



EUROPEAN UNION

**BASEWAD (BALancing SEdiment deficits  
in the WADden Sea) – Systemstudien zur  
morphologischen Entwicklung im  
Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer**

**B3955.03.04.70238**

BASEWAD

Auftraggeber: Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz  
Schleswig-Holstein

Auftrag vom: 29.09.2016, Az.: 2 – 5203.818

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.03.04.70238

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich  
Referat: K3  
Bearbeiter: Dipl.-Geoök. Benjamin Fricke  
Dr.-Ing. Holger Weilbeer

Hamburg, Juli 2020

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

## **Zusammenfassung**

Im Rahmen des Projekts BASEWAD untersucht der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) den Einfluss und die Nachhaltigkeit von Sandeinbringungen entlang des südlichen Teils der Insel Sylt. In diesem Bereich finden seit längerer Zeit Sandaufspülungen im Rahmen des Küstenschutzes statt, die in erster Linie als Ausgleich für die Erosion der Strände entlang der Sylter Westküste dienen. Von großem Interesse ist jedoch auch die Frage, inwieweit das Wattenmeer von diesen Maßnahmen profitiert und in welchen Bereichen es zu Ablagerungen kommen kann. Aufgabe der BAW ist hierbei, mit Hilfe numerischer Simulationen die morphologischen Prozesse im Nordfriesischen Teils des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeers mit Fokus auf die nähere Umgebung des südlichen Teils von Sylt und die sie antreibenden Kräfte zu beschreiben. Gezielt sollen dann die Transportpfade von Sandaufspülungen im Küstenvorfeld von Hörnum herausgearbeitet werden und bestimmt werden, welche Auswirkungen sich von solchen Maßnahmen auf die Morphologie des Gebiets ableiten lassen.

Grundlage der Studien ist ein Modell der BAW, mit dem die Tidedynamik und der Stofftransport in der Deutschen Bucht simuliert wird. Das Berechnungsnetz wurde entlang der Küste des südlichen Teils von Sylt verfeinert, um die küstennahen Strömungsverhältnisse präziser abbilden zu können. Zusätzlich erfolgt eine Erweiterung des Modells um die Berechnung des Seegangs, um die Wechselwirkung zwischen Seegang, Strömung und Sedimenttransport zu erfassen.

Hydrodynamik und Sedimenttransport sind durch die vorherrschenden meteorologischen und astronomischen Bedingungen geprägt. Der Simulationszeitraum 2010 liefert repräsentative Ergebnisse, die die langjährigen Bedingungen in dem Gebiet widerspiegeln. Zur Modellsteuerung dienen die realen hydrologischen und meteorologischen Bedingungen. Zur Bewertung der Ergebnisse werden verschiedene tideabhängige und tideunabhängige Kennwerte sowie die morphodynamische Entwicklung im Modell analysiert und mit Messungen und Erfahrungen aus einem vergleichbaren Zeitraum verglichen, um nachzuweisen, dass das Modell die grundlegenden Strömungs- und Transportprozesse realistisch abbildet. Dazu zählen z.B. die leichte Ebbstromdominanz entlang des westlichen Ufers des Vortrapp-tiefs und der Einfluss von hauptsächlich aus westlicher Richtung kommenden Starkwindereignissen auf den Seegang.

Die Ergebnisse der Modellierung zeigen einen resultierenden Küstenlängstransport in südlicher Richtung über die Theeknobsände und entlang der Küstenlinie der Hörnumer Odde in das Vortrapp-tief. Von dort findet eine Verlagerung mit der Tidedrömung sowohl in das Tidebecken als auch in Richtung Ebbdelta statt. Generell ist der Nettotransport von Sedimenten in das Hörnumer Tidebecken positiv. Bei starkem Seegang wird vermehrt Sediment in das Tidebecken transportiert.

Ausgehend von diesem Modellstand werden folgende Systemstudien durchgeführt:

### **Simulation einer Sandaufspülung**

In Anlehnung an eine reale Maßnahme vor Hörnum vom Sommer 2017 erfolgt die Umsetzung im Modell in der zweiten Hälfte des Jahres 2010. Die eingebrachte Sedimentmenge wird im Modell durch

eine zusätzliche Sedimentfraktion repräsentiert, deren Ausbreitung im Untersuchungsgebiet bilanziert werden kann. Diese Sedimentfraktion kann je nach hydrodynamischer Belastung als Geschiebe, aber auch in Suspension transportiert werden. Aus modelltechnischen Gründen muss die Sinkgeschwindigkeit etwas reduziert werden, wodurch die Transportwege in Suspension größer werden. Der verwendete Ansatz ermöglicht Aussagen über grundsätzliche Transportpfade des eingebrachten Sedimentes.

Der im Küstenvorfeld eingebrachte Sand folgt dem generellen Transportmuster entlang der Küste in das Vortrapptief. Hierbei ist die Bedeutung des Seegangs zur Mobilisierung des Sediments hervorzuheben. Unter normalen hydrodynamischen Bedingungen ist die Maßnahme relativ stabil und eine Ausbreitung des vorgespülten Sandes findet nur langsam und überwiegend als Geschiebe statt. Bei stärkerem Seegang kann das Material jedoch in Suspension geraten und sich so schneller und weiter ausbreiten.

