i>Bolboschoenus maritimus</i>). Letztere ist überwiegend mit Rohr-Glanzgras (<i>Phalaris arundinacea</i>), typischen Hochstauden (<i>Lythrum salicaria</i>) und Kleinröhrichtarten (<i>Nasturtium officinale</i>) vermischt. Wasserseitig kommt die Sumpfsimse (<i>Eleocharis uniglumis</i>) teils rasenbildend im Unterwuchs vor. Dort, wo sich die Pflanzen entmischen bilden sie wechselnde Dominanzbestände. Ab der Mitte stromabwärts ist der Strandsimse die Salz-Teichsimse (<i>Schoenoplectus tabernaemontani</i>) vorgelagert.</p> <p>Die Siedlungstiefe des Röhrichtsaums beträgt ca. 1,5 m NHN. Die Ausdehnung ist mit 77 m optimal. Vegetationszonierung und Vitalität weichen nur geringfügig vom Referenzzustand ab.</p>	
Ökologischer Zustand: mäßig	

**Abbildung 3-11: Zusammenfassende Darstellung der Einschätzung des Makrophytenbestandes Hollerwettern nach BMT-Verfahren, aus STILLER (2016), Foto: Michael Stöber**

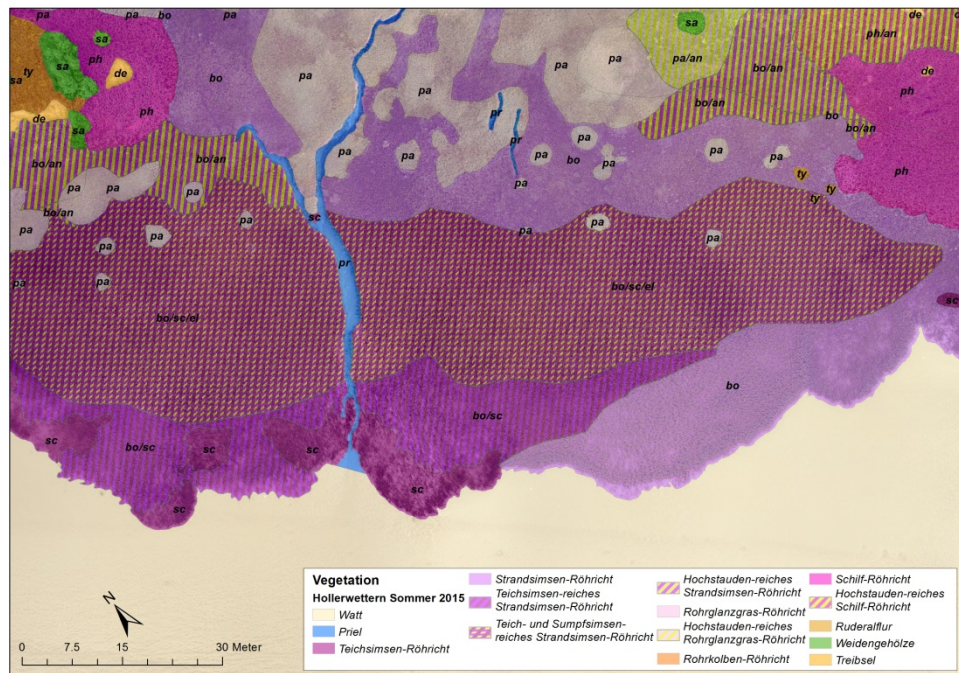
### 3.2.2.2 Räumliche Verteilung der Vegetation

Die Vegetationseinheiten, die aus dem Ortholuftbild abgeleitet und entsprechend *in situ* verifiziert werden konnten, stellen ein sehr heterogenes Muster dar. Aufgrund unterschiedlicher Substratzusammensetzungen des Untergrundes und unterschiedlicher Geländehöhen, bilden sich kleinräumig verschiedene Vegetationseinheiten mit dominanten Röhrichtarten und unterschiedlichen Begleitarten (siehe Abbildung 3-12). Es wurden 14 Vegetationseinheiten nach Dominanzarten unterschieden, die auch im Luftbild gut abgrenzbar waren.

Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maïke Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945



**Abbildung 3-12: Ausschnitt aus der Luftbildkartierung Hollerwettern Sommer 2015 (Kürzel: siehe Tabelle 3-5; im Hintergrund UAV-Ortholuftbild Sommer 2015)**

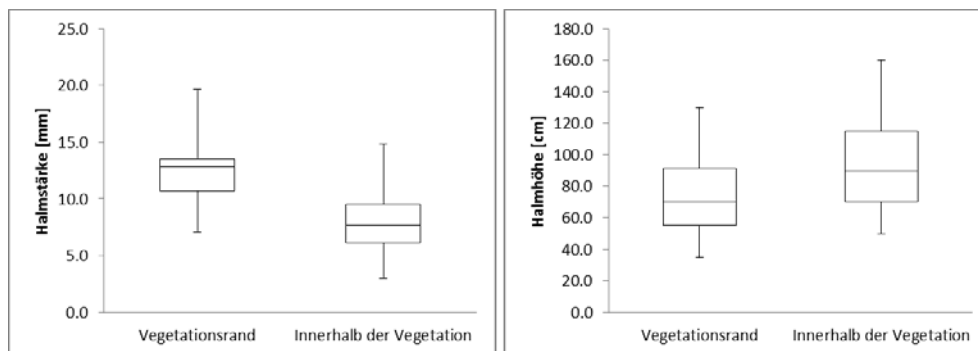
Für die Berechnung der Heterogenität des Standortes wurde der gut ausgeprägte Priel als strukturgebendes Element als Einheit mitberücksichtigt. Das geschlossene zusammenhängende vorgelagerte Watt wurde nicht als Einheit einbezogen (siehe Tabelle 3-5). Der berechnete Heterogenitätsindex des Standortes Hollerwettern beträgt 0,81 und ist damit als hoch zu betrachten.

**Tabelle 3-5: Kartierte Vegetationseinheiten 2015 am Standort Hollerwettern**

Nr	Kürzel	Bezeichnung	Anzahl Patches	Flächensumme [m <sup>2</sup> ]
1	bo	Strandsimsen-Röhricht	2	2 671
2	bo/an	Hochstauden-reiches Strandsimsen-Röhricht	3	653
3	bo/sc	Teichsimsen-reiches Strandsimsen-Röhricht	2	891
4	bo/sc/el	Teichsimsen- und Sumpfsimsen-reiches Strandsimsen-Röhricht	2	3 274
5	de	Treibsel	12	140
6	pa	Rohrglanzgras-Röhricht	26	1 839
7	pa/an	Hochstauden-reiches Rohrglanzgras-Röhricht	1	146
8	ph	Schilf-Röhricht	4	3 996
9	ph/an	Hochstauden-reiches Rohrglanzgras-Röhricht	1	706
10	pr	Priel	3	138
11	ru	Ruderalflur	1	365
12	sa	Weidengehölze	19	677
13	sc	Teichsimsen-Röhricht	7	455
14	ty	Rohrkolben-Röhricht	5	268

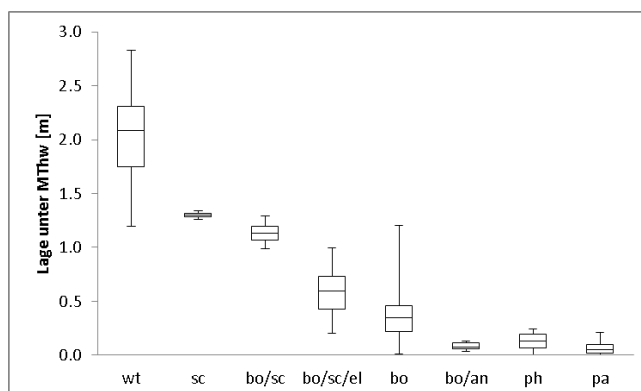
### 3.2.2.3 Sonstige Vegetationsdaten

Die Pflanzenparameter Halmstärke (gemessen 5 cm über Grund) und -höhe sowie die Stängeldichte der Strandsimse unterscheiden sich im Vergleich der exponierten Pflanzen am äußeren Vegetationsrand von denen innerhalb des Bestandes. Die Halmstärke der Pflanzen an der wasserseitigen Vegetationsgrenze ist im Mittel 4 mm größer als die der Pflanzen innerhalb des Bestandes und damit signifikant unterschiedlich. Gleichzeitig sind die Pflanzen am äußeren Vegetationsrand im Mittel ca. 17 cm kleiner als die innerhalb des Bestandes (siehe Abbildung 3-13). Während an der Vegetationsgrenze die Pflanzendichte ca. 58 Pflanzen pro m<sup>2</sup> beträgt, ist sie innerhalb des Bestandes mit ca. 182 Pflanzen pro m<sup>2</sup> mehr als dreimal so hoch.



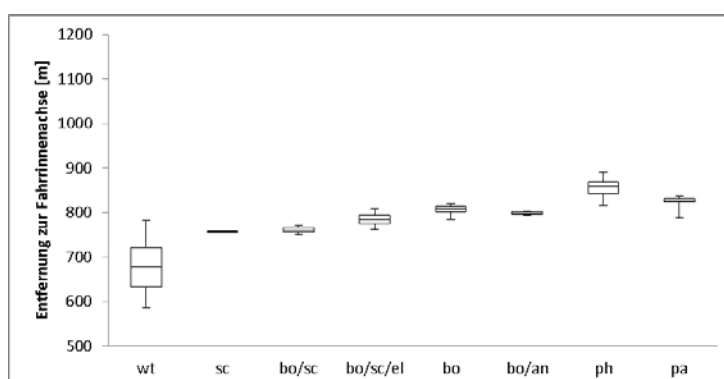
**Abbildung 3-13: Pflanzenparameter Halmstärke, 5 cm über Grund (links) und Halmhöhe (rechts) von *Bolboschoenus maritimus* an der wasserseitigen Vegetationsgrenze (n=36) und innerhalb des Bestandes (n=116) am Standort Hollerwettern (jeweils 5 Plots à 0,126 m<sup>2</sup> innerhalb Vegetation und an der Vegetationsgrenze)**

Die Höhenlagen der kartierten Vegetationseinheiten an den mit GNSS eingemessenen Transekten zeichnen eine typische Zonierung ab. Am tiefsten siedeln die Pioniergesellschaften der Teichsimsen-Röhrichte (sc) und die Teichsimsen-reichen Strandsimsen-Röhrichte (bo/sc) in ca. 1 m unterhalb von MThw. Nur knapp unterhalb von MThw treten die Schilf-Röhrichte (ph), die Rohrglanzgras-Röhrichte (pa) und die Hochstauden-reichen Strandsimsen-Röhrichte (bo/an) auf. Die Teichsimsen-reichen Strandsimsen-Röhrichte mit Sumpfsimse im Unterwuchs (bo/sc/el) und die reinen Strandsimsen-Röhrichte (bo) stellen sich dazwischen ein (siehe Abbildung 3-14).



**Abbildung 3-14: Höhenlagen der kartierten Vegetationseinheiten unter MThw auf Grundlage der Verschneidung der flächenhaften Kartierung mit den Höhendaten der Transektmessungen, wt: n=55, sc: n=3, bo/sc: n=13, bo/sc/el: n=35, bo: n=23, bo/an: n=6, ph: n=4, pa: n=6 (Bedeutung der Kürzel siehe Tabelle 3-5)**

Die Vegetationseinheiten zeigen die gleiche Zonierung, wenn die Parameter relative Höhenlage zum MThw und ihre Lage zur Fahrrinnenachse als Proxy für die Schiffswellenbelastung verglichen werden (siehe Abbildung 3-15). Bei einem gleichmäßig abfallenden Ufer, wie es am Standort Hollerwettern der Fall ist, ist dieser Zusammenhang zwangsläufig. Dementsprechend sind die Teichsimsen-Röhrichte und die Teichsimsen-reichen Strandsimsen-Röhrichte den längsten Überstaudauern und der stärksten Belastung durch Schiffswellen ausgesetzt.

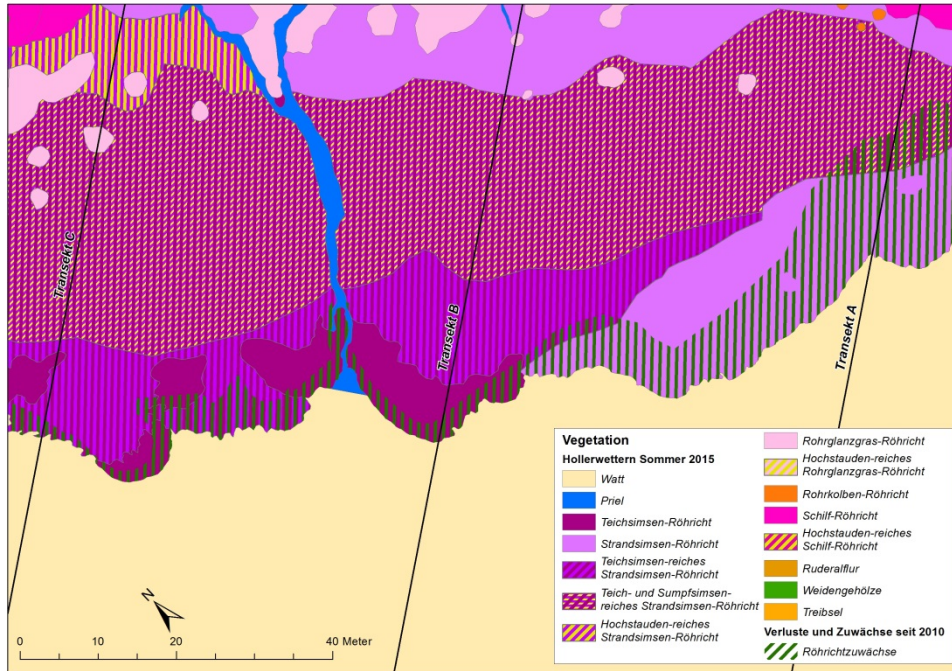


**Abbildung 3-15: Lage der kartierten Vegetationseinheiten unter MThw auf Grundlage der Verschneidung der flächenhaften Kartierung mit den Punkten der Transektmessungen zur Fahrrinnenachse (kürzeste Distanz); wt: n=55, sc: n=3, bo/sc: n=13, bo/sc/el: n=35, bo: n=23, bo/an: n=6, ph: n=4, pa: n=6 (Bedeutung der Kürzel siehe Tabelle 3-5)**

### 3.2.3 Erste Einschätzung des Standortes Hollerwettern aufgrund der Ist-Zustandserfassung

Hollerwettern stellt sich von der Vegetation als ein sehr heterogener Standort mit teilweiser typischer Zonierung von Dominanzbeständen dar. Im Bereich des Transektes A hat sich das Pionier-Röhricht im Vergleich zu der Vegetationserfassung von 2010/2011 teils deutlich ausgebreitet. Das reine Strandsimsen-Röhricht im Gebiet des Transektes A hat sich dabei stärker ausgebreitet als das Teichsimsen-Röhricht und das Teichsimsen-reiche

### Strandsimsen-Röhricht in den Gebieten der Transekte B und C.



**Abbildung 3-16: Ausschnitt der Bestandskarte 2015 für Standort Hollerwettern mit den Veränderungen seit 2010 gemäß Luftbildauswertung 2010/2011 nach PETERSEN *et al.* (2011)**

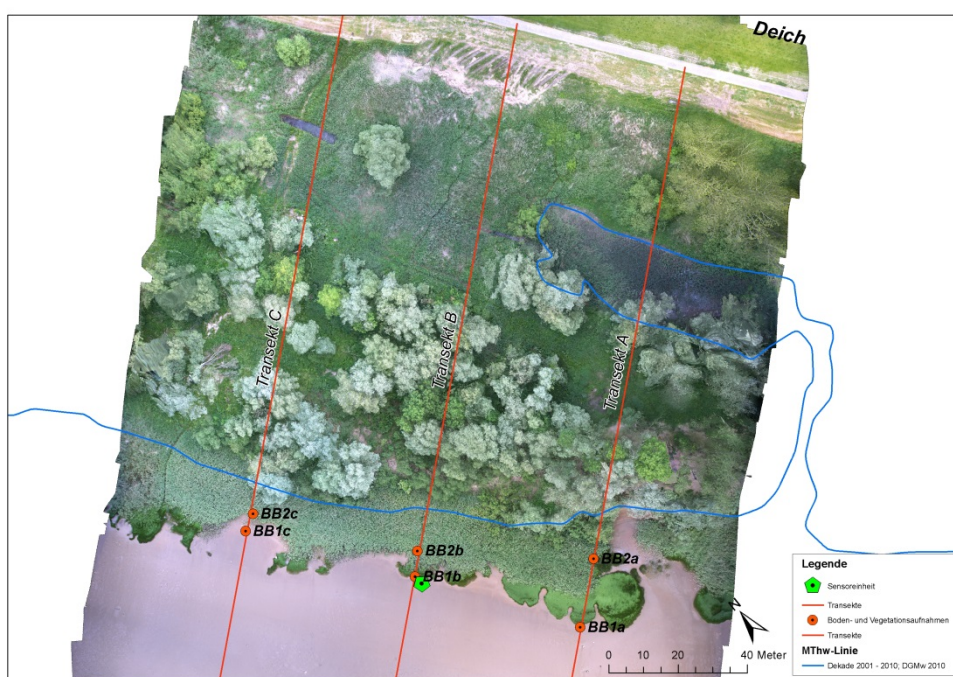
Trotz der deutlich exponierten Lage (Nähe zur Fahrrinne) und der mit ihr zusammenhängen Belastung durch Schiffswellen ( $H_{1/3} = 0,33$  m) kann sich hier offenbar ein nach BMT-Verfahren als mäßig eingestufter sehr heterogener Makrophytenstandort (STILLER 2016) halten und durchaus entwickeln. Der Einfluss hydraulischer Belastung, z.B. durch Wellen und Strömung, auf die Pflanzen ist durch die klar unterschiedliche morphologische Ausprägung der am Vegetationsgrenze wachsenden Pflanzen der Strandsimse im Vergleich mit denen geschützter wachsenden Pflanzen innerhalb des Bestandes dokumentiert (siehe Abbildung 3-17).



### 3.3 Standort Bielenberg

Der Standort Bielenberg liegt bei Elbe-km 670 am schleswig-holsteinischen (rechten) Ufer der Elbe südlich der Insel Rhinplate. Der Standort ist wie Hollerwettern dem oligohalinen Abschnitt (Salzgehalt zwischen 0,5 und 5 ‰) des Übergangsgewässers Tideelbe nach WRRL zuzuordnen. Der Standort ist durch ein flaches Sandwatt geprägt. Das Vorland wurde im Zuge des 13,5 m Ausbaus der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe 1974-1978 und der gleichzeitigen Verstärkung des Landschutzdeiches im Auftrag der Stadt Glückstadt mit Baggermaterial aufgespült (REUTER & REINER 1975).

In Abbildung 3-18 ist auf Grundlage UAS-gestützten Luftbilderfassung das Untersuchungsgebiet am Standort Hollerwettern dargestellt.



**Abbildung 3-18: Darstellung des Standortes Bielenberg auf Grundlage des Ortho-Luftbildes Sommer 2015**

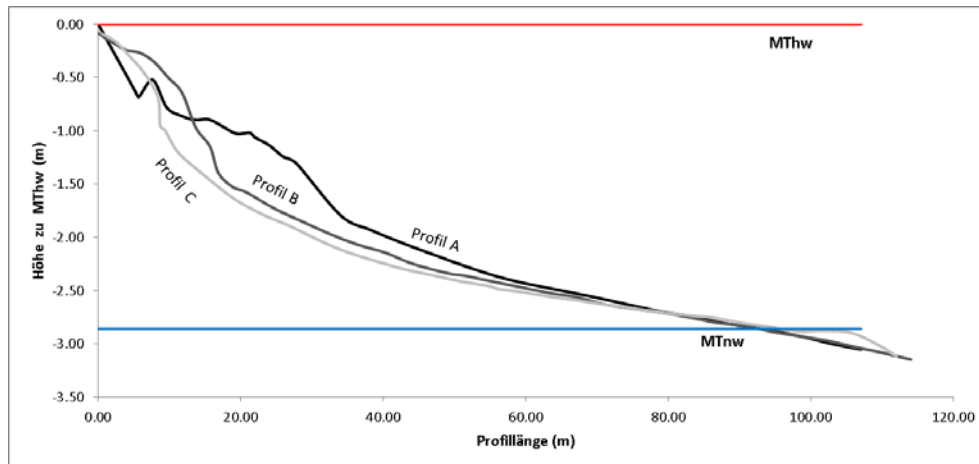
Der Zentralpunkt (Standort Sensoreinheit) ist ca. 1 055 m von der Fahrrinnenachse und 900 m vom Fahrrinnenrand entfernt. Somit ist der Standort im Vergleich zu den Standorten Hollerwettern und Schwarztonnensand eher mäßig exponiert.

#### 3.3.1 Abiotische Umweltparameter der Standorte

##### 3.3.1.1 Topographie

Das Gebiet am Standort Bielenberg wird durch ein flaches Sandwatt geprägt, welches sich von Transekt A hin zu Transekt C etwas versteilt. Der Abstand am Transekt A von der MThw-Linie (ca. -1,23 m NHN) zur Vegetationsgrenze beträgt ca. 70 m. Das Gelände steigt relativ gleichmäßig von der MThw-Linie zur Vegetationsgrenze an. Nach einer Steigung von ca. 1:70 versteilt sich das Gelände

über eine Länge von 5 bis 10 m vor der Vegetationsgrenze auf ca. 1:12,5. Das Transekt B weist einen Abstand von der MTnw-Linie (ca. -1,23m NHN) zur Vegetationsgrenze von ca. 80 m auf. Nach einer Steigung von ca. 1:95 versteilt sich das Gelände über eine Länge von ca. 20 m vor der Vegetationsgrenze auf ca. 1:25. Der Abstand von der MTnw-Linie (ca. -1,23 m NHN) zur Vegetationsgrenze beträgt am Transekt C ca. 100 m. Nach einer Steigung von ca. 1:95 versteilt sich das Gelände über ca. 20 m vor der Vegetationsgrenze auf ca. 1:20 (siehe Abbildung 3-19).



**Abbildung 3-19: Höhenprofile der drei Transekte des Standortes Bielenberg (Höhendaten Sommer 2015, RTK-GNSS)**

Am Standort Bielenberg beträgt die Tiefe, der im Mittel ersten Grundberührung der einlaufenden Wellen -3,71 m NHN. Für den 100 m breiten Uferstreifen wurde ein entsprechendes Segment des DGMw 2010 von der Vegetationsgrenze bis zur genannten Tiefe ausgeschnitten. Der Raum über diesem Gelände bis zum mittleren Wasserstand (Median von  $d$  minus Höhe des Sensors = 0,67 m NHN) entspricht dem Wasservolumen, welches den ankommenden Wellen zur Verfügung steht. Für Bielenberg beträgt dieses Volumen 51 271 m<sup>3</sup>.

### 3.3.1.2 Boden

Flusswatt (IWf) mit meist sandigem, kalkhaltigem Substrat, z.T. im Übergang zur Rohmarsch (Mrb-IWf) an den Probenahmestellen innerhalb der Vegetation. Der Schluffanteil im obersten Bodenhorizont nimmt von Transekt A zu C etwas zu (siehe auch Aufnahmeblätter Böden im Anhang).

### 3.3.1.3 Strömung und Wellen

Im Messzeitraum wurden 3 472 Schiffspassagen über das automatische Identifikationssystem (AIS) festgestellt. Daraus konnten 599 Schiffswellenergebnisse für den Standort Bielenberg abgeleitet werden. Viele Schiffspassagen entfielen auf Zeiträume, in denen der Sensor nicht überflutet war oder die Passagen kein ausreichend identifizierbares Schiffswellenergebnis hervorbrachte (siehe Tabelle 3-6).



**Tabelle 3-6: Zusammenfassung der analysierten Schiffswellenereignisse am Standort Bielenberg**

Standort Bielenberg	
registrierte Schiffspassagen im Messzeitraum (20.09.2015 – 01.11.2015)	3 472
Anzahl der im Messzeitraum (6 Wochen) analysierten Schiffswellenereignisse	599
Anteil Schiffswellenereignisse [%]	17
Mittlere Anzahl Schiffswellenereignisse pro Tag	14
Höhenlage Messstation [m + NHN]	0.2
Entfernung Messstation – Fahrwassermittelpunkt [m]	1 055
signifikante Wellenhöhe: $H_{1/3}$ [m]	0.26
mittlere Wellenperiode: $T_{SM}$ [s]	4.32
mittlere Wasserstand: $d_M$ [m]	0.95
mittlere Wellengeschwindigkeit: $C_{SWM}$ [m/s]	3.05
mittlere Wellenlänge: $L_{SWM}$ [m]	10.99
mittlere Orbitalgeschwindigkeit: $\hat{U}_{\delta m}$ [m/s]	0.23
mittlere Sohlschubspannung unter der Sekundärwelle: $\tau_{SWM}$ [N/m <sup>2</sup> ]	0.82

Einfluss des schiffserzeugten Wellenschlages auf emerse Makrophyten der Tideelbe am Beispiel dreier exponierter Standorte – Ist-Zustand Untersuchungen im Rahmen des Planfeststellungsbeschlusses zur Fahrrinnenanpassung

BfG-1945

### 3.3.2 Vegetation

Bielenberg ist einfacher strukturiert als der Standort Hollerwettern und ist vornehmlich ein mit Schilf-Röhricht bestandener Standort. In vielen Bereichen ist dem Schilf-Röhricht ein Sumpfsimsen-Röhricht vorgelagert. In einigen Bereichen sind deutliche Erosionsspuren zu erkennen, teilweise mit freigespülten Rhizomen des Schilfes.

### 3.3.2.1 Einschätzung nach BMT-Verfahren

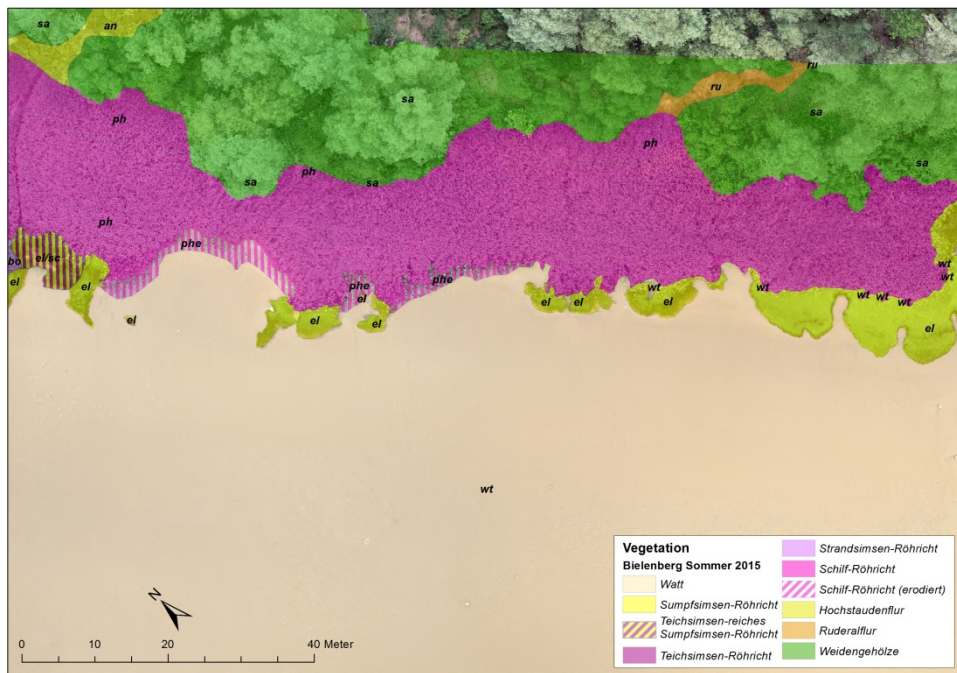
Der Zustand der Makrophyten wurde nach dem BMT-Verfahren als unbefriedigend eingeschätzt (STILLER 2016).

TEL-MP-W2-B - Bielenberg	Übergangsgewässer T1 - oligohalin /
	<p><u>Ufermorphologie:</u></p> <p>naturnahes, unverbautes Ufer mit relativ festem Sandwatt und kleiner Abbruchkante im Schilf-Röhricht, wasserseitig stellenweise mit freigespülten, oberflächlich anstehenden Schlicklinsen;</p> <p>Ufer mäßig flach und breit, fahrrinnenfern</p>
<p>Einem durchgehenden Schilf-Saum (<i>Phragmites australis</i>) ist abschnittsweise ein schmaler Sumpfsimsen-Gürtel (<i>Eleocharis uniglumis</i>) vorgelagert. Der Frühjahrsaspekt wird in erster Linie von Scharbockskraut (<i>Ranunculus ficaria</i>) gebildet. Dort wo die Sumpfsimse wasserseitig fehlt, weist das Schilf starke Erosionsschäden mit freigespülten Rhizomen auf. Die relativ vielen Begleitarten kommen nur mit ein bis wenigen Exemplaren im Bestand vor. Im Schilf-Bestand ist eine kleine Abbruchkante ausgebildet, die stromab auch die untere Vegetationsgrenze bildet. - Stromauf grenzt unmittelbar an den Kartierabschnitt ein kleiner Bestand der vom Aussterben bedrohten Kleinen Dreikantigen Teichsimse (<i>Schoenoplectus pungens</i>) an.</p> <p>Die maximale Siedlungstiefe der Sumpfsimse liegt bei ca. 1,5 m unter MThw. Die Ausdehnung ist mit ca. 20 m gering und da die Pionierzonen völlig fehlen ist die Vegetationszonierung unvollständig. Die wasserseitigen Pflanzen sind teils stark in ihrer Vitalität beeinträchtigt.</p>	
<p>Ökologischer Zustand: unbefriedigend</p>	

**Abbildung 3-20: Zusammenfassende Darstellung der Einschätzung des Makrophytenbestandes Bielenberg nach WRRL (aus STILLER (2016)), Foto: Michael Stöber**

### 3.3.2.2 Räumliche Verteilung der Vegetation

Aufgrund der sehr einfach strukturierten Uferzonierung der in ihrer Ausprägung sehr verschiedenen Dominanzeinheiten des Schilf- und des Sumpfsimsen-Röhrichts konnten die Vegetationseinheiten sehr exakt aus dem Ortholuftbild abgeleitet werden. Neben diesen großen Einheiten wurden nur einzelne und sehr kleine Bestände mit Salz-Teichsimse und Meer-Strandsimse an den Rändern des Standortes erfasst. Als zusätzliche Einheit wurden sehr lückige und durch Erosion geschädigte Bereiche des Schilf-Röhrichts (mit frei gespültem Rhizom) mit als Einheit aufgenommen (siehe Abbildung 3-21). Insgesamt wurden neun Vegetationseinheiten nach Dominanzarten unterschieden, die auch im Luftbild gut abgrenzbar waren. Dabei muss aber beachtet werden, dass die Einheiten Weidengehölze, Ruderalflur und Hochstauden oberhalb von MThw und daher außerhalb des eigentlichen Betrachtungsraumes liegen.



**Abbildung 3-21: Ausschnitt aus der Luftbildkartierung Bielenberg, Sommer 2015 (Kürzel: siehe Tabelle 3-7; im Hintergrund UAV-Orthofluorbild Sommer 2015)**

Für die Berechnung der Heterogenität wurde das geschlossene zusammenhängende vorgelagerte Watt nicht als Einheit mit berücksichtigt (siehe Tabelle 3-7). Der für Bielenberg berechnete Heterogenitätsindex der Vegetationseinheiten beträgt 0,53. Die Einbeziehung der Einheiten am Rand des Betrachtungsraumes oberhalb von MThw hat dabei keinen wesentlichen Einfluss auf den Heterogenitätsindex.