Im betrachteten Simulationszeitraum sind fünf Monate nach Ende der Sandaufspülung noch ca. 80 % des eingebrachten Materials mit einem Korndurchmesser von 100 µm am Ort der Vorspülung. Etwa die Hälfte des mobilisierten Materials landet im Hörnum Tidebecken. Der Großteil davon verbleibt nahe der östlichen Küste von Sylt, während ein kleiner Teil weiter in das Tidebecken hinein transportiert wird und auch bis auf die Wattflächen gelangen kann. Weitere 25 % sedimentieren am Schütthang, im Vortrapptief und im Ebbdelta.

Die feineren Sandfraktionen mit ihren niedrigeren Sinkgeschwindigkeiten werden im Modell teilweise bis auf die Wattflächen transportiert, während die gröberen Fraktionen in den tieferen Bereichen der Rinnen verbleiben.

Inwieweit sich eine Akkumulation in den Rinnen auf ein Wachstum der Wattflächen auswirkt, lässt sich aus den Modellergebnissen nicht ableiten.

Maßnahmen in der durchgeführten Größenordnung sind alleine nicht ausreichend, um nennenswert zu einem Wachstum der Wattflächen im Hörnum Tidebecken beizutragen. Lokal stattfindende Prozesse können durch sie aber unterstützt und gestärkt werden.

### **Simulation und Analyse von vier Klimaszenarien**

In diesen Szenarien wird sowohl der Meeresspiegel als auch die Topographie variiert. Zugrunde liegen die Varianten der Strategie für das Wattenmeer 2100. Diese basieren auf der Annahme, dass durch den steigenden Meeresspiegel die Küstenvorfelder erodieren und so zum Wachstum der Wattflächen beigetragen haben. Diese Tendenzen sind auch in den Modellergebnissen des Jahreslaufs 2010 zu erkennen, wobei hier hauptsächlich die weiter im Inneren der Tidebecken gelegenen Wattflächen anwachsen. Eine quantitative Vorhersage zum langfristigen Anwachsen der Wattflächen ist nicht möglich.

Die mit dem morphodynamischen Modell durchgeführten Systemstudien zeigen, dass in diesen Szenarien die Küsten der vorgelagerten Inseln einer stärkeren Wirkung des Seegangs ausgesetzt sind, da dieser durch die größeren Wassertiefen erst näher an der Küste anfängt, Energie zu dissipieren. Hier können Sandaufspülungen im Küstenvorfeld eine wichtige Rolle spielen, um das natürlich vorkommende Riffsystem und seine dämpfende Wirkung auf den Seegang zu stärken.

Weiterhin kommt es in allen Szenarien zu einem Anstieg des Tidenhubs von bis zu 10 cm am Pegel Hörnum Hafen, der in erster Linie durch einen relativ zum Meeresspiegelanstieg verstärkten Anstieg des Tidehochwassers ausgelöst wird. Zudem nehmen die Überflutungsdauern der Wattflächen vor allem in den gesteigerten Szenarien teils deutlich zu. Dies kann dazu führen, dass bestimmte Wattflächen bis zu 100 Minuten pro Tide länger überflutet bleiben.

### **Bereitstellung von Daten an den Projektpartner Bioconsult.SH**

Für die biologische Habitatmodellierung werden zusätzlich die Jahre 2011 bis 2016 gerechnet. Verschiedene Kennwerte der Hydrodynamik, des Seegangs und des Sedimenttransports wurden für die Monate Januar bis Dezember berechnet und über die Jahre gemittelt.

## Summary

Within the framework of the project BASEWAD the Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) studies the impact and sustainability of sand nourishments along the southern part of the island Sylt. In this area beach nourishments are conducted as part of the coastal protection program to counter the erosion of sediment along the western shoreline of Sylt. It is also of great interest to what extent the Wadden Sea can profit from measures like these. The part of the BAW is to describe the morphological processes and its driving forces in the North Frisian part of the Wadden Sea in the focus area around the southern part of Sylt with the help of numerical simulations. The goal is to identify transport pathways of sand nourishments in front of the coast as well as the effect on the morphology of the area.

The hydrodynamic method UnTrim, the morphodynamic method SediMorph and the K-Model for the computation of waves are used for the numerical studies of the Basewad project. The studies are done with a model of the BAW that simulates the tidal dynamic and the transport of dissolved and suspended matter in the German Bight. The computation grid is refined along the southern coastline of the island Sylt, so the currents in this area could be depicted more precisely. The computation of waves is also added to incorporate the interaction between currents, waves and sediment transport.

Hydrodynamics and sediment transport processes are shaped by the prevalent meteorological and astronomical conditions. The simulation period of the year 2010 yields representative results, which reflect the long-standing conditions of the area. Real hydrological and meteorological conditions are used to operate the model. To assess the model results, different tidal characteristic numbers and those independent of the presence of tides as well as the morphodynamic evolution of the model are analyzed and compared with measurements and existing knowledge from comparable periods to prove that the model is capable of reproducing the general current and transport processes. These include for example a slight dominance of the ebbflow along the western bank of the Vortrapptief and the influence of strong winds, mainly coming from western direction, on the waves and sediment transport.

The model results show a longshore transport along the coastline of Sylt and over the Theeknob sands in a southward direction into the Vortrapptief. From there, the sediment is relocated with the tidal currents into the tidal basin as well as in the direction of the ebb delta. On the whole the net transport into the Hörnum tidal basin is positive. There is an increased influx of sediment during events with strong waves due to the dominant wind direction being somewhat aligned with the orientation of the main channel.