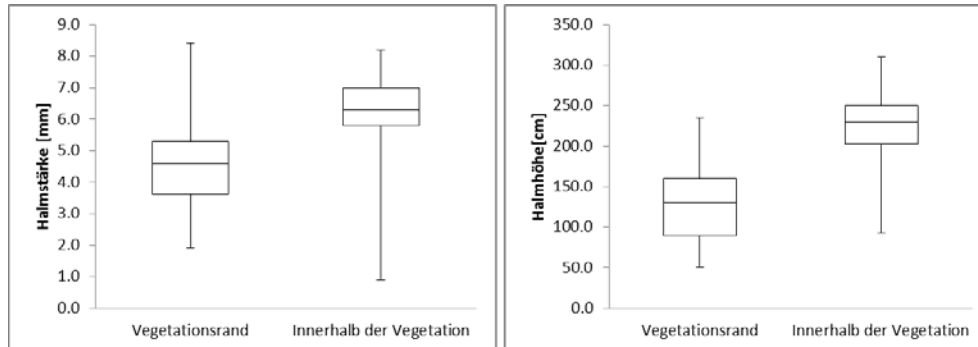
**Tabelle 3-7: Kartierte Vegetationseinheiten 2015 am Standort Bielenberg**

Nr	Kürzel	Bezeichnung	Anzahl Patches	Flächensumme [m <sup>2</sup> ]
1	sc	Teichsimsen-Röhricht	1	37
2	bo	Strandsimsen-Röhricht	1	34
3	el	Sumpfsimsen-Röhricht	16	651
4	ph	Schilf-Röhricht	2	2 651
5	phe	Schilf (erodiert)	3	109
6	el/sc	Teichsimsen-reiches Sumpfsimsen-Röhricht	1	52
7	ru	Ruderalflur	1	48
8	sa	Weidengehölze	3	2 660
9	an	Hochstaudenflur	1	134

### 3.3.2.3 Sonstige Vegetationsdaten

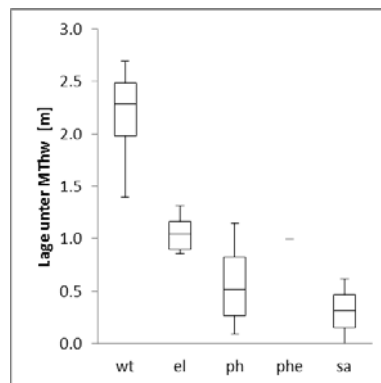
Die Pflanzenparameter Halmstärke (gemessen 10 cm über Grund) und -höhe sowie die Pflanzendichte wurden am Standort Bielenberg abweichend von den anderen Standorten an *Phragmites australis* (Schilf) erhoben. Die Halmstärke der Pflanzen an der Vegetationsgrenze ist im Mittel ca. 1,9 mm geringer als die der Pflanzen innerhalb des Bestandes und damit signifikant unterschiedlich. Gleichzeitig sind die Pflanzen an der wasserseitigen Vegetationsgrenze im Mittel ca. 100 cm kleiner

als die innerhalb des Bestandes (siehe Abbildung 3-22). Während an der wasserseitigen Vegetationsgrenze die Pflanzendichte im Durchschnitt 202 Pflanzen pro m<sup>2</sup> beträgt, ist sie innerhalb des Bestandes deutlich geringer, ca. 132 Pflanzen pro m<sup>2</sup>.



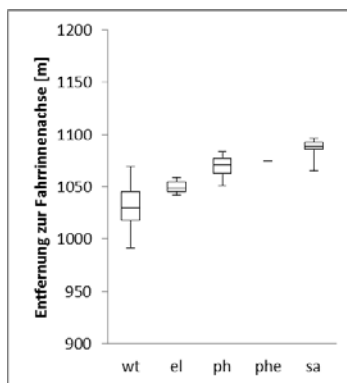
**Abbildung 3-22: Pflanzenparameter Halmstärke, 10 cm über Grund (links) und Halmhöhe (rechts) von *Phragmites australis* am äußeren Vegetationsrand (n=83) und innerhalb des Bestandes (n=127) am Standort Bielenberg (jeweils 5 Plots à 0,126 m<sup>2</sup> innerhalb Vegetation und am Vegetationsrand)**

Die Höhenlage der kartierten Vegetationseinheiten an den mit GNSS eingemessenen Transekten zeichnet eine klare Zonierung der beiden Dominanzbestände des Sumpfsimsen-Röhrichts (el) und des Schilf-Röhrichte (ph). Im Höhenbereich knapp unterhalb von MThw geht das Schilf-Röhricht in die Weidenstandorte (sa) über (siehe Abbildung 3-23). Die Einheit „Schilf-Röhricht erodiert“ (phe) findet sich zwischen dem Sumpfsimsen-Röhricht und dem Schilf-Röhricht.



**Abbildung 3-23: Höhenlage der kartierten Vegetationseinheiten des Standortes Bielenberg unter MThw auf Grundlage der Verschneidung der flächenhaften Kartierung mit den Höhendaten der Transektmessungen, wt: n=42, el: n=8, ph: n=23, phe: n=1, sa: n=6, (Bedeutung der Kürzel siehe Tabelle 3-7)**

Hinsichtlich ihrer Lage zur Fahrrinnenachse zeigen die Vegetationseinheiten im Prinzip die gleiche Zonierung wie in ihrer relativen Höhenlage zum MThw (siehe Abbildung 3-24). Nur die Einheit „Schilf-Röhricht erodiert“ (phe) fällt aus dem Muster. Die Erosionsvorgänge führten zu niedrigeren Geländehöhen als die Höhen, auf denen das Schilf-Röhricht ursprünglich wuchs. (Abbildung 3-23).



**Abbildung 3-24:** Lage der kartierten Vegetationseinheiten des Standortes Bielenberg unter MThw auf Grundlage der Verschneidung der flächenhaften Kartierung mit den Punkten der Transektmessungen zur Fahrrinnenachse (kürzeste Distanz); wt: n=42, el: n=8, ph: n=23, phe: n=1, sa: n=6, (Bedeutung der Kürzel siehe Tabelle 3-7)

### 3.3.3 Erste Einschätzung des Standortes Bielenberg aufgrund der Ist-Zustandserfassung

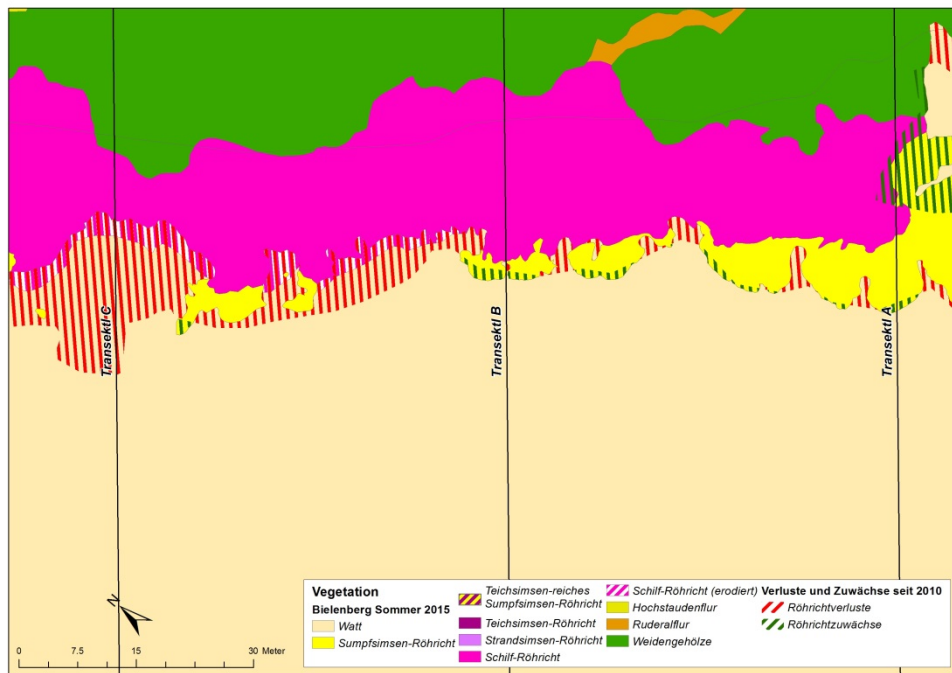
Einem Tide-Weiden-Auwald ist eine geschlossener Schilf-Röhricht-Gürtel vorgelagert. Diesem ist zwischen Transekt A und Transekt B wiederum ein fast geschlossener Bestand eines Sumpfsimsen-Röhrichts vorgelagert. Zwischen Transekt B und C ist das Sumpfsimsen-Röhricht in Auflösung begriffen und das somit „ungeschützte“ Schilf-Röhricht weist offenbar erosionsbedingt größere Lücken auf. Sumpfsimsen-Röhrichte sind nach KÖTTER (1961) kennzeichnend für eine stärkere Belastung durch Wellenschlag und/oder an stark betretenden bzw. beweideten und oftmals sandigen etwas steileren Ufern. Am Standort ist aufgrund seiner sehr guten Zugänglichkeit von einem mäßigen bis starken Betrieb von Erholungssuchenden auszugehen.

Zwischen den Transekten B und C sind aktuell starke Erosionserscheinungen im Schilf-Röhricht zu beobachten (z. T. freiliegendes Rhizom). Insbesondere am Transekt C ist ein sehr starker Rückgang des Schilf-Röhrichts im Vergleich zu Vegetationsaufnahmen der vergangenen Beweissicherung zu erkennen. 2002 war hier ebenfalls ein Sumpfsimsen-Bestand dem Schilf-Röhricht vorgelagert. Nachdem dieser ca. 2010 gänzlich verschwunden war, ist es zu einem massiven Rückgang des Schilf-Röhrichts gekommen. Im Gebiet zwischen Transekt A und B konnten sich bestehende Sumpfsimsen-Röhrichte ausdehnen und auch neu etablieren. Die rückwärtigen Schilf-Röhrichte sind stabil geblieben bzw. konnten sich vergrößern. Bei Transekt A wurde ein Bestand mit der Rote-Liste-Art Kleine Dreikantige Teichsimse (*Schoenoplectus pungens*) nachgewiesen.

Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maike Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945



**Abbildung 3-25: Ausschnitt der Bestandskarte 2015 für Standort Bielenberg mit den Veränderungen seit 2010 gemäß Luftbildauswertung 2010/2011 nach PETERSEN *et al.* (2011)**

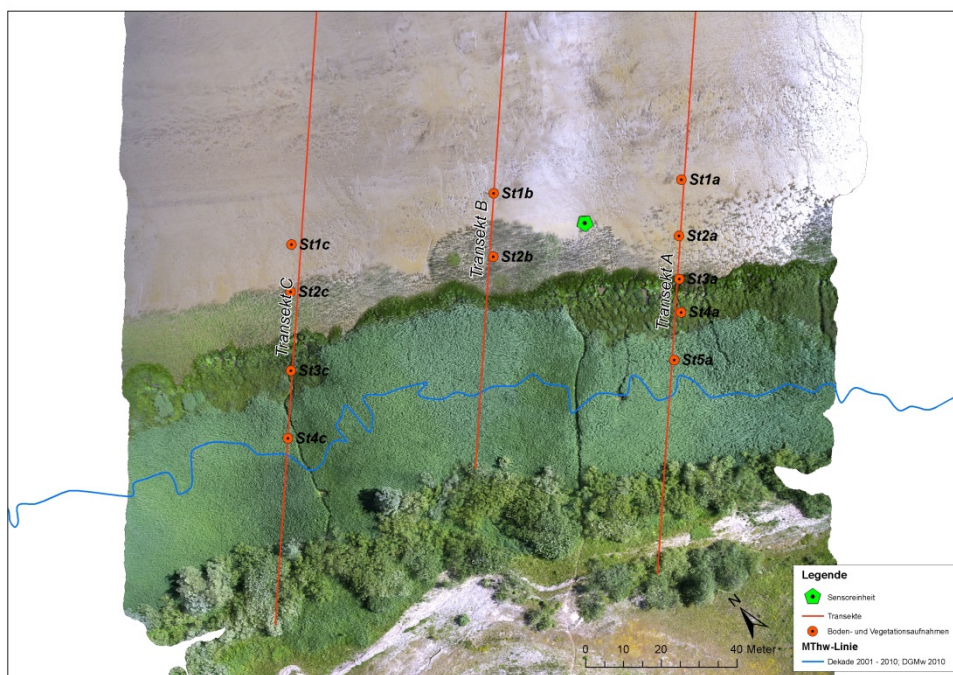
Der Standort Bielenberg ist deutlich weiter von der Fahrrinne entfernt als der Standort Hollerwettern. Trotzdem ist die Einschätzung nach BMT-Verfahren (STILLER 2016) lediglich unbefriedigend und das Schilf zeigt Stresserscheinungen. Die äußeren Schilfhalmke sind in ihrem Wuchs deutlich eingeschränkt und es wurden Bereiche mit freigespülten Schilf-Rhizomen kartiert



### 3.4 Standort Schwarztonnensand

Der Standort Schwarztonnensand liegt bei Elbe-km 666 am fahrrinnenseitigen Ufer der gleichnamigen Insel in der Elbe. Der Standort ist dem oligohalinen Abschnitt (Salzgehalt zwischen 0,5 und 5 ‰) des Übergangsgewässers Tideelbe nach WRRL zuzuordnen. Der Standort ist durch ein flaches Sandwatt geprägt. Die Insel wurde im Zuge des 13,5 m Ausbaus der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe 1974 - 1978 mit Baggermaterial aufgespült (REUTER & REINER 1975).

In Abbildung 3-26 ist auf Grundlage der UAS-gestützten Luftbilderfassung das Untersuchungsgebiet am Standort Schwarztonnensand dargestellt.



**Abbildung 3-26: Darstellung des Standortes Schwarztonnensand auf Grundlage des Orthoairbildes Sommer 2015**

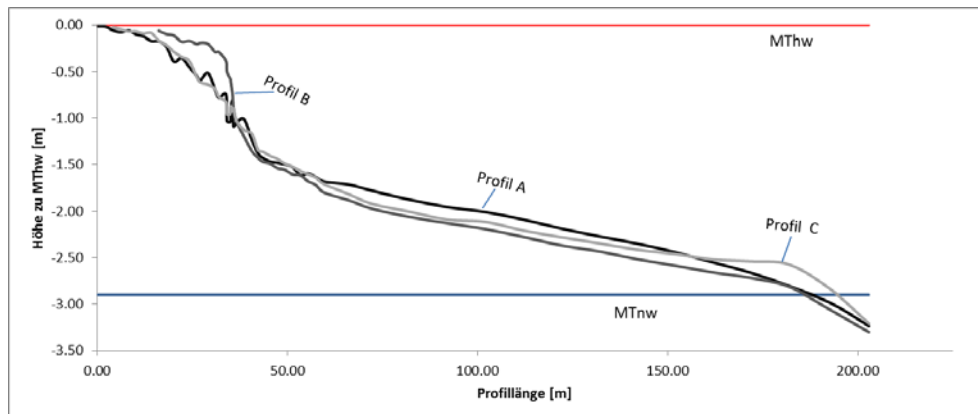
Der Zentralpunkt (Standort Sensoreinheit) ist ca. 700 m von der Fahrrinnenachse und 550 m vom Fahrrinnenrand entfernt. Damit ist die Lage des Standortes zum Fahrwasser ähnlich der Lage des Standortes Hollerwettern und kann als deutlich exponiert zum Fahrwasser angesprochen werden.

#### 3.4.1 Abiotische Umweltparameter der Standorte

##### 3.4.1.1 Topographie

Das Ufer des Standortes Schwarztonnensand ist als ein sehr homogenes flaches Sandwatt ausgeprägt. Der Abstand von der MTnw-Linie (ca. -1,24 m NHN) zur Vegetationsgrenze beträgt zwischen 135 und 150 m. Das Gelände steigt gleichmäßig von der MTnw-Linie zur Vegetationsgrenze an. Die Steigung beträgt ca. 1:110 bis 1:120. Das Gelände bei Profil B steigt im Bereich im

vegetationsbestandenen Bereich etwas steiler an, als das Gelände an den beiden äußeren Profilen (siehe Abbildung 3-27).



**Abbildung 3-27: Höhenprofile der drei Transekte des Standortes Schwarztonnensand (Höhendaten Sommer 2015, RTK-GNSS)**

Am Standort Schwarztonnensand beträgt die Tiefe, der im Mittel ersten Grundberührung der einlaufenden Wellen -3,04 m NHN. Für den 100 m breiten Uferstreifen wurde ein entsprechendes Segment des DGMw 2010 von der Vegetationsgrenze bis zur genannten Tiefe ausgeschnitten. Der Raum über diesem Gelände bis zum mittleren Wasserstand (Median von d minus Höhe des Sensors = 0,79 m NHN) entspricht dem Wasservolumen, welches den ankommenden Wellen zur Verfügung steht. Für Schwarztonnensand beträgt dieses Volumen 48 575 m<sup>3</sup>.

#### 3.4.1.2 Boden

Flusswatt (IWf) mit meist sandigem bis lehmigem, kalkhaltigem Substrat im Übergang zur Flussrohmarsh-Flusswatt (MRf-IWf). Insbesondere an den vegetationsbestandenen Standorten wird das Substrat deutlich lehmiger (Lu2, Lus, Ls2) im Gegensatz zum vegetationsfreien Watt. Dort herrschen Bodenarten des Mittelsandes vor (mS, MSfs). In den unteren Horizonten überwiegt grundsätzlich sandiges Substrat.

#### 3.4.1.3 Strömung und Wellen

Im Messzeitraum wurden 3 381 Schiffspassagen über das automatische Identifikationssystem (AIS) festgestellt. Daraus konnten 974 Schiffswelleneignisse für den Standort Schwarztonnensand abgeleitet werden. Viele Schiffspassagen entfielen auf Zeiträume, in denen der Sensor nicht überflutet war oder die Passagen kein ausreichend identifizierbares Schiffswelleneignis hervorbrachten (siehe Tabelle 3-8).



**Tabelle 3-8: Zusammenfassung der analysierten Schiffswellenereignisse am Standort Schwarztonnensand**

Standort Schwarztonnensand	
registrierte Schiffspassagen im Messzeitraum (20.09.2015 – 01.11.2015)	3 381
Anzahl der im Messzeitraum (6 Wochen) analysierten Schiffswellenereignisse	974
Anteil Schiffswellenereignisse [%]	29
Mittlere Anzahl Schiffswellenereignisse pro Tag	23
Höhenlage Messstation [m + NHN]	0.07
Entfernung Messstation – Fahrwassermitte [m]	700
signifikante Wellenhöhe: $H_{1/3}$ [m]	0.29
mittlere Wellenperiode: $T_{SM}$ [s]	3.8
mittlere Wasserstand: $d_M$ [m]	0,9
mittlere Wellengeschwindigkeit: $C_{SWM}$ [m/s]	2,97
mittlere Wellenlänge: $L_{SWM}$ [m]	9.21
mittlere Orbitalgeschwindigkeit: $\hat{U}_{\delta m}$ [m/s]	0.26
mittlere Sohlschubspannung unter der Sekundärwelle: $\tau_{SWM}$ [N/m <sup>2</sup> ]	1,01

Einfluss des schiffserzeugten Wellenschlages auf emerse Makrophyten der Tideelbe am Beispiel dreier exponierter Standorte – Ist-Zustand Untersuchungen im Rahmen des Planfeststellungsbeschlusses zur Fahrrinnenanpassung

BfG-1945

### 3.4.2 Vegetation

Schwarztonnensand ist ein reich strukturierter Standort mit Pionierzone einem geschlossenen Schilf-Röhricht-Bestand. Als Besonderheit ist eine durchgängige Sumpfsimse-Zone zwischen einer weiteren vorgelagerten Pionierzone bestehend aus Salz-Teichsimse und Meer-Strandsimse mit wechselnden Dominanzen. Erwähnenswert sind noch Bestände mit den Rote-Liste-Arten Kleine Dreikantige Teichsimse (*Schoenoplectus pungens*) und Gekielte Teichsimse (*Schoenoplectus x carinatus*) im Bereich des Transektes A.

### 3.4.2.1 Einschätzung nach BMT-Verfahren

Der Zustand der Makrophyten wurde nach dem BMT-Verfahren als mäßig eingeschätzt (STILLER 2016).

TEL-MP-W1-S - Schwarztonnensand	Übergangsgewässer T1 - oligohalin /
	<p><u>Ufermorphologie:</u></p> <p>naturnahes, unverbautes Ufer mit relativ festem Sandwatt mit geringer Schlickauflage oder Rippelstruktur, gefolgt von kleiner Abbruchkante zum Sumpfsimsen-/ Strandsimsen-Bestand hin, oberhalb davon kleine Erosionsrinnen bzw. Auskolkungen;</p> <p>Ufer flach und breit, fahrrinnennah</p>
<p>Der Standort wird uferwärts von einem geschlossenen Schilf-Röhricht (<i>Phragmites australis</i>) besiedelt, das einen ausgeprägten Frühjahrsaspekt mit Sumpf-Dotterblume (<i>Caltha palustris</i>) und Bitterem Schaumkraut (<i>Cardamine amara</i>) aufweist. Vorgelagert findet sich eine schmale Zone aus Strandsimse (<i>Bolboschoenus maritimus</i>) und/oder Sumpfsimse (<i>Eleocharis uniglumis</i>). Weiter stromwärts siedelt abschnittsweise die Salz-Teichsimse (<i>Schoenoplectus tabernaemontani</i>), die stromauf von den gefährdeten und seltenen Teichsimsen-Arten <i>Sch. x carinatus</i> und <i>Sch. pungens</i> abgelöst wird. Darüber hinaus sind alle typischen Tideröhrichtarten mehr oder weniger häufig vertreten.</p> <p>Die maximale Siedlungstiefe des Röhrichts beträgt ca. 1,7 m unter MThw. Die Ausdehnung ist mit 57 m optimal. Die Vegetationszonen sind nicht klar abgegrenzt, sondern mehr oder weniger durchmischt und teils unvollständig. Der wasserseitig aufgelichtete Bestand zeigt eine mäßige Vitalität.</p>	
<p>Ökologischer Zustand:            mäßig</p>	

**Abbildung 3-28: Zusammenfassende Darstellung der Einschätzung des Makrophytenbestandes Schwarztonnensand nach WRRL (aus STILLER (2016), Foto: Michael Stöber)**

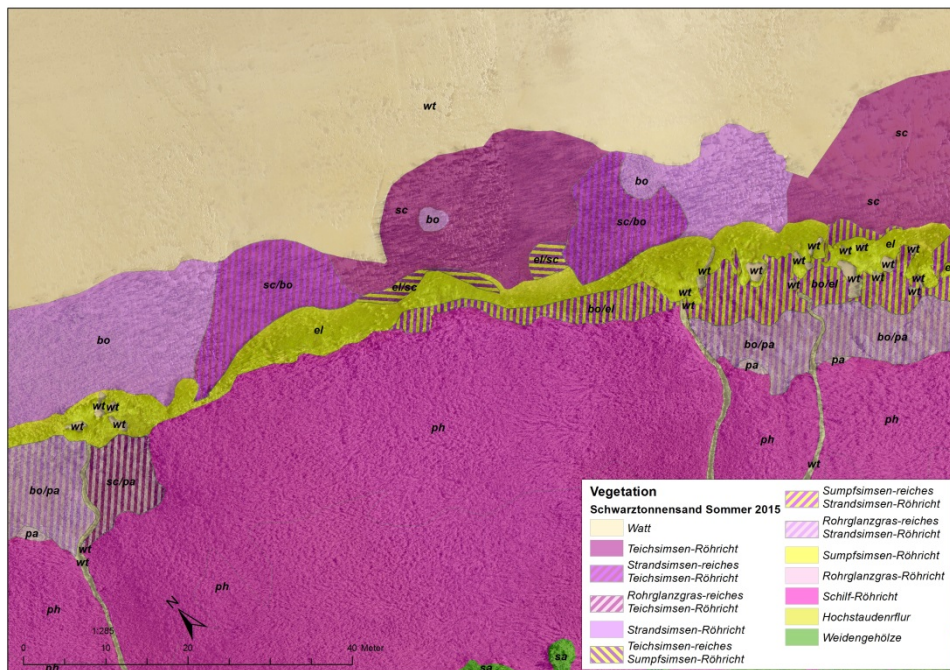
### 3.4.2.2 Räumliche Verteilung der Vegetation

Der Standort Schwarztonnensand zeigt eine klassische Abfolge der Uferzonierung (Weiden(-gebüsch), Schilf-Röhricht und Pionierzone). Die exponiertesten Bestände sind fast einartige Dominanzbestände aus Salz-Teichsimse oder Meer-Strandsimse. Diesen schließt sich ein Streifen mit der Einspelzigen Sumpfsimse an, welcher mit zahlreichen vegetationslosen Inseln durchsetzt ist. Während sich das Schilf-Röhricht im Bereich des Transektes B nahezu direkt an die Sumpfsimsen-Zone anschließt, ist in den Bereichen der Transekte A und C noch eine Zwischenzone mit Mischbeständen aus Meer-Strandsimse und Rohr-Glanzgras teilweise mit Hochstauden durchsetzt wie Blutweiderich eingefügt (siehe Abbildung 3-29). Diese Situation korrespondiert mit dem etwas veränderten Verlauf des Geländes im Gebiet des Profils B (siehe Kapitel 3.4.1.1). Das früher ansteigende Gelände ermöglicht es dem Schilf, sich weiter Richtung Fluss auszudehnen.

Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maike Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tidelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945



**Abbildung 3-29: Ausschnitt aus der Luftbildkartierung Schwarztonnensand Sommer 2015 (Kürzel: siehe Tabelle 3-9; im Hintergrund UAV-Ortholuftbild Sommer 2015)**

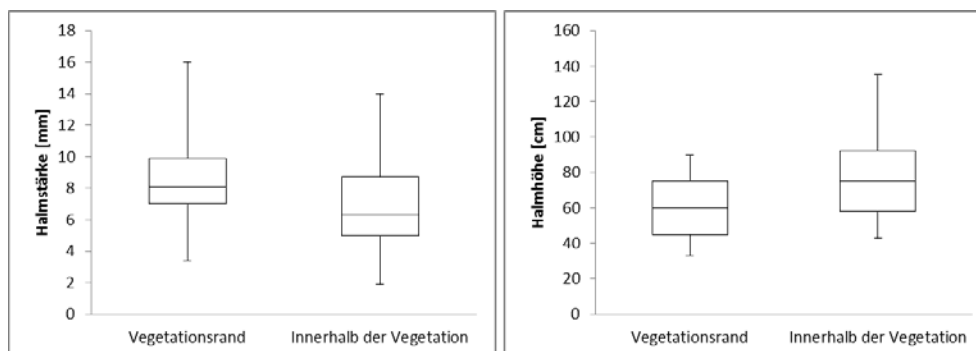
Für die Berechnung der Heterogenität wurde das geschlossene zusammenhängende vorgelagerte Watt nicht als Einheit mit berücksichtigt. Die vegetationslosen Inseln innerhalb des Sumpfsimsen-Gürtels wurden im Gegensatz dazu als strukturgebendes Element berücksichtigt. Es wurden insgesamt 13 Vegetationseinheiten erfasst (siehe Tabelle 3-9). Für den Standort Schwarztonnensand wurde ein Heterogenitätsindex von 0,68 berechnet. Dieser Wert kann als mittel bis hoch angesehen werden. Einen höheren Wert verhindern die sehr großen Schilf-Röhricht-Flächen, die durch ihre Dominanz die Heterogenität begrenzen. Wenn die Schilf-Röhrichte nur bis zur MThw-Linie betrachtet würden, ist der Index deutlich höher (0,76).

**Tabelle 3-9: Kartierte Vegetationseinheiten 2015 am Standort Schwarztonnensand**

Nr	Kürzel	Bezeichnung	Anzahl Patches	Flächensumme (m <sup>2</sup> )
1	sc	Teichsimsen-Röhricht	3	1 197
2	bo	Strandsimsen-Röhricht	5	1 184
3	el	Sumpfsimsen-Röhricht	6	652
4	ph	Schilf-Röhricht	4	7 354
5	pa	Rohrglanzgras-Röhricht	5	66
6	el/sc	Teichsimsen-reiches Sumpfsimsen-Röhricht	2	40
7	sc/bo	Strandsimsen-reiches Teichsimsen-Röhricht	2	304
8	bo/el	Sumpfsimsen-reiches Strandsimsen-Röhricht	2	547
9	bo/pa	Rohrglanzgras-reiches Strandsimsen-Röhricht	4	669
10	sc/pa	Rohrglanzgras-reiches Teichsimsen-Röhricht	1	78
11	sa	Weidengehölze	2	3 216
12	an	Hochstaudenflur	2	610
13	wt	Watt(Inseln)	35	151

### 3.4.2.3 Sonstige Vegetationsdaten

Die Pflanzenparameter Halmstärke (gemessen 5 cm über Grund) und -höhe sowie die Pflanzendichte wurden am Standort Schwarztonnensand wie am Standort Hollerwettern von der Strandsimse erhoben. Die Halmstärke der Pflanzen an der wasserseitigen Vegetationsgrenze ist im Mittel ca. 1,6 mm höher als die der Pflanzen innerhalb des Bestandes. Gleichzeitig sind die Pflanzen an der wasserseitigen Vegetationsgrenze im Mittel ca. 15 cm kleiner als die innerhalb des Bestandes (siehe Abbildung 3-30). Während an der wasserseitigen Vegetationsgrenze die Pflanzendichte ca. 72 Pflanzen pro m<sup>2</sup> beträgt, ist sie innerhalb des Bestandes mit ca. 167 Pflanzen pro m<sup>2</sup> deutlich höher.



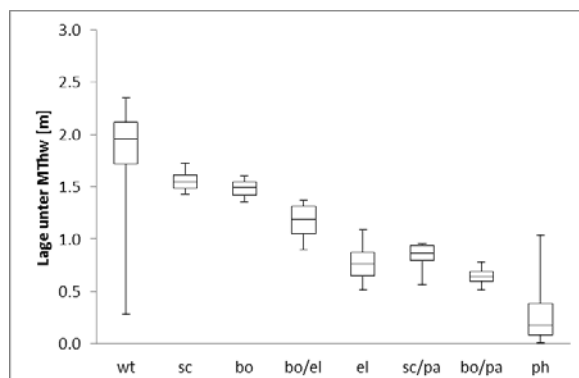
**Abbildung 3-30: Pflanzenparameter Halmstärke, 5 cm über Grund (links) und Halmhöhe (rechts) von *Bolboschoenus maritimus* am äußeren Vegetationsrand (n=45) und innerhalb des Bestandes (n=105) am Standort Schwarztonnensand (jeweils 5 Plots à 0,126 m<sup>2</sup> innerhalb Vegetation und am Vegetationsrand)**

Die Höhenlage der kartierten Vegetationseinheiten an den mit GNSS eingemessenen Transekten zeichnet eine klare Zonierung der kartierten Dominanzbestände ab (Abbildung 3-31). Am tiefsten siedelt das Teichsimsen-Röhricht (sc), gefolgt vom Strandsimsen-Röhricht (bo). Als Besonderheit muss hier der Sumpfsimsen-Röhricht-Gürtel und die ihm räumlich folgenden mit

Rohrglanzgras-Röhricht (pa) durchsetzten Teich- und Strandsimsen-Bestände erwähnt werden, die eine Übergangszone vor dem ausgedehnten Schilf-Röhricht (ph) bilden.

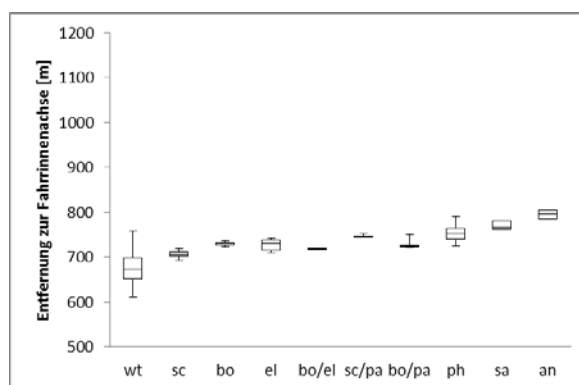
Einfluss des schiffserzeugten Wellenschlages auf emerse Makrophyten der Tideelbe am Beispiel dreier exponierter Standorte – Ist-Zustand Untersuchungen im Rahmen des Planfeststellungsbeschlusses zur Fahrrinnenanpassung

BfG-1945



**Abbildung 3-31: Höhenlage der kartierten Vegetationseinheiten des Standortes Schwarztunnensand unter MThw auf Grundlage der Verschneidung der flächenhaften Kartierung mit den Höhendaten der Transektmessungen, wt: n=29, sc: n=18, bo: n=7, bo/el: n=10, el: n=10, sc/pa: n=7, bo/pa: n=5, ph: n=41 (Bedeutung der Kürzel siehe Tabelle 3-9)**

Hinsichtlich ihrer Lage zur Fahrrinnenachse (siehe Abbildung 3-32) zeigen die Vegetationseinheiten im Prinzip die gleiche Zonierung wie in ihrer relativen Höhenlage zum MThw. Die Einheiten Schilf-Röhricht (ph) und Watt (wt) streuen sehr stark in die Zonen der anderen Einheiten. Insbesondere macht sich das bei der Einheit wt aufgrund der vielen Wattinseln im Sumpfsimsen-Röhricht (el) bemerkbar.