Based on this model setup, the following system studies are conducted:

### **Simulation of a sand nourishment**

Based on a real measure from the summer 2017 in the near shore area of Hörnum, the implementation in the model takes place during the second half of 2010. The nourished sediment is a separate sediment fraction, which allows for good analysis and balancing of its distribution with time. This sedi-

ment fraction can be transported as bedload as well as in suspension with regards to the hydrological conditions. Due to technical reasons the settling velocity is reduced compared to the material that is normally used for such measures in this area. This leads to increased transport paths for the suspended transport. The modeling approach allows drawing conclusions about general transport pathways.

The nourished sand follows the same general transport pattern along the coastline into the Vortrapptief. The effect of waves on mobilizing the sediment plays an important role in its spread. The measure is relatively stable under normal hydrodynamic conditions and movement of the nourished sand occurs slowly and mostly as bedload. Increased waves can cause the material to become suspended and be transported quicker and further this way.

During the simulation period about 80 % of the nourished sediment is still at the site of the nourishment after five months. Roughly half of the mobilized sediment ends up in the Hörnum tidal basin. The majority of it remains close to the eastern coast of Sylt, while a small portion is transported further into the tidal basin and onto the tidal flats. Another 25 % of the sediment ends up on the accumulation slope of the Vortrapptief, in the Vortrapptief itself and in the ebb delta. Finer sediment fractions with lower settling velocities in the model are transported onto the tidal flats while the coarser fractions mostly remain in the deeper channels.

To what extent an accumulation in the channels contributes to a growth of the tidal flats cannot be determined from the model results.

Measures of this magnitude alone are not sufficient to contribute to a growth of the tidal flats of the Hörnum tidal basin in a meaningful way. They can however support and strengthen existing transport processes and patterns.

### **Simulation and analysis of four climate scenarios**

Sea level rise as well as changes in topography are included in these scenarios. The variants are taken from the 'Strategie für das Wattenmeer 2100'. The topographic evolution of the climate scenarios are based on the assumption that a rising sea level leads to erosion of the foreshore areas and that this material accounts for the majority of the growth of the tidal flats. These tendencies are present in the model results for the simulation period 2010, while here it's mostly the tidal flats that lie closer to the coastline that are areas of sediment accumulation. A quantitative statement on possible long-term growth rates of the tidal flats is not possible.

The studies with the morphodynamic model show that the coasts of the exposed islands experience a higher eroding force by waves, because due to the higher water depths the wave energy now starts to dissipate closer to the coastline and has therefore more energy compared to the current situation when reaching the coast. Sand nourishments in the foreshore area can play an important role to strengthen the existing bar system with its dampening effect on waves.

In all scenarios the tidal range increases up to 10 cm at the gauge Hörnum-Hafen. This increase is mostly caused by a rise of the tidal high water relative to the sea level rise. Additionally, the flooding duration on the tidal flats increases especially in scenarios with an accelerated sea level rise. Certain tidal flats can be flooded for up to 100 minutes longer during one tide.

## **Generation of data for the project partner Bioconsult.SH**

Different monthly averages of characteristic number for hydrodynamic, morphodynamic and wave parameters were generated for the years 2011 to 2016 and were provided to the project partner Bioconsult.SH for biological habitat modeling.



(1) Titel	Basewad		
(2) Ort	(3) Wasserstr.-Nr.	(4) Kilometer	
Hamburg	7000	von	bis
(5) Unterzeichner	Norbert Winkel		
(6) Bearbeiter	Benjamin Fricke, Holger Weilbeer		
(7) Mitarbeiter			
(8) Auftraggeber	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz		
(9) Auftrags-Nr.	B3955.03.04.70238	(10) aufgestellt am	27.07.2020
(11) Seitenzahl		(12) Sonderhinweise	
(13) Kurzfassung			
<p>Das Projekt behandelt verschiedene Fragestellungen zur morphologischen Entwicklung des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres im Bereich des Hörnumer Tidebeckens. Grundlage der Systemstudien ist ein Modell der BAW, mit dem die Tidedynamik, der Seegang und der Stofftransport in der Deutschen Bucht simuliert werden.</p> <p>Hydrodynamik und Transport sind durch die vorherrschenden meteorologischen Bedingungen geprägt. Der Simulationszeitraum 2010 liefert repräsentative Ergebnisse, die die langjährigen Bedingungen in dem Gebiet widerspiegeln. Die grundlegenden Strömungs- und Transportprozesse im Untersuchungsgebiet werden herausgearbeitet. Dazu zählen z.B. die leichte Ebbstromdominanz entlang des westlichen Ufers des Vortrapptiefs und der Einfluss von hauptsächlich aus westlicher Richtung kommenden Starkwindereignissen auf den Seegang.</p> <p>Es findet ein Küstenlängstransport in südlicher Richtung über die Theeknobsände und entlang der Küstenlinie der Hörnumer Odde in das Vortrapptief statt. Von dort findet eine Verlagerung mit der Tideströmung sowohl in das Tidebecken als auch in Richtung Ebbdelta statt. Generell ist der Nettotransport von Sedimenten in das Hörnumer Tidebecken positiv. Während Ereignissen mit starkem Seegang wird vermehrt Sediment in das Tidebecken transportiert.</p> <p>In Anlehnung an eine reale Maßnahme vor Hörnum vom Sommer 2017 erfolgt die Umsetzung einer Sandaufspülung im Modell in der zweiten Hälfte des Jahres 2010. Der im Küstenvorfeld eingebrachte Sand folgt dem generellen Transportmuster entlang der Küste in das Vortrapptief. Unter normalen hydrodynamischen Bedingungen ist die Maßnahme relativ stabil und eine Ausbreitung des Materials findet nur langsam und überwiegend als Geschiebe statt. Bei stärkerem Seegang kann das Material jedoch in Suspension geraten und sich so schneller und weiter ausbreiten.</p> <p>In vier Klimaszenarien wird sowohl der Meeresspiegel als auch die Topographie variiert. Zugrunde liegen die Varianten der Strategie für das Wattenmeer 2100. Die Küsten der vorgelagerten Inseln sind hier einer stärkeren Wirkung des Seegangs ausgesetzt. Hier können Sandaufspülungen im Küstenvorfeld eine wichtige Rolle spielen, um das natürlich vorkommende Riffsystem und seine dämpfende Wirkung auf den Seegang zu stärken.</p>			
(14) Standort		(15) Archiv-Nr.	

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen und Daten	3
2.1	Untersuchungskonzept	3
2.2	Anfangswerte	5
2.2.1	Topographie	5
2.2.2	Sedimentinventar	7
2.3	Randwerte	9
2.3.1	Seeseitiger Wasserstand	9
2.3.2	Wind	9
2.3.3	Oberwasserzufluss	14
3	Methode	15
3.1	Mathematische Simulationsverfahren	15
3.1.1	UnTrim	15
3.1.2	SediMorph	17
3.1.3	K-Modell	18
3.2	Analyse und Bewertung	18
4	Ergebnisse	22
4.1	Beschreibung des Referenzzustands	22
4.1.1	Wasserstand	22
4.1.2	Strömung	25
4.1.3	Seegang	29
4.1.4	Bodenschubspannung	32
4.1.5	Morphodynamik	36
4.1.6	Bilanzierung von morphologischen Änderungen	40
4.2	Modellierung einer Sandaufspülung	48
4.2.1	Untersuchungskonzept	48
4.2.2	Ergebnisse	50
4.3	Klimaszenarien	54
4.3.1	Untersuchungskonzept	54
4.3.2	Auswirkungen auf die Hydrodynamik	55
4.3.3	Auswirkungen auf den Seegang	59
4.3.4	Auswirkungen auf die Morphodynamik	60
4.4	Daten für die biologische Habitatmodellierung	62
5	Zusammenfassung	64
6	Literaturverzeichnis	67

<b>Bildverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Bild 1: Topographie des gesamten Modellgebietes. Rot markiert ist das Untersuchungsgebiet.	2
Bild 2: Darstellung des Fokusgebiets.	3
Bild 3: Lage der Pegel und Messstationen.	4
Bild 4: Oben: Topographie im Bereich des Hörnumer Tidebeckens. Unten: Verwendete Gitterauflösung im Bereich der Hörnumer Odde.	6
Bild 5: Mittlerer Korndurchmesser der Anfangsverteilung des verwendeten Sedimentinventars für das gesamte Modellgebiet.	7
Bild 6: Oben: mittlerer Korndurchmesser im Fokusgebiet mit den Daten aus dem Aufmod -Projekt. Unten: Mittlerer Korndurchmesser im Fokusgebiet mit den neueren Daten vom FTZ.8	
Bild 7: Zeitreihe der gemessenen Windgeschwindigkeit an der Station List für das Jahr 2010.	10
Bild 8: Verteilung und Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten für Jahr 2010 an der Station Helgoland.	10
Bild 9: Verteilung und Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten für den Zeitraum 1985 – 2015 an der Station Helgoland.	11
Bild 10: Vergleich der Ereignisse mit Windgeschwindigkeiten > 11 m/s an der Station Helgoland für das Jahr 2010 (links) und den Zeitraum 1985 – 2015 (rechts).	13
Bild 11: Vergleich der Ereignisse mit Windgeschwindigkeiten > 11 m/s an der Station List für das Jahr 2010 (links) und den Zeitraum 1985 – 2015 (rechts).	13
Bild 12: Zeitreihen des Oberwasserabflusses für die Elbe bei Geesthacht (oben), die Weser bei Hemelingen (mitte) und die Ems bei Herbrum (unten) für das Jahr 2010.	14
Bild 13: Im Modell berücksichtigte natürliche Prozesse.	15
Bild 14: Gemessene Windgeschwindigkeit in m/s an der Station List für den Zeitraum des analysierten Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010.	19
Bild 15: Bilanzierungspolygone des LKN entlang der schleswig-holsteinischen Nordseeküste.	20
Bild 16: Bilanzierungspolygone für das Hörnumer Tidebecken.	21
Bild 17: Vergleich des gemessenen und modellierten Wasserstands am Pegel Terschelling.	23
Bild 18: Vergleich des gemessenen und modellierten Wasserstands am Pegel Helgoland.	23
Bild 19: Vergleich des gemessenen und modellierten Wasserstands am Pegel Hörnum Hafen.	24
Bild 20: Gemessene Strömungsgeschwindigkeit und –richtung zwischen Sylt (0 m) und Amrum (4200 m) für vier Tiden (Ross, 1998).	26
Bild 21: maximale Ebbestromgeschwindigkeit für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010 für den Bereich zwischen Sylt und Amrum.	27