**Abbildung 3-32: Lage der kartierten Vegetationseinheiten des Standortes Schwarztunnensand unter MThw auf Grundlage der Verschneidung der flächenhaften Kartierung mit den Punkten der Transektmessungen zur Fahrrinnenachse (kürzeste Distanz); wt: n=29, sc: n=18, bo: n=7, bo/el: n=10, el: n=10, sc/pa: n=7, bo/pa: n=5, ph: n=41 (Bedeutung der Kürzel siehe Tabelle 3-9)**

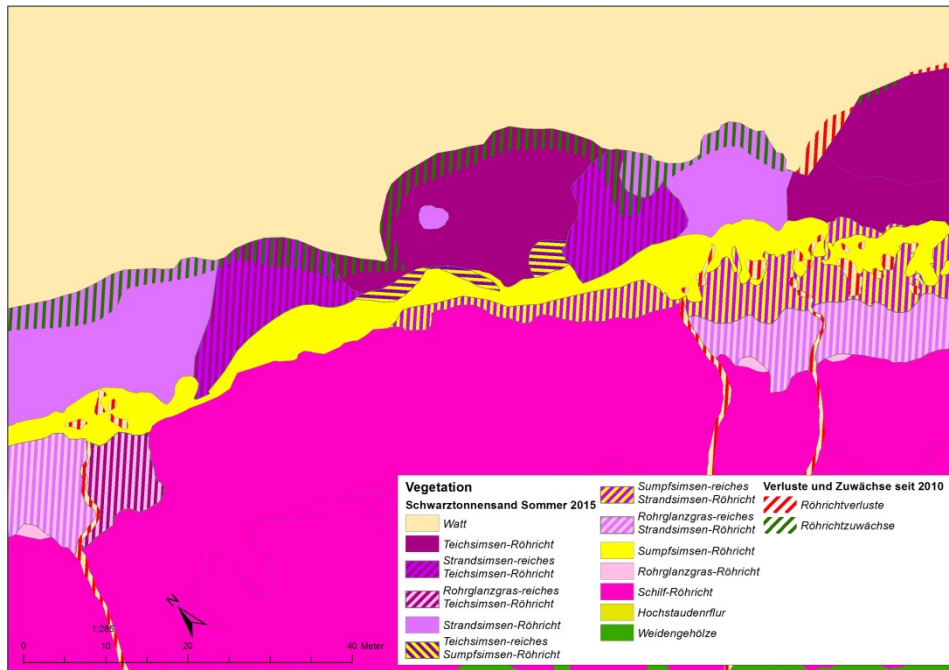
### 3.4.3 Erste Einschätzung des Standortes Schwarztunnensand aufgrund der Ist-Zustandserfassung

In den vergangenen 10 Jahren hat sich die Pionierzone insbesondere im Gebiet der Transekte C und B in das Watt vorgearbeitet (ca. 5 m). Dies betrifft in erster Linie Dominanzbestände der Strandsimse. In Richtung Transekt A nimmt der Zuwachs deutlich ab und im Gebiet des Transektes A stagniert die Pionierzone. Dies betrifft vorwiegend die Dominanzbestände der Salz-Teichsimse.

Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maike Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945



**Abbildung 3-33: Ausschnitt der Bestandskarte 2015 für Standort Schwarztonnensand mit den Veränderungen seit 2010 gemäß Luftbildauswertung 2010/2011 nach PETERSEN *et al.* (2011)**

Am Standort Schwarztonnensand wurde eine signifikante Wellenhöhe von  $H_{1/3} = 0,29$  m ermittelt. Die Einschätzung nach BMT (STILLER 2016) für Schwarztonnensand ist „mäßig“. Die erhobenen Pflanzenmerkmale lassen für die Strandsimse zwar Unterschiede im Wuchs bezüglich der Exposition erkennen, die Halmstärken sind bei den exponierten Pflanzen etwas größer als bei den weiter im Bestand wachsenden, und sie wachsen auch nicht so hoch auf.

## 4 Synthese

Die drei Standorte stellen sich hinsichtlich ihrer Vegetationsausstattung, Struktur, Topographie und Böden sowie des jeweiligen Schiffswellenregimes unterschiedlich dar. Während die Standorte Hollerwettern und Schwarztonnensand seitens der Vegetation recht strukturreich sind und die Pionierzonen seit 2010 sich mehr oder weniger in Ausbreitung befinden, stellt sich dies am Standort Bielenberg anders dar. Die Vegetation in Bielenberg ist grundlegend anders aufgebaut, teilweise im Rückgang begriffen und auch nicht so reich strukturiert. Dies spiegelt sich auch in der Einschätzung der Makrophyten nach dem BMT-Verfahren wider. Der Standort Bielenberg ist im Vergleich zu den anderen beiden Standorten der mit der geringsten Gesamtgröße der vegetationsbestandenen Fläche unter MThw auf dem 100 m breiten Uferstreifen. Der Reichtum an Vegetationseinheiten ist dort am geringsten. Die Topographien der vorgelagerten Watten und des Flachwassers sind an den Standorten Hollerwettern und Schwarztonnensand mit konvexen Ufertopographien, sandigen Böden mit teilweise schluffigen oder lehmigen Anteilen, ähnlich. Bielenberg dagegen nimmt mit einer eher konkaven Ufertopographie und fast ausschließlich sandigen Böden eine Sonderrolle ein. Die signifikanten Wellenhöhen sind am Standort Bielenberg geringer als an den anderen beiden Standorten. Dies korreliert gut mit der Tatsache, dass Bielenberg der Standort ist, der am weitesten von der Fahrrinne entfernt ist. Allerdings erklärt es nicht, dass dies offensichtlich der am stärksten durch hydraulische Belastung beeinträchtigte Standort ist. In Tabelle 4-1 sind die wichtigsten erhobenen und berechneten Kenndaten zusammengefasst.

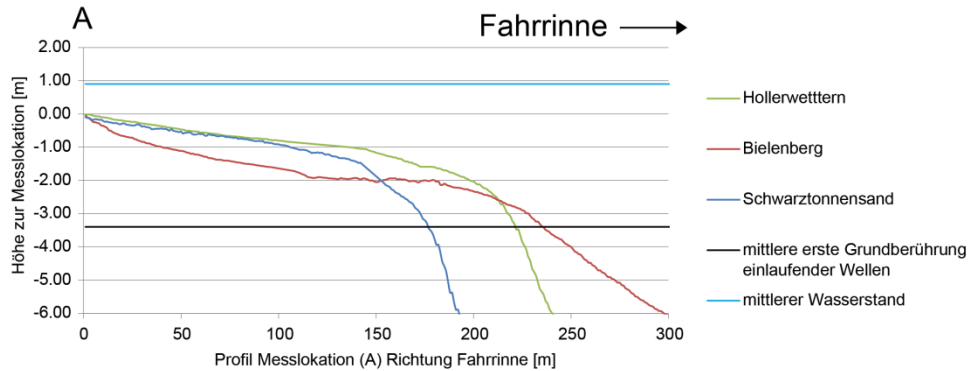
**Tabelle 4-1: Zusammenstellung der wichtigsten Kenngrößen, Veg =Vegetation**

<b>Kenngrößen</b>	<b>Hollerwettern</b>	<b>Bielenberg</b>	<b>Schwarztonnensand</b>
reg. Schiffspassagen	3 282	3 472	3 381
reg. Schiffswellenereignisse	921	599	974
Topo-Form	konvex	konkav	konvex
Wasser-Vol. für Wellen [m³]	39 647	51 271	48 575
Boden	sandig/schluffig	sandig	sandig/lehmig
Veg-BMT	mäßig	unbefriedigend	mäßig
Veg-Größe (bis MThw)	7 034	1 923	4 208
Veg-Einheiten (Reichtum)	14	9	13
Veg-Struktur-Index	0.81	0.53	0.68
Veg-Entwicklung(2010)	Expansion	Rückgang	Expansion/Stagnation
sig. Wellenhöhe [m]	0.33	0.26	0.29
mittl. Sohlschubspannung [N/m²]	0.95	0.76	0.82

In Abbildung 4-1 sind die unterschiedlichen Formen der den Röhrichten, bzw. der Messlokation, vorgelagerten Watten und Flachwasserbereiche der Standorte im Profil dargestellt. Während die grundlegende Form der Profile von Hollerwettern und Schwarztonnensand sich ähneln – sie sind eher konvex –, weicht die Form des Profils von Bielenberg von diesen ab. Sie kann als konkav beschrieben werden. Es ist außerdem gut zu erkennen, dass den einlaufenden Wellen am Standort



Bielenberg bis zur Messlokation über weite Strecken tieferes Wasser zur Verfügung steht.

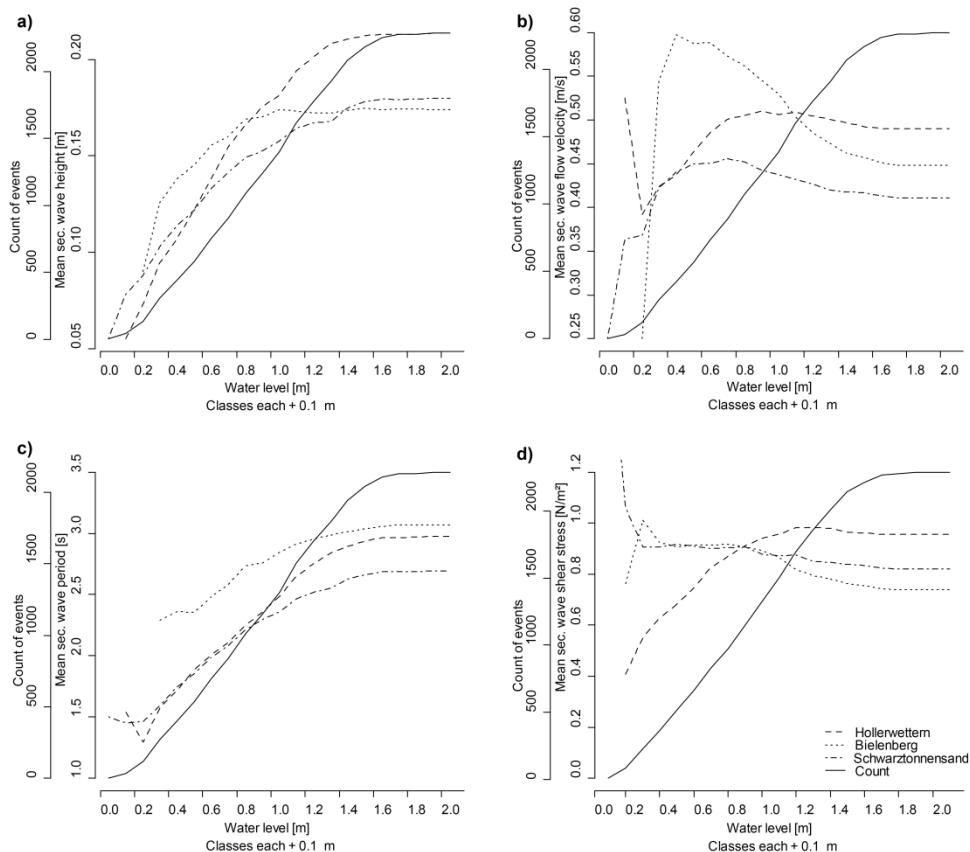


**Abbildung 4-1: Profile der den Messlokationen von Hollerwetterm, Bielenberg und Schwarztonnensand vorgelagerten Watten und Flachwasserbereiche (Datengrundlagen: DOM von 2015 für die Watten und DGMw 2010 für die Flachwasserbereiche); mittlerer Wasserstand: arithmetisches Mittel der Wasserstände über Sensor im Messzeitraum für alle Standorte; mittlere erste Grundberührung einlaufender Wellen: aus den gemessenen Welleneignissen berechnete mittlere Wirkungstiefe der Sekundärwellen an allen drei Standorten**

Die Form des vorgelagerten Ufers scheint also eine bedeutende Rolle auf den Energiegehalt der ankommenden Wellen zu haben. Das den ankommenden Wellen zur Verfügung stehende Wasservolumen für die jeweils 100 m breiten Standorte wurde berechnet (siehe 3.2.1.1, 3.3.1.1 und 3.4.1.1 sowie Tabelle 4-1). Das konkave Ufer am Standort Bielenberg bietet demnach den ankommenden Wellen das meiste Wasservolumen und damit die geringste Reibung. Die Energiedissipation an konkaven Ufern ist also kleiner als an konvexen Ufern.

Zudem ist davon auszugehen, dass dieser Umstand bei geringen Wasserständen größer ist als bei hohen Wasserständen. Aus diesem Grund wurde, um die Welleneigenschaften für jeden Standort bei unterschiedlichen Wasserständen vergleichen zu können, pro Standort die mittlere Wellenhöhe, -strömung und -periode für Wasserstandsklassen von jeweils 0,1 m berechnet. In Abbildung 4-2 ist gut zu erkennen, dass bei geringeren Wasserständen am Standort Bielenberg (konkave Ufertopographie) größere Wellenhöhen und -strömungen auftreten als bei den anderen Standorten (konvexe Ufertopographien). Die Wellenperiode ist am Standort Bielenberg immer am längsten.





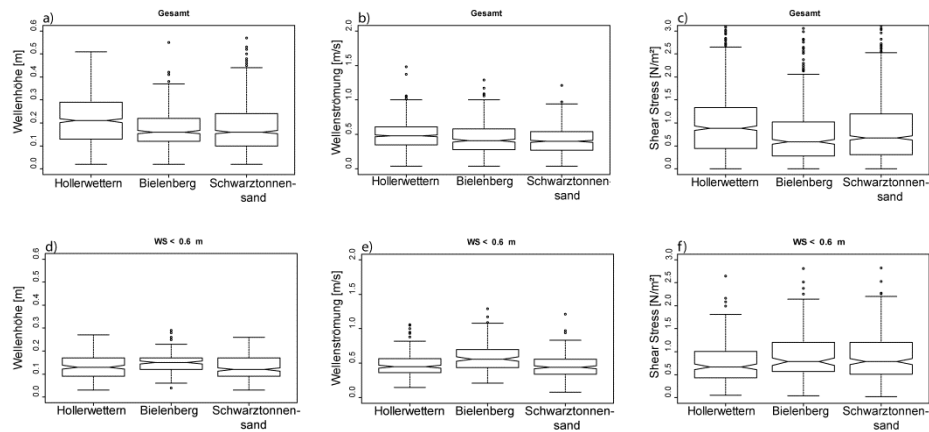
**Abbildung 4-2: Darstellung der mittleren a) Wellenhöhe, b) -strömung, c) -periode und d) Sohlschubspannung für Sekundärwellen an den Standorten Hollerwettern, Bielenberg und Schwarztönnensand**

Deutliche Unterschiede sind insbesondere bei Wasserständen  $d < 0,6$  m auszumachen. Das unterschiedliche Verhalten der Wellen bei Flachwasser und verschiedenen Ufertopographien lässt sich in Abbildung 4-3 erkennen. Wellenhöhe und -strömung sowie die Schubspannung unter den Wellen sind bei Wasserständen unter 0,6 m am Standort Bielenberg im Gegensatz zu den Werten bei allen anderen Wasserständen erkennbar größer als an den anderen beiden Standorten. Die am Standort Bielenberg konkave Ufertopographie und die den damit ankommenden Wellen zur Verfügung stehende größere Wassertiefe, insbesondere bei geringen Wasserständen, kann eine Erklärung dafür sein. Konkave Ufer sind demnach nicht nur ein Anzeichen für Erosion, entsprechend konvexe Ufer ein Anzeichen für Deposition (BEARMAN *et al.* 2010), sondern verstärken sich offensichtlich selbst.

Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maike Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei

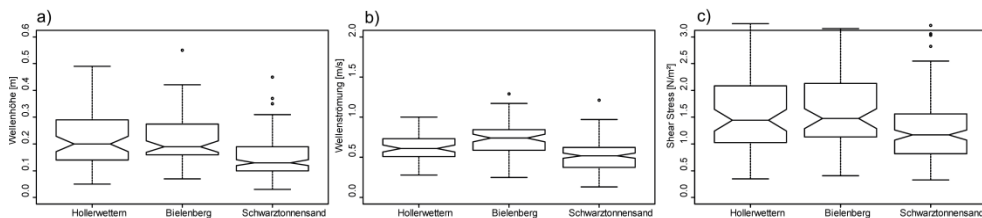
Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945



**Abbildung 4-3: Verteilung der Werte bei allen Wasserständen für die a) Sekundärwellenhöhe, b) die Sekundärwellenströmung, c) die Sohlschubspannung unter den Sekundärwellen und entsprechend d), f) und g) bei Wasserständen unter 0,6 m über Sensor**

Um festzustellen, ob die Messung der Wellen in der Brandung stattfand wurden aus dem Gesamtdatensatz die Sekundärwellen extrahiert ( $H_{krit}$ ), deren Verhältnis Wellenhöhe  $H$  zu Wassertiefe  $d$  größer als 0,4 ist, also nach Malcherek (2010) hinsichtlich ihrer maximalen erreichbaren Höhe bereits einen kritischen Wert erreicht haben (siehe Kapitel 2.2.3). In Abbildung 4-4 wird deutlich, dass die Belastung aufgrund der Parameter Sekundärwellenhöhe, Sekundärwellenströmung und Sohlschubspannung unterhalb der Sekundärwellen durch vermeintlich gebrochene Wellen ( $H_{krit}$ ) am Standort Schwarztonnensand am geringsten und zumindest für die Sekundärwellenströmung am Standort Bielenberg am höchsten ist.



**Abbildung 4-4: Verteilung der Werte bei allen Wasserständen für die a) Sekundärwellenhöhe, b) die Sekundärwellenströmung, c) die Sohlschubspannung unter den Sekundärwellen für die gilt ( $H > 0,4$ )**

Der Standort Bielenberg erfährt offenbar bei niedrigen Wasserständen und bei gebrochenen Wellen einen höheren Strömungsangriff als die Standorte Schwarztonnensand und Hollerwetter, obwohl er deutlich weiter von der Fahrrinne entfernt liegt und die signifikante Wellenhöhe niedriger ist als bei den anderen Standorten.

## 5 Fazit und Ausblick

Für die Ist-Zustandserfassung der im Rahmen der Beweissicherung gemäß Planfeststellungsbeschluss (WSD-NORD 2012) geforderten drei zusätzlichen Makrophytenstandorte in exponierten Lagen zur Analyse der Reaktion insbesondere der Röhrichte auf den schiffsinduzierten Wellenschlag wurden umfangreiche Daten erhoben und erste Analysen getätigt. Neben der Forderung, die Untersuchungen im Rahmen des erweiterten WRRL-Monitorings durchzuführen (STILLER 2016), wurden zusätzliche Erhebungen und Analysen an den mit den Vertretern der Länder abgestimmten Standorten durchgeführt. Dazu gehörten neben einer aufwendigen Messung verschiedener Wellenparameter und deren Zuordnung zu konkreten Schiffspassagen (PETERS *et al.* 2016), intensive Vermessungen der Geländehöhen und der Vegetationsgrenzen, Bodenansprachen, Vegetationskartierungen (durch WSA HH und BfG) sowie die Herstellung präziser Ortholuftbilder und Oberflächenmodelle mittels des Einsatzes von UAS (Drohnen mit Sensor / Kamera) (GRENZDÖRFFER 2016).

Die Schiffsgeschwindigkeit ist nach den ersten Analysen der Faktor mit dem höchsten Erklärungsanteil für die Höhe der detektierten Sekundärwellen. Die Größe des Schiffs wird im Modell zwar als signifikante Einflussgröße bestimmt, allerdings ist ihr Erklärungsanteil deutlich geringer als die Geschwindigkeit. Der Wasserstand an der Messeinheit ist ebenfalls signifikant positiv mit der Höhe der Sekundärwellen korreliert. Ähnliche eindeutige positive Korrelationen zwischen Wassertiefe und Wellenhöhe stellten auch SHI *et al.* (2012) fest. Einen signifikanten Zusammenhang von Schiffsgeschwindigkeit und Wellenhöhe ermittelten LIEDERMANN *et al.* (2014) an der Donau. Des Weiteren wurden im Vergleich zu diesen Ergebnissen ähnliche Effekte bezüglich der Entfernung der Schiffe zum Ufer, des Wasserstandes und der Ufertopografie beschrieben. Berücksichtigt werden muss dabei, dass die Messungen an der Donau im Binnenbereich gemacht wurden und Schiffe, Entfernungen sowie weitere Parameter deutlich kleiner dimensioniert sind als an der Tideelbe. Die grundlegenden Prozesse und Effekte sind aber letztendlich vergleichbar.

Der Zustand der untersuchten Makrophytenstandorte spiegelt nicht unbedingt die Erwartung wider, dass Standorte, welche näher an der Fahrrinne liegen, per se höher durch schiffsinduzierte Wellen belastet sind als Standorte, welche weiter entfernt der Fahrrinne zu finden sind. Zwar konnte festgestellt werden, dass der Standort Bielenberg, welcher deutlich weiter von der Fahrrinne entfernt liegt als die Standorte Hollerwettern und Schwarztonnensand, u.a. eine geringere signifikante Wellenhöhe der identifizierten Schiffswellenereignisse aufweist, gleichzeitig aber seitens der Auswertungen der Vegetationsaufnahmen und Messungen sowie der Bodenansprachen und morphologischen Hinweise, die höchste hydraulische Belastung erfährt.

Neben der Entfernung zur Fahrrinne, wie sie z. B. von BUTZECK *et al.* (2016) für langfristige und großräumige Effekte identifiziert wurde, und die Parameter Geschwindigkeit der Schiffe und Wasserstand scheint v. a. auch die Topographie der Ufer ein weiterer wesentlicher, bestimmender Faktor zu sein, in welcher Weise die Vegetation von der am Ufer ankommenden Energie der Schiffswellen beeinflusst wird. So zeigen die Messungen, dass das konkave Ufer des Standortes Bielenberg der Erosionskraft der einlaufenden Wellen durch die geringere Energiedissipation weniger entgegenzusetzen hat als die konvexen Ufer der anderen beiden Standorte und damit eine relative Erhöhung von Wellen und deren Strömungsgeschwindigkeiten in Flachwassersituationen zu fördern scheint. Somit konnte gezeigt werden, dass offensichtlich die (signifikante) Wellenhöhe kein ausreichender Indikator für den, für die Ausprägung der Makrophytenstandorte verantwortlichen, relevanten Eintrag an hydraulischer Energie am Ufer ist. Die Ufertopografie ist ein weiterer Faktor. Mit ihr in Zusammenhang stehende Veränderungen der Wellen durch Sohlreibung und Brechung sowie die sich daraus selbstverstärkenden Effekte (Versteilung des Ufer, Vergrößerung des Substrates) tragen wesentlich zum schiffswelleninduzierten Stress auf die Ufervegetation bei. Dies deckt sich im Wesentlichen mit den Ergebnissen von HEUNER *et al.* (2016), die bereits die Höhe zum mittleren Tidehochwasser, die mittlere Uferneigung und die Länge zwischen Ufervegetation und Flachwasserlinie (ein Proxy für die Sohlreibung), als erklärende Variablen zur Modellierung der Habitatpräferenzen verschiedener Röhrichtarten an der Tideelbe und der Tideweser feststellten.

Weitere Analysen aus den vorliegenden Daten, z. B. zur hydraulischen Grundbelastung der Standorte sowie deren Entwicklung in morphologischer und vegetationskundlicher Hinsicht, können im weiteren Verlauf des Monitorings helfen, die komplexen Prozesse an den Ufern der Tideelbe weiter zu erhellen. Zum vertieften Verständnis der Prozesse im vegetationsbestandenen Intertidals wird insbesondere die Kooperation des Monitorings mit den F+E-Projekten der BfG „tibass“ und ElbStabil“ beitragen können.

Spannend wird zudem eine erneute Erfassung von Schiffswellenereignissen sein und deren Auswertung an diesen drei Standorten nach einem Ausbau der Fahrrinne und der damit gemäß Planfeststellungsbeschluss (WSD-NORD 2012) verbundenen Geschwindigkeitsbegrenzung für Schiffe. Die festgestellte Korrelation von Schiffsgeschwindigkeit und Wellenhöhe, sollte durch die vorgesehenen Begrenzungen der Schiffsgeschwindigkeiten (Brunsbüttel bis Glückstadt: 14 kn (Bedeutung für den Standort Hollerwettern) und Glückstadt bis Ende der Begegnungsstrecke: 12 kn (Bedeutung für Bielenberg und Schwarztonnensand)) feststellbare Effekte hinsichtlich der Wellenbelastungen insbesondere für die Standorte Bielenberg und Schwarztonnensand erkennen lassen.

## 6 Vorschau - Erste Einschätzungen der Entwicklung der Makrophyten für den Zeitraum 2015 – 2017

Für eine erste Abschätzung der räumlichen Entwicklung der Makrophyten an den drei Standorten wurden die Vegetationskarten aus den Jahren 2015, 2016 und 2017 mit einander verschnitten. Die sich aus der Verschneidung neu ergebenden Einheiten wurden so klassifiziert, dass sich Trends der Sukzession bzw. des Rückgangs der Makrophyten erkennen lassen. Grundlage für die Klassifizierung ist die natürliche Zonierung der Vegetation der Ufer an der Tideelbe:

1. Watt
2. Pionier-Röhricht
3. Röhricht
4. Gehölze

Die Zuordnung der dominanten Einheit zu einer Klasse (Zone) ist der Tabelle 6-1 zu entnehmen.

**Tabelle 6-1: Zuordnung der kartierten Dominanzeinheit zu Sukzessionsstadien**

Watt	Pionier-Röhricht	Röhricht	Gehölze
wt: Watt	sc: Teichsimsen-Röhricht bo: Strandsimsen-Röhricht el: Sumpfsimsen-Röhricht	ph: Schilf-Röhricht pa: Rohrglanzgras-Röhricht ty: Röhrkolben-Röhricht an: Hochstauden	sa: Gehölze

Als Sukzession werden folgende Übergänge von einem zum nächsten Jahr der Einheiten bezeichnet:

- Watt zu Pionier-Röhricht
- Pionier-Röhricht zu Röhricht
- Röhricht zu Gehölz

Als Rückgang werden die entgegengesetzten Übergänge von einem zum nächsten Jahr der Einheiten bezeichnet.

- Pionier-Röhricht zu Watt
- Röhricht zu Pionier-Röhricht
- Gehölz zu Röhricht

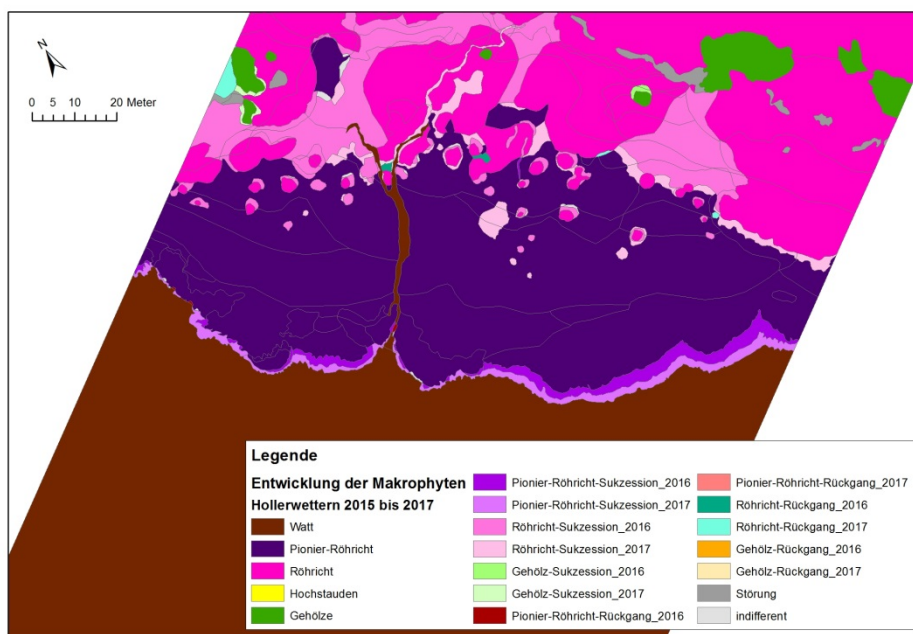
Dabei ist zu beachten, dass die Sukzession von Pionier-Röhricht zu Röhricht effektiv ein Rückgang von Pionier-Röhrichten bedeutet, wenn das Pionier-Röhricht sich nicht gleichzeitig in den entsprechenden Umfang auf das Watt ausbreitet. Für den Übergang von 2015 zu 2016 wurde die Einteilung Sukzession bzw. Rückgang nur dann gewählt, wenn die Veränderung auch 2017 Bestand hatte. Andernfalls

Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maike Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945

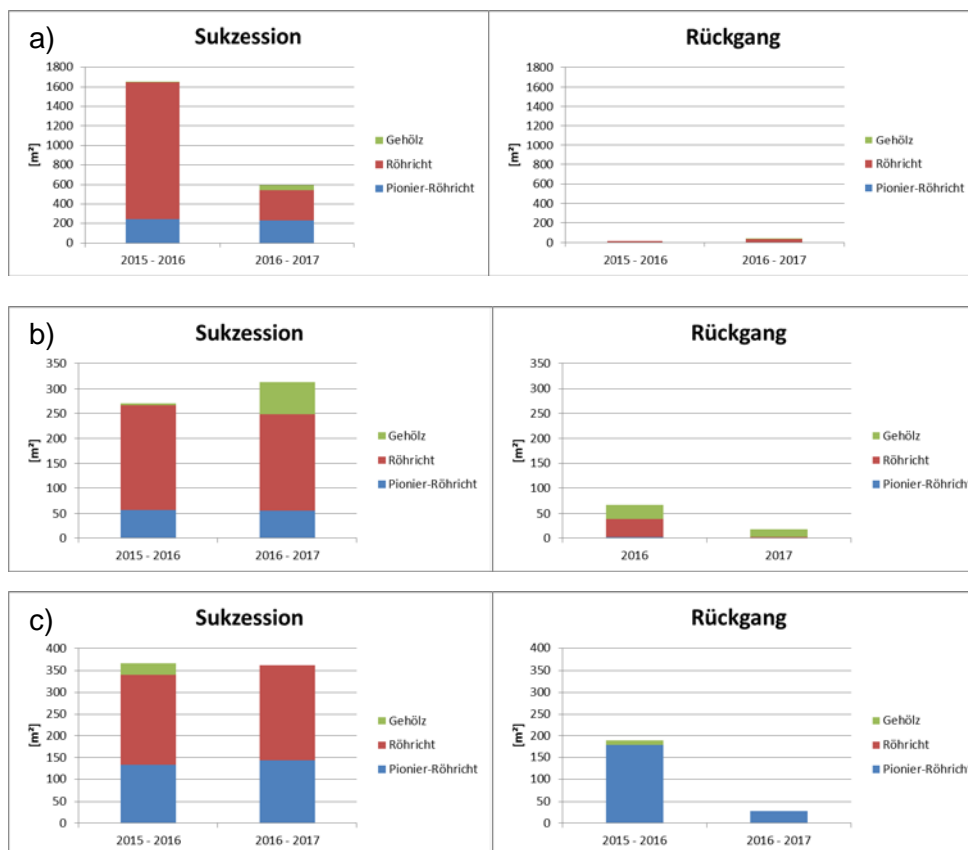
wurde die Entwicklung als indifferent bezeichnet und zunächst nicht weiter betrachtet (siehe auch Abbildung 6-1). Des Weiteren ist bei den folgenden Ausführungen zu beachten, dass hier die gesamte kartierte Vegetation in ihrer Entwicklung betrachtet wird. Als Makrophyten der Tidegewässer werden gemäß WRRL Pflanzen bezeichnet, die bei Mittleren Tidehochwasser (MThw) ganzjährig untergetaucht wachsen oder im Wasser wurzeln und submerses oder auch emerses Wachstum aufzeigen. An der Tideelbe betrifft dies insbesondere die Tide-Röhrichte (STILLER 2005). Für eine Beschreibung der Entwicklung der Makrophyten sind also nur Bestände unterhalb der MThw-Linie maßgebend. Dies betrifft im Folgenden im Wesentlichen die als Pionier-Röhrichte bezeichneten Einheiten. Die „Röhrichte“ kommen zwar auch unter MThw vor. Der größte Anteil wächst allerdings oberhalb dieser Linie und wird dem Land-Röhricht zugerechnet. Daher ist in diesem Zusammenhang die Entwicklung der Pionier-Röhrichte von entscheidender Bedeutung.