Bild 22: maximale Flutstromgeschwindigkeit für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010 für den Bereich zwischen Sylt und Amrum.	27
Bild 23: Verhältnis der maximalen Flutstromgeschwindigkeit zur maximalen Ebbestromgeschwindigkeit für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010. Rote Bereiche sind flutstromdominant und blaue Bereiche sind ebbstromdominant.	28
Bild 24: Signifikante Wellenhöhe für das Jahr 2010 am Pegel Westerland aus Messungen (schwarze Kurve) und aus Modellergebnissen (rote Kurve).	29
Bild 25: Signifikante Wellenhöhe für die Monate August und September 2010 am Pegel Westerland aus Messungen (schwarze Kurve) und aus Modellergebnissen (rote Kurve).	30
Bild 26: Signifikante Wellenhöhe für das Jahr 2010 am Pegel Hörnum aus Messungen (schwarze Kurve) und aus Modellergebnissen (rote Kurve). (Ausfall des Messgeräts für den Zeitraum bis Ende Mai und ab Anfang Dezember).	31
Bild 27: Mittlere signifikante Wellenhöhe für das Jahr 2010.	31
Bild 28: Mittelwert der maximalen Bodenschubspannungen während des Flutstroms für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010.	32
Bild 29: Mittelwert der maximalen Bodenschubspannungen während des Ebbstroms für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010.	33
Bild 30: Mittlere residuelle Bodenschubspannung in einer Tide für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010.	33
Bild 31: Residuelle Bodenschubspannungen für das Jahr 2010 mit Seeganskoppelung.	34
Bild 32: Residuelle Bodenschubspannungen für das Jahr 2010 ohne Seeganskoppelung.	35
Bild 33: Häufigkeit der effektiven Bodenschubspannungen zwischen 3 und 10 N/m <sup>2</sup> für das Jahr 2010.	35
Bild 34: Morphologische Hot Spots im Fokusgebiet.	36
Bild 35: Vergleich von simulierten Tiefenänderungen für das Jahr 2010 (oben) und den gemessenen mittleren jährlichen Änderungen für den Zeitraum 2007-2013 (unten) für den Bereich um Hörnum.	37
Bild 36: Vergleich von simulierten Tiefenänderungen für das Jahr 2010 (oben) und den gemessenen mittleren jährlichen Änderungen für den Zeitraum 2007-2013 (unten) für den Bereich des Ebbdeltas.	39
Bild 37: Zeitliche Änderung des Sedimentvolumens für ein Kontrollvolumen entlang der Binnenküste des Hörnumer Tidebeckens.	40
Bild 38: Ausgewählte Kontrollvolumen für den nördlichen Teil des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres.	41
Bild 39: Änderung des Sedimentvolumens in m <sup>3</sup> für Bilanzierungspolygone entlang der schleswig-holsteinischen Nordseeküste für das Jahr 2010.	42

Bild 40: Mittlere jährliche Änderung des Sedimentvolumens in m <sup>3</sup> für Bilanzierungspolygone entlang der schleswig-holsteinischen Nordseeküste für den Zeitraum 2010 bis 2016.	42
Bild 41: Änderung des Sedimentvolumens in m <sup>3</sup> für Bilanzierungspolygone entlang der schleswig-holsteinischen Nordseeküste für die Jahre 2011 bis 2016.	43
Bild 42: Änderung des Sedimentvolumens in m <sup>3</sup> für verschiedene Bilanzierungspolygone im Fokusgebiet für das Jahr 2010.	45
Bild 43: Mittlere jährliche Änderung des Sedimentvolumens in m <sup>3</sup> für verschiedene Bilanzierungspolygone im Fokusgebiet für den Zeitraum 2010 bis 2016.	45
Bild 44: Änderung des Sedimentvolumens in m <sup>3</sup> für verschiedene Bilanzierungspolygone im Fokusgebiet für die Jahre 2011 bis 2016.	46
Bild 45: Änderung des Sedimentvolumens in m <sup>3</sup> für verschiedene Bilanzierungspolygone im Fokusgebiet für die Zeiträume 1.5.2010 – 1.8.2010 (links) und 1.9.2010 – 1.12.2010 (rechts).	47
Bild 46: Qualitative Beschreibung der Pfade des Geschiebetransports für das Fokusgebiet.	48
Bild 47: Lage des Bereiches der Sandaufspülung vom Sommer 2017.	49
Bild 48: Verteilung der Sedimentmasse der Fraktion 100 µm am Ende des Simulationszeitraums in kg/m <sup>2</sup> (logarithmische Skalierung).	51
Bild 49: Topographie entlang eines Querprofils durch den Vorspülkörper zu drei verschiedenen Zeitpunkten.	51
Bild 50: Entwicklung des Sedimentvolumens der vorgespülten Sedimentfraktion 100 µm in m <sup>3</sup> im Bilanzierungspolygon des Vorspülkörpers.	52
Bild 51: Verteilung der Sedimentmasse der Fraktion 200 µm am Ende des Simulationszeitraums in kg/m <sup>2</sup> (logarithmische Skalierung).	53
Bild 52: Hypsometrische Kurven des Hörnummer Tidebeckens und des Küstenvorfeldes für die Klimaszenarien der Wattenmeerstrategie 2100.	54
Bild 53: Oben: Vergleich des Wasserstands für zwei Tiden zwischen dem Referenzzustand (schwarz) und dem Szenario G100 (rot) an einem Punkt im Vortrapptief. Vom Szenario G100 wurden zusätzlich 80 cm subtrahiert (blau), um die Änderungen in der Tidekurve hervorzuheben. Unten: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten für zwei Tiden zwischen dem Referenzzustand (schwarz) und dem Szenario G100 (rot) an einem Punkt im Vortrapptief.	56
Bild 54: mittlere Überflutungsdauer in Minuten während einer Tide im Referenzzustand für das Hörnummer Tidebecken.	58
Bild 55: Differenzen der Überflutungsdauern der Klimaszenarien im Vergleich zum Referenzzustand in min. Rote Bereiche bedeuten eine längere Überflutungsdauer in den Klimaszenarien.	58

Bild 56: Häufigkeit der signifikanten Wellenhöhe für das Jahr 2010 für die Klasse 0 – 1 m für den Referenzzustand (linke Seite) und die Änderungen für das Szenario G100 (rechte Seite).	59
Bild 57: Häufigkeit der signifikanten Wellenhöhe für das Jahr 2010 für die Klasse 1 - 2 m für den Referenzzustand (linke Seite) und die Änderungen für das Szenario G100 (rechte Seite).	60
Bild 58: Häufigkeit der signifikanten Wellenhöhe für das Jahr 2010 für die Klasse 2 - 5 m für den Referenzzustand (linke Seite) und die Änderungen für das Szenario G100 (rechte Seite).	60
Bild 59: Entwicklung der Änderung des Sedimentvolumens für das Hörnumer Tidebecken für den Referenzzustand und das Szenario G100 über den Zeitraum von einem Jahr.	61
Bild 60: Residuelle Bodenschubspannung für den Monat Juli im Mittel für den Zeitraum 2011 bis 2016 in N/m <sup>2</sup> .	63
Bild 61: Signifikante Wellenhöhe für den Monat Juli im Mittel für den Zeitraum 2011 bis 2016 in m.	63

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Tabelle 1: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Helgoland im Vergleich für das Jahr 2010 und den Zeitraum 1985 bis 2015 (Abweichungen im kumulativen Anteil von 100 % resultieren aus Rundungsungenauigkeiten in der Ausgabe).	12
Tabelle 2: Mittlerer Abfluss für die Ästuare Elbe, Weser und Ems in m <sup>3</sup> /s.	14
Tabelle 3: Vergleich verschiedener mittlerer Tidekennwerte des Wasserstands zwischen Modell und Messung am Pegel Hörnum-Hafen für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010.	24
Tabelle 4: Vergleich verschiedener mittlerer Tidekennwerte des Wasserstands zwischen Modell und Messung am Pegel Hörnum-Hafen für das gesamte Jahr 2010.	24
Tabelle 5: Vergleich verschiedener Tidekennwerte des Wasserstands am Pegel Helgoland für das Jahr 2010 zwischen Modell und Messung und den Messungen von 2006 – 2014.	25
Tabelle 6: Im Modell vorgespültes Sedimentvolumen in m <sup>3</sup> .	49
Tabelle 7: Prozentuale Verteilung des mobilisierten Sediments nach 5 Monaten für verschiedene Bilanzierungspolygone.	52
Tabelle 8: Annahmen für den Anstieg des Meeresspiegels und das Wachstum der Wattflächen für verschiedene Klimaszenarien.	54
Tabelle 9: Differenz des mittleren Tidenhub der Klimaszenarien zum Referenzzustand in m für einen Nipp-Spring Zyklus an drei verschiedenen Positionen im Fokusgebiet.	55
Tabelle 10: Differenz des mittleren Tideniedrigwassers und des mittleren Tidehochwassers zwischen dem Referenzzustand und dem Szenario G100 an drei verschiedenen Positionen im Fokusgebiet.	55

## 1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Bei dem Projekt BASEWAD (Balancing sediment deficits in the Wadden Sea) handelt es sich um ein Teilprojekt des Interreg Projektes BWN („Building with Nature“)<sup>1</sup>. In einem Teilpaket dieses Projekts verfolgen Partner aus Deutschland, Dänemark, den Niederlanden, Belgien und Schweden das Ziel, sogenannte weiche Küstenschutzmaßnahmen zu prüfen oder zu entwickeln, um möglichen Auswirkungen des Klimawandels nachhaltig entgegenzuwirken. Dabei sollen natürliche Transportprozesse genutzt werden, um durch bestimmte Maßnahmen (insbesondere Sandaufspülungen) den Küstenschutz nachhaltig zu stärken und so der Erosion der Küsten entgegenzuwirken. Zugleich bieten solche weichen Maßnahmen auch die Möglichkeit, Ökosysteme zu stärken und ihre Resilienz gegenüber dem Klimawandel zu erhöhen.

Im Rahmen des Projekts BASEWAD untersucht der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) den Einfluss und die Nachhaltigkeit von Sandeinbringungen entlang des südlichen Teils der Insel Sylt. In diesem Bereich finden seit längerer Zeit Sandaufspülungen im Rahmen des Küstenschutzes statt und dienen in erster Linie als Ausgleich für die Erosion der Strände entlang der Sylter Westküste. In diesem Zusammenhang werden zwei Pilotmaßnahmen mit Sandaufspülungen im Küstenvorfeld von Hörnum durchgeführt. Diese sollen auch im Rahmen dieser Untersuchungen näher betrachtet werden.

Ziel des Projekts ist es zu prüfen, wie sich das eingebrachte Sediment ausbreitet. Besonderer Fokus liegt auf der Frage, inwieweit das Wattenmeer von diesen Maßnahmen profitiert und in welchen Bereichen es zu Ablagerungen kommen kann. Diese Aspekte sind vor allem im Hinblick auf die „Strategie für das Wattenmeer 2100“ (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, 2015) zu betrachten. Zum Erhalt der ökologischen Funktionalität des Wattenmeeres ist ein Mitwachsen der Wattflächen mit dem Meeresspiegel erforderlich. In welchem Ausmaß zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind, um zu gewährleisten, dass dies in ausreichendem Umfang stattfinden kann, muss untersucht werden.