**Abbildung 6-1: Darstellung der Entwicklung der Ufervegetationszonen von 2015 bis 2017 am Beispiel des Standortes Hollerwettern**

Ungenauigkeiten im Trend der Entwicklung ergeben sich durch die subjektive Einschätzung der Dominanzbestände. Ob die z.B. am Standort Hollerwettern kartierten Mischeinheiten durchgängig in der Fläche von der Strandsimse oder vom Rohr-Glanzgras dominiert werden, ist in der Abgrenzung der Einheiten nur bedingt gesichert. In Gebieten um die MThw-Linie am Standort Hollerwettern hat offenbar Rohr-Glanzgras die Strandsimse als dominante Art abgelöst, auch wenn die Strandsimse noch sehr häufig ist. Dies hat zur Folge, dass sich die Einheit Röhricht (Dominanz von Rohr-Glanzgras) auf Kosten der Einheit Pionier-Röhricht (ehemals Dominanz von Strandsimse) stark ausgebreitet hat. Des Weiteren sind insbesondere die äußeren südlichen Teichsimsen-Bestände am

Standort Schwarztonnensand so licht, dass eine geschlossene Außengrenze zum Watt nur sehr ungenau abgrenzbar ist. Dies kann zu einer bedeutenden Überschätzung des berechneten Rückgangs der Pionier-Röhrichte am Standort Schwarztonnensand führen. Im Folgenden sind in Abbildung 6-2 die Entwicklung der Ufervegetationszonen für den Monitoringzeitraum 2015 bis 2017 dargestellt.



**Abbildung 6-2: Entwicklung der Ufervegetationszonen (Sukzession links, Rückgang rechts) von 2015 bis 2017 in a) Hollerwettern, b) Bielenberg und c) Schwarztonnensand**

An allen drei Standorten haben sich die Pionier-Röhrichte in das vorgelagerte Watt ausgebreitet. Gleichzeitig stehen sie unter Sukzessionsdruck der angrenzenden Röhrichtzone. Besonders deutlich ist dies am Standort Hollerwettern (Abbildung 6-2 a) links) mit den oben genannten Einschränkungen zu erkennen. Rückgänge des Pionier-Röhrichts ist am Standort Schwarztonnensand (Abbildung 6-2 c) rechts) angezeigt, aber dieser Rückgang ist ob der oben beschriebenen dünnen Besiedlung nur bedingt aussagekräftig. Am Standort Bielenberg ist für den Zeitschnitt 2015 - 2016 ein Rückgang des Röhrichts erkennbar (siehe Abbildung 6-2 b) rechts). Dieser Rückgang beruht auf direkter Erosion des Schilf-Röhrichts. Dies hat sich 2017 nicht im gleichen Maße fortgesetzt. Der teilweise angezeigte Gehölzrückgang ist vermutlich durch Kartierungenauigkeiten aufgrund z.B. veränderter Windsituationen begründet, die die Weiden unterschiedlich stark gebeugt über die angrenzenden Röhrichte erscheinen lassen.

Insgesamt ist die Situation am Standort Hollerwettern am stabilsten mit einem klaren Trend des Vordringens der Vegetation. An den Standorten Bielenberg und

Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maike Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945

Schwarztonnensand ist die Situation etwas differenzierter zu betrachten.  
Insbesondere der Standort Bielenberg fällt mit dem direkten Verlust von Schilf-  
Röhrichten vermutlich aufgrund der speziellen Ufertopographie und  
Erosionstendenzen (siehe Kapitel 4) aus dem Rahmen. Im kommenden Verlauf des  
Monitorings und der Auswertung der Geländehöhen des vorgelagerten Watts ist  
dies noch näher zu betrachten.



## 7 Literatur

- BAUER, E.-M., HEUNER, M., FUCHS, E., SCHRÖDER, U., SUNDERMEIER, A., BAHL, A., BILDSTEIN, T., CARUS, J., FAUDE, U., JENSEN, K., KINKELDEY, C., KLEINSCHMIT, B., KLEIB, K., KRAFT, D., MEYERDIRKS, J., ROEDER, A., SCHIEWE, J., SCHMIDTLEIN, S., SCHOENBERG, W., SCHRÖDER, B., SCHUCHARDT, B., SILINSKI, A. & WITTIG, S. (2014): Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.09: Klimabedingte Änderung der Vorlandvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung. KLIWAS Schriftenreihe **KLIWAS-24/2014**, Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_24/2014\_3.09.: S. 42
- BEARMAN, J. A., FRIEDRICH, C. T., JAFFE, B. E. & FOXGROVER, A. C. (2010): Spatial Trends in Tidal Flat Shape and Associated Environmental Parameters in South San Francisco Bay. *Journal of Coastal Research*, S.: 342-349. DOI: 10.2112/08-1094.1
- BLASCHKE, T. (2000): Landscape Metrics: Konzepte und Anwendungen eines jungen Ansatzes der Landschaftsökologie im Naturschutz. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung*, **39** S.: 267-299. DOI:
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (2006): Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe – Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen. **BAW-Nr. 5.03.10062.00**, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).
- BUTZECK, C., SCHRÖDER, U., OLDELAND, J., NOLTE, S. & JENSEN, K. (2016): Vegetation succession of low estuarine marshes is affected by distance to navigation channel and changes in water level. *Journal of Coastal Conservation*, **20** (3)S.: 221-236. DOI: 10.1007/s11852-016-0432-1
- CARUS, J. & SCHRÖDER, B. (2014): Analyse abiotischer und biotischer Treiber der Röhrichtentwicklung im tidebeeinflussten Bereich der Elbe - Entwicklung und Parametrisierung eines mechanistischen Wachstumsmodells. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.09. KLIWAS-Schriftenreihe. **KLIWAS-26/2014**, Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz. 95
- DIEDERICH, M. (2014): Standortkundliche Bewertung von Ufern der Tideelbe zur Auswahl von Standorten für ein Wellenbelastungsmonitoring. Fachbereich VI (Raum- und Umweltwissenschaften) Trier, Universität Trier. **B.Sc. Umweltgeowissenschaften**.
- EAK 2002 (korrigierte Ausgabe 2007): Die Küste - Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee - Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken durch den Ausschuss für Küstenschutzwerke. Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee. **Heft 65, Jahr 2002 - korrigierte Ausgabe 2007**. Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. und Hafenbautechnische Gesellschaft e.V. 589
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasser-Rahmen-Richtlinie - WRRL). ABl. Nr. L 327 vom 22.12.2000 S. 1. 2455/2001/EG - ABl. Nr. L 331 vom 15.12.2001 S. 1, geändert durch Beitrittsakte 2003, RL 2008/32/EG - ABl. Nr. L 81 vom: 20.3.2008 S. 60 2009/31/EG - ABl. Nr. L 140 vom: 23.04.2009 S. 114. Europäische Kommission.

- GRENZDÖRFFER, G. (2016): Erstellung eines Untersuchungskonzepts zur UAS unterstützten Vegetationserfassung tidebeeinflusster Makrophytenbestände. Universität Rostock - Professur für Geodäsie und Geoinformatik. Rostock.
- GRENZDÖRFFER, G. & SCHRÖDER, U. (2017): UAS unterstützte Vegetationserfassung tidebeeinflusster Makrophytenbestände in der Unterelbe 37. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF Würzburg, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V. München.
- GUSTAFSON, E. J. (1998): Quantifying Landscape Spatial Pattern: What Is the State of the Art? *Ecosystems*, **1** (2)S.: 143-156. DOI: 10.1007/s100219900011
- HEUNER, M. (2006): Weiterentwicklung, Anwendung und Validierung von Lebensraumeignungsmodellen verschiedener Tideröhrichte der Unter- und Außenweser sowie der Unter- und Außenelbe auf Grundlagen von Daten der WSÄ Hamburg und Bremerhaven - Abschlussbericht – Endfassung unter Berücksichtigung weiterer hydrologischer Daten. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Universität Karlsruhe (TH) Institut für Wasser und Gewässerentwicklung. 60
- HEUNER, M., SILINSKI, A., SCHOELYNCK, J., BOUMA, T. J., PUJALON, S., TROCH, P., FUCHS, E., SCHRÖDER, B., SCHRÖDER, U., MEIRE, P. & TEMMERMAN, S. (2015): Ecosystem Engineering by Plants on Wave-Exposed Intertidal Flats Is Governed by Relationships between Effect and Response Traits. *PloS ONE*, **10** (9)S.: e0138086. DOI: 10.1371/journal.pone.0138086
- HEUNER, M., WEBER, A., SCHRÖDER, U., KLEINSCHMIT, B. & SCHRÖDER, B. (2016): Facilitating political decisions using species distribution models to assess restoration measures in heavily modified estuaries. *Marine Pollution Bulletin*, **110** (1)S.: 250-260. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.056>
- KÖTTER, F. (1961): Die Pflanzengesellschaften im Tidegebiet der Unterelbe. in: Archiv für Hydrobiologie - W. E. Ohle, H.-J. (Hrsg.). Stuttgart. **26**: S.: 106 - 184.
- LIEDERMANN, M., TRITTHART, M., GMEINER, P., HINTERLEITNER, M., SCHLUDERMANN, E., KECKEIS, H. & HABERSACK, H. (2014): Typification of vessel-induced waves and their interaction with different bank types, including management implications for river restoration projects. *Hydrobiologia*, **729** (1)S.: 17-31. DOI: 10.1007/s10750-014-1829-1
- MALCHEREK, A. (2010): Gezeiten und Wellen - Die Hydromechanik der Küstengewässer. Wiebaden, Vieweg + Teubner.
- MCGARGIAL, K. & MARKS, B. J. (1995): FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. General Technical Report Pnw 0, US Forest Service., Washington, DC.
- MICHE, R. (1944): Mouvement ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. *Annales des Ponts et Chaussées*, **Vol 114**. DOI:
- PETERS, K., STAHLMANN, A. & KARCH, M. (2016): Wellen- und Strömungsmessungen im Rahmen von Makrophytenuntersuchungen - Zusammenfassung der Ergebnisse. Ramboll IMS Ingenieurgesellschaft mbH
- PETERSEN, J., DASSAU, O., DAUCK, H. & JANINHOFF, N. (2011): Erfassung der Röhrichtbestände und angrenzender ufernaher Vegetationseinheiten der Unter- und Außenelbe aus den Daten der Luftbildbefliegung 2010. Technischer Bericht im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. nature-consult. Hildesheim.
- REUTER, F. & REINER, W. (1975): Der Ausbau des Fahrwassers der Unter- und Außenelbe auf eine Tiefe von 13,5 m unter Kartennull (KN). Jahrbuch der

- Hafenbautechnischen Gesellschaft. **Band 34**, Hafenbautechnischen Gesellschaft (HTG). 127-137
- SCHMIDT-WYGASCH, C., FUCHS, E. & SCHRÖDER, U. (2015): ElbService: Integrierende Forschungsansätze für naturnahe Ufer an der Tideelbe. HTG-Kongress 2015, Maritim Hotel Bremen.
- SCHRÖDER, U. (2004a): Analyse der aktuellen räumlichen Veränderungen ufernaher Röhrichte und Uferstauden unter besonderer Berücksichtigung ihrer historischen Entwicklung (der letzten 30 bis 50 Jahre) - Untersuchungen im Rahmen der Beweissicherung zur Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt (14,5 m Ausbau). BfG-Bericht. **BfG-1441**, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Koblenz.
- SCHRÖDER, U. (2004b): Analysis of Shift in Reed Habitats along the Tidal River Elbe. in: Remote Sensing & GIS for Environmental Studies: Applications in Geography; Göttinger Geographische Abhandlungen - Göttinger geographische Abhandlungen. S. Erasmí, B. Cyffka & M. Kappas (Hrsg.). Göttingen. **113**: S.: 109-115.
- SCHRÖDER, U. (2008): Untersuchungen zur Entwicklung verschiedener Vegetationseinheiten im Rahmen der Beweissicherung zur Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe im Bereich der Delegationsstrecke. BfG-Bericht. **BfG-1627**, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Koblenz.
- SCHRÖDER, U. (2012): Untersuchungen zur Entwicklung verschiedener Vegetationseinheiten im Rahmen der Beweissicherung zur Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe im Bereich der Delegationsstrecke (3. Folgebefliegung). BfG-Bericht. **BfG-1769**, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Koblenz.
- SCHRÖDER, U. (2015): Erste Einschätzung der Ist-Zustandsaufnahme der drei exponierten Standorte im Rahmen des Wellenschlagmonitorings: 6 S.
- SCHRÖDER, U., DIEDERICH, M. & FUCHS, E. (2013): Empfehlungen für die Auswahl dreier exponierter Standorte zum Monitoring von Makrophytenbeständen an der Unterelbe (Beweissicherung FAP). **BfG-1824**, Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz. 35 S.
- SHI, B. W., YANG, S. L., WANG, Y. P., BOUMA, T. J. & ZHU, Q. (2012): Relating accretion and erosion at an exposed tidal wetland to the bottom shear stress of combined current-wave action. *Geomorphology*, **138** (1): 380-389. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.004>
- SOULSBY, R. L. & CLARKE, S. (2005): Bed Shear-Stresses Under Combined Waves and Currents on Smooth and Rough Beds. Estuary Research Project DEFRA FD 1905 (EstProc). **Report TR 137**.
- STILLER, G. (2005): Bewertungsverfahren für die Qualitätskomponenten Makrophyten und Angiospermen in der Tideelbe gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie (Endbericht), im Auftrag der ARGE Elbe. H. Wassergütestelle Elbe, Wassergütestelle Elbe. Hamburg.
- STILLER, G. (2016): Untersuchungen zur Erfassung von Veränderungen der Makrophytenbestände unter Berücksichtigung von Wellenschlag / Wellenbelastung im Bearbeitungsgebiet Tideelbe - Endbericht - Ergebnisse Ersterfassung 2015. Dipl.-Biol. Gabriele Stiller- Biologische Kartierungen und Gutachten. Hamburg.
- VAN RIJN, L. C. (1993): Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications. Amsterdam, the Netherlands.

Bundesanstalt für  
Gewässerkunde

Uwe Schröder  
Elmar Fuchs  
Maike Heuner  
Carolin Schmidt-Wygasch  
André Terwei

**WSD-NORD (2012): Planfeststellungsbeschluss für die Fahrrinnenanpassung der  
Unter- und Außenelbe für 14,5 m tiefgehende Containerschiffe. AZ.: P-  
143.3/46, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord. Kiel.**

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945

# Anhang

- I Aufnahmeblätter Böden
- II Vegetationsaufnahmen
- III Vegetationskarten
- IV Korrelationsmatrix

Einfluss des schiffserzeugten  
Wellenschlages auf emerse  
Makrophyten der Tideelbe am  
Beispiel dreier exponierter  
Standorte – Ist-Zustand  
Untersuchungen im Rahmen  
des Planfeststellungs-  
beschlusses zur  
Fahrrinnenanpassung

BfG-1945





















PROJEKT : MAKROPHYTENMONITORING TIDEELBE  
 Institut : BfG  
 Kartierer : Fuchs

Profil (1027)	Art	Datum	Zeit	Gewässer (km)	Ort	Ortsbezeichnung	NN + m	Rechts	Hoch					
HW1c (5)	BM	21.07.15	14:10	Elbe (681)	Hollerwettern	Transekt c	-0,477	523621	5965441					
<b>Relief</b>				<b>Nutzung</b>			<b>Melioration</b>				<b>Vegetation</b>			
TH, N1				OF			AY				VZ			
<b>Bodentyp</b>				Kürzel			<b>Substrattyp</b>				Kürzel			
Brackwatt				IWb			tidal brackischer kalkhaltiger Sande Lehm über tidal brackischem kalkhaltigem Sand, z.T. vorgespült				mb-(os)cs1 / mb-(os)cs			
Tiefe	HOR	Bodenart	Grobboden	Farbe	Gefüge	Makropor	FEU	Ld	DW	HUM	CARB	Fleckung	Beim.	Sonstiges
0 - 3	tp(z)Fo	Slu	-	smbn	koh	0	6	1	0	1	3.2	0	0	Biofilm
3 - 16	lltp(z)Fr	Ls2	-	bnligr	koh	0	5	2	0	0	3.2	0	0	-
16 - 30	llltp(z)Fr	mS	gG1	swgr	koh	0	5	2	0	0	3.2	0	0	GW 16cm unter GOK









PROJEKT : MAKROPHYTENMONITORING TIDEELBE  
 Institut : BfG  
 Kartierer : Fuchs

Profil (1029)	Art	Datum	Zeit	Gewässer (km)	Ort	Ortsbezeichnung	NN + m	Rechts	Hoch					
HW3c (7)	BM	21.07.15	15:15	Elbe (681)	Hollerwettern	Transekt c	0,680	523697	5965496					
<b>Relief</b>				<b>Nutzung</b>			<b>Melioration</b>			<b>Vegetation</b>				
TH, N1				OF			AY			VZ				
<b>Bodentyp</b>				<b>Kürzel</b>			<b>Substrattyp</b>			<b>Kürzel</b>				
Brackwatt				IWb			tidal brackischer kalkhaltiger Sand, z.T. vorgespült			mb-(os)cs				
Tiefe	HOR	Bodenart	Grobboden	Farbe	Gefüge	Makropor	FEU	Ld	DW	HUM	CARB	Fleckung	Beim.	Sonstiges
0 - 10	tp(z)Fo	mS	-	grlibn	ein	0	5	1	Wf3, Wg2	0	3	eh, f1	Vr1	Biofilm
10 - 40	tp(z)Fr	gS	-	swgr	koh	0	6	2	Wf2, Wg2	0	3.3	0	Vr1	GW 10cm unter GOK



PROJEKT : MAKROPHYTENMONITORING TIDEELBE  
 Institut : BfG  
 Kartierer : Fuchs

Profil (1030)	Art	Datum	Zeit	Gewässer (km)	Ort	Ortsbezeichnung	NN + m	Rechts	Hoch					
St1a (8)	BM	22.07.15	16:26	Elbe (666)	Schwartztonnensand	Transekt a	-0,123	530522	5951877					
<b>Relief</b>				<b>Nutzung</b>			<b>Melioration</b>				<b>Vegetation</b>			
TH, N1				OF			AY				VZ			
<b>Bodentyp</b>				Kürzel			<b>Substrattyp</b>				Kürzel			
Flusswatt				IWf			tidal perimarer kalkhaltiger lehmiger Sand, z.T. vorgespült				mb-(os)csI			
Tiefe	HOR	Bodenart	Grobboden	Farbe	Gefüge	Makropor	FEU	Ld	DW	HUM	CARB	Fleckung	Beim.	Sonstiges
0 - 5	tpFo	mS	-	swligrbn	ein/koh	0	5	2	0	0	3.2	0	0	Biofilm
5 - 10	lltpFr	Lu	-	grlisw	koh	0	4	2	0	0	3.3	0	0	-
10 - 40	lltpFr	mS	-	grsw	koh	0	6	2	0	0	3	0	0	-

**PROJEKT** : MAKROPHYTENMONITORING TIDEELBE  
 Institut : BfG  
 Kartierer : Fuchs

Profil (1031)	Art	Datum	Zeit	Gewässer (km)	Ort	Ortsbezeichnung	NN + m	Rechts	Hoch					
St2a (9)	BM	22.07.15	12:20	Elbe (666)	Schwartztonn ensand	Transekt a	0,107	530512	5951866					
<b>Relief</b>				<b>Nutzung</b>		<b>Melioration</b>				<b>Vegetation</b>				
TH, N1				OF		AY				VZ				
<b>Bodentyp</b>				Kürzel		<b>Substrattyp</b>				Kürzel				
Flusswatt				IWf		tidal perimarer kalkhaltiger lehmiger Sand, z.T. vorgespült				mb-(os)cls				
Tiefe	HOR	Bodenart	Grobboden	Farbe	Gefüge	Makropor	FEU	Ld	DW	HUM	CARB	Fleckung	Beim.	Sonstiges
0 - 2	tpFi	Ls2	-	smbn	ko	0	6	1	0	0	3.3	0	0	dünner Biofilm
2 - 30	lltpFor	SI2	-	bngr	ein/koh	0	5	2	0	0	3.4	0	0	-
30 - 40	llltpFr	mS	-	gr	ein/koh	0	6	2	0	0	3.4	0	0	-







PROJEKT : MAKROPHYTENMONITORING TIDEELBE  
 Institut : BfG  
 Kartierer : Fuchs

Profil (1033)	Art	Datum	Zeit	Gewässer (km)	Ort	Ortsbezeichnung	NN + m	Rechts	Hoch					
St4a (11)	BM	22.07.15	12:35	Elbe (666)	Schwartztonn ensand	Transekt a	0,850	530500	5951849					
<b>Relief</b>				<b>Nutzung</b>			<b>Melioration</b>				<b>Vegetation</b>			
TH, N1				OF			AY				VZ			
<b>Bodentyp</b>				Kürzel			<b>Substrattyp</b>				Kürzel			
Flussrohmarsch-Flusswatt				MRf-IWf			tidal perimarer kalkhaltiger sandiger Lehm, z.T. vorgespült				mb-(os)csl			
Tiefe	HOR	Bodenart	Grobboden	Farbe	Gefüge	Makropor	FEU	Ld	DW	HUM	CARB	Fleckung	Beim.	Sonstiges
0 - 5	tpFi	Lu2	-	smbn	koh	0	6	1	0	0	3.2	0	0	-
5 - 10	lltpFho	Ls3	-	smhbn	koh	0	5	2	Wf3, Wg3	1	3.2	eh1, kr, flw	0	-
10 - 30	llltpFr1	SI2, mS	fG1	grsw	koh	0	6	2	Wg2	0	3.3	0	0	-
30 - 40	IVtpFr2	mS	-	gr	ein/koh	0	6	2	0	0	3.2	0	0	-





























PROJEKT : MAKROPHYTENMONITORING TIDEELBE  
 Institut : BfG  
 Kartierer : Fuchs



Profil (1040)	Art	Datum	Zeit	Gewässer (km)	Ort	Ortsbezeichnung	NN + m	Rechts	Hoch					
St4c (18)	BM	22.07.15	13:37	Elbe (666)	Schwartztonnensand	Transekt c	1,560	530398	5951888					
<b>Relief</b>				<b>Nutzung</b>			<b>Melioration</b>				<b>Vegetation</b>			
TH, N1				OF			AY				VZ			
<b>Bodentyp</b>				Kürzel			<b>Substrattyp</b>				Kürzel			
Flusswatt-Flussrohmarsch				IWf-MRf			tidal perimarinem kalkhaltigem Sand, z.T. vorgespült				mb-(os)cl / mb-(os)cs			
Tiefe	HOR	Bodenart	Grobboden	Farbe	Gefüge	Makropor	FEU	Ld	DW	HUM	CARB	Fleckung	Beim.	Sonstiges
0 - 1	tpFi	Ls2	-	bnligr	koh	0	6	1	0	0	3	0	0	-
1 - 10	IItpAh-Fo-Go	Lu	-	bnligr	ein/koh	0	4	3	Wg1, Wf1	1	3.2	eh1, flw, ed1, kr	0	-
10 - 30	IIItpFr-Gr	SI4, mS	-	grsw	ein/sub	0	4	3	Wf1	0	3.3	0	Vrf1	GW 20cm unter GOK
30 - 40	IVtpFr	gS	-	sw	ein/koh	0	6	2	Wg1	0	3	0	0	-

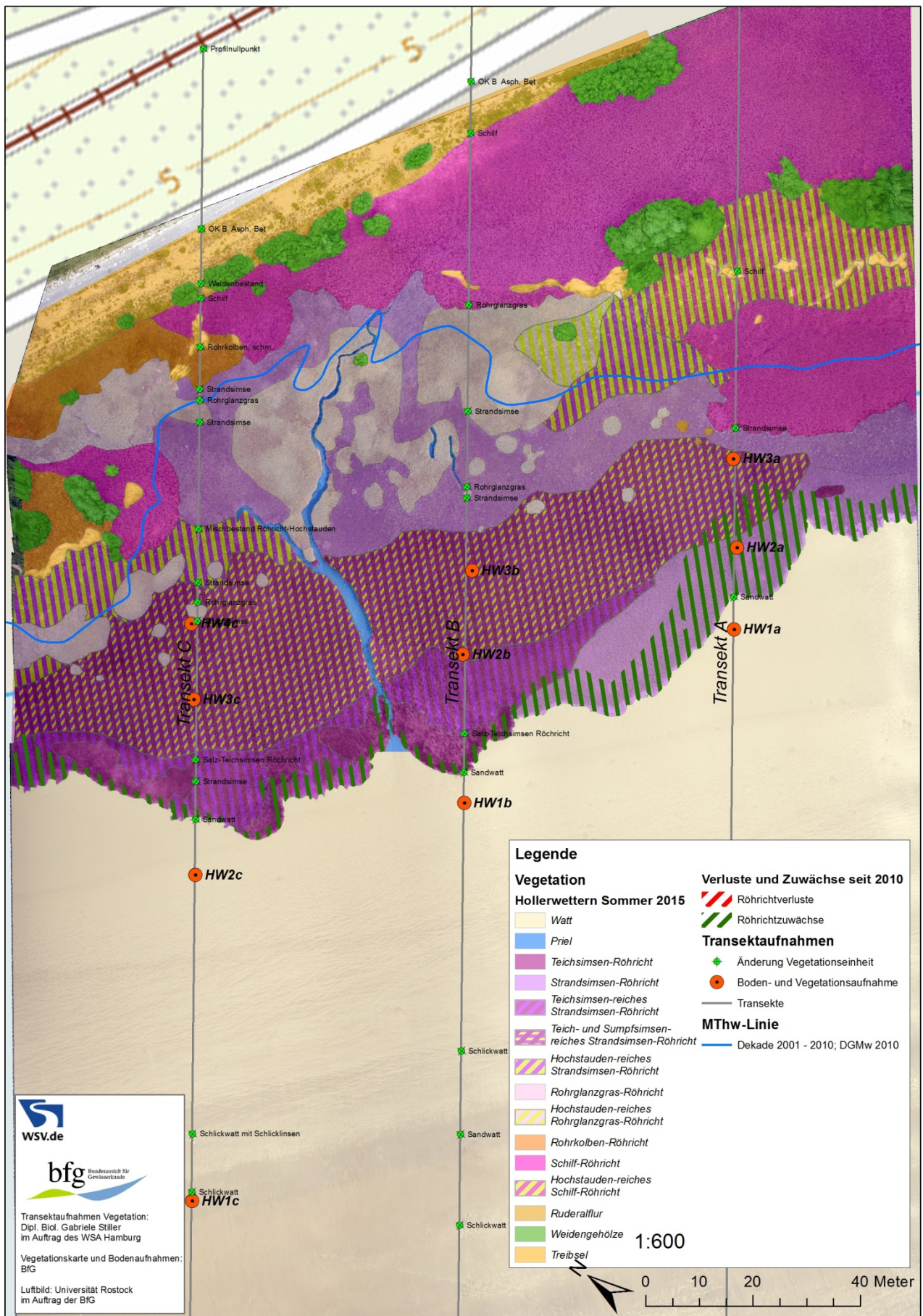






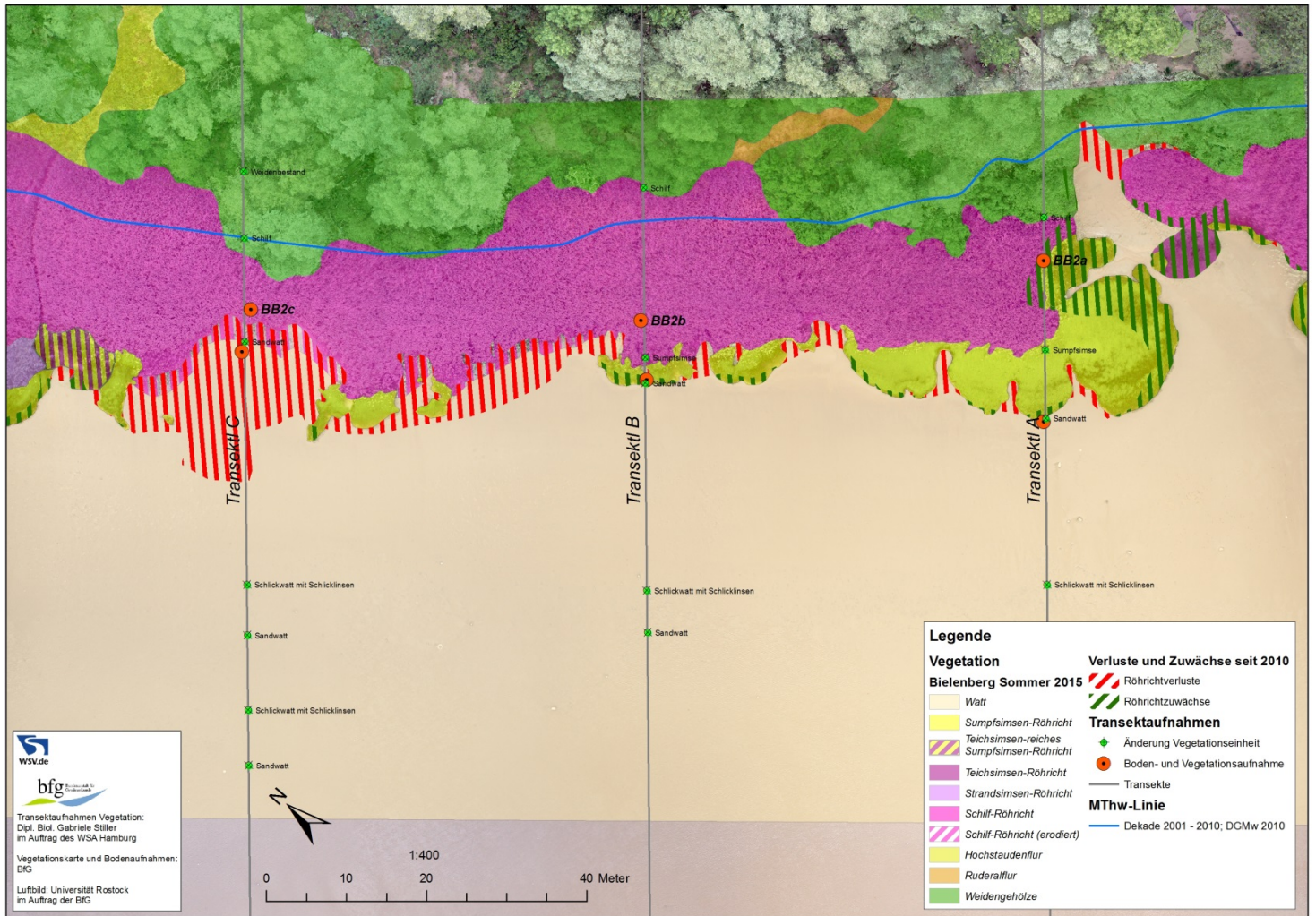


Karten der Vegetationseinheiten (Platzhalter)









EN