Aufgabe der BAW ist hierbei zuerst, mit Hilfe numerischer Simulationen die morphologischen Prozesse im Nordfriesischen Teils des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeers mit Fokus auf die nähere Umgebung des südlichen Teils von Sylt (Bild 1) und die sie antreibenden Kräfte zu beschreiben. Gezielt sollen dann die Transportpfade von Sandaufspülungen im Küstenvorfeld von Hörnum herausgearbeitet werden und bestimmt werden, welche Auswirkungen sich von solchen Maßnahmen auf die Morphologie des Gebiets ableiten lassen.

Die Modellergebnisse sollen auch mit Blick auf die Fragestellungen des Klimawandels betrachtet und analysiert werden. Hier soll geprüft werden, in wie weit die in der „Strategie für das Wattenmeer

---

<sup>1</sup> nähere Informationen zu dem Projekt finden sich unter <https://northsearegion.eu/building-with-nature/>



2100“ getroffenen Annahmen zur topologischen Entwicklung des Wattenmeeres und des Küstenvorfeldes vom Modell unterstützt werden.

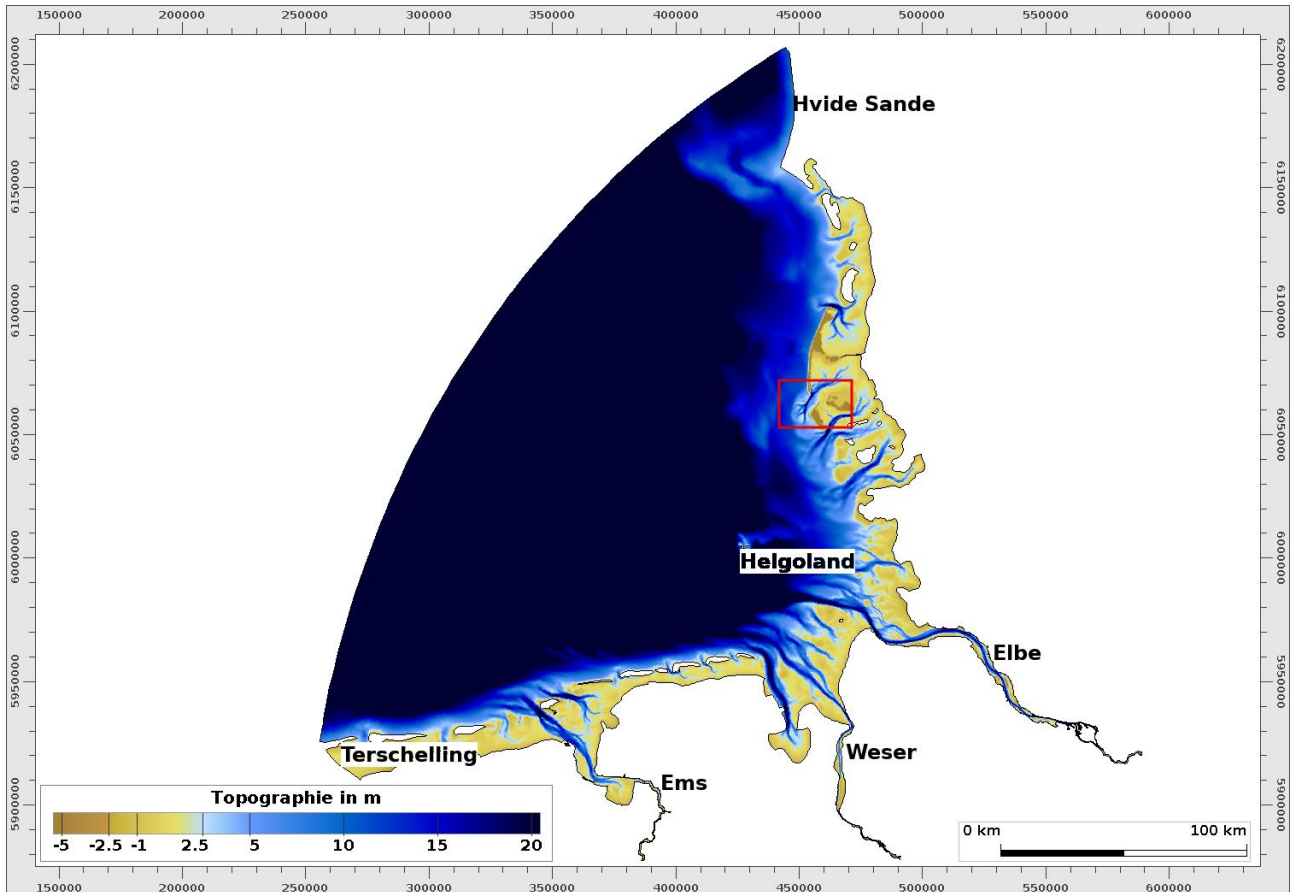


Bild 1: Topographie des gesamten Modellgebietes. Rot markiert ist das Untersuchungsgebiet.

## 2 Unterlagen und Daten

### 2.1 Untersuchungskonzept

Für die durchgeführten Untersuchungen wird das Deutsche Bucht Modell der BAW, das die Tidedynamik und den Stofftransport in der Deutschen Bucht mit Hilfe der numerischen Verfahren UnTrim (Hydrodynamik, siehe Kapitel 3.1.1), SediMorph (Morphodynamik, siehe Kapitel 3.1.2) und dem K-Modell (Seegang, siehe Kapitel 3.1.3) simuliert, verwendet. Dieses Modell wird mit leicht variierendem Setup auch in anderen Projekten der BAW eingesetzt. Hierzu zählen unter anderem das Experten-Netzwerk (Nielson et al, 2019) und das Projekt Extremeness (Grabemann et al, 2019). Beide Projekte beschäftigen sich mit unterschiedlichen Fragestellungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die hydrologische Situation in der Deutschen Bucht. Im Experten-Netzwerk ist darüber hinaus auch das Zusammenspiel eines Anstiegs des Meeresspiegels mit verschiedenen topographischen Szenarien Untersuchungsgegenstand.

Für die Bearbeitung der Fragestellungen des BASEWAD-Projektes ist es erforderlich, das vorhandene Gitternetz im Bereich des Fokusgebietes zu verfeinern. Dieses Fokusgebiet erstreckt sich vom südlichen Teil Sylts mit Schwerpunkt auf der Hörnum Odde über das Vortrapptief und das angrenzende Ebbdelta bis zum nördlichen Teil von Amrum (Bild 2).

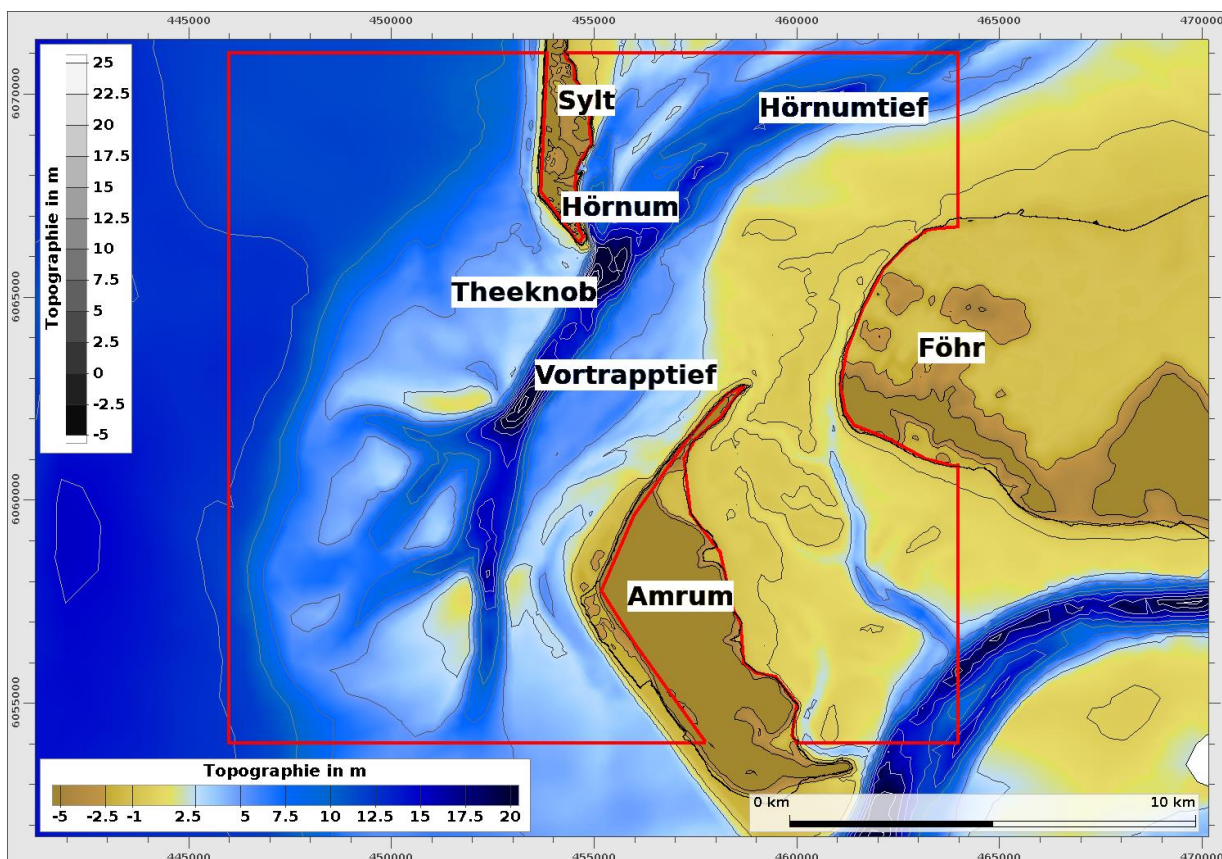


Bild 2: Darstellung des Fokusgebietes.

Der Sedimenttransport ist der zentrale Aspekt dieses Projekts. In diesem Gebiet ist dieser stark vom Seegang beeinflusst. Um dies zu berücksichtigen, wird das Modell um die Berechnung des Seegangs erweitert. Hierzu wird ein lokales Seegangsmodell erstellt.

Der Simulationszeitraum umfasst aufgrund der Datenverfügbarkeit zu Beginn des Projektes das Jahr 2010. Zur Modellsteuerung dienen die realen hydrologischen und meteorologischen Bedingungen. Die in diesem Zeitraum durchgeführten Sandaufspülungen entlang der Küstenlinie von Sylt werden im Modell nicht berücksichtigt. Als Grundlage werden zuerst verschiedene tideabhängige und tideunabhängige Kennwerte (s. Kapitel 3.2) sowie die morphodynamische Entwicklung im Modell betrachtet und mit Messungen und Erfahrungen aus einem vergleichbaren Zeitraum verglichen, um sicherzustellen, dass das Modell die grundlegenden Prozesse und Pfade des Sedimenttransports abbildet. Die Beschreibung des Jahres 2010 als Referenzzustand erfolgt in Kapitel 4.1.

Der Vergleich mit Messungen erfolgt an den in Bild 3 gezeigten Pegeln und Messstationen.

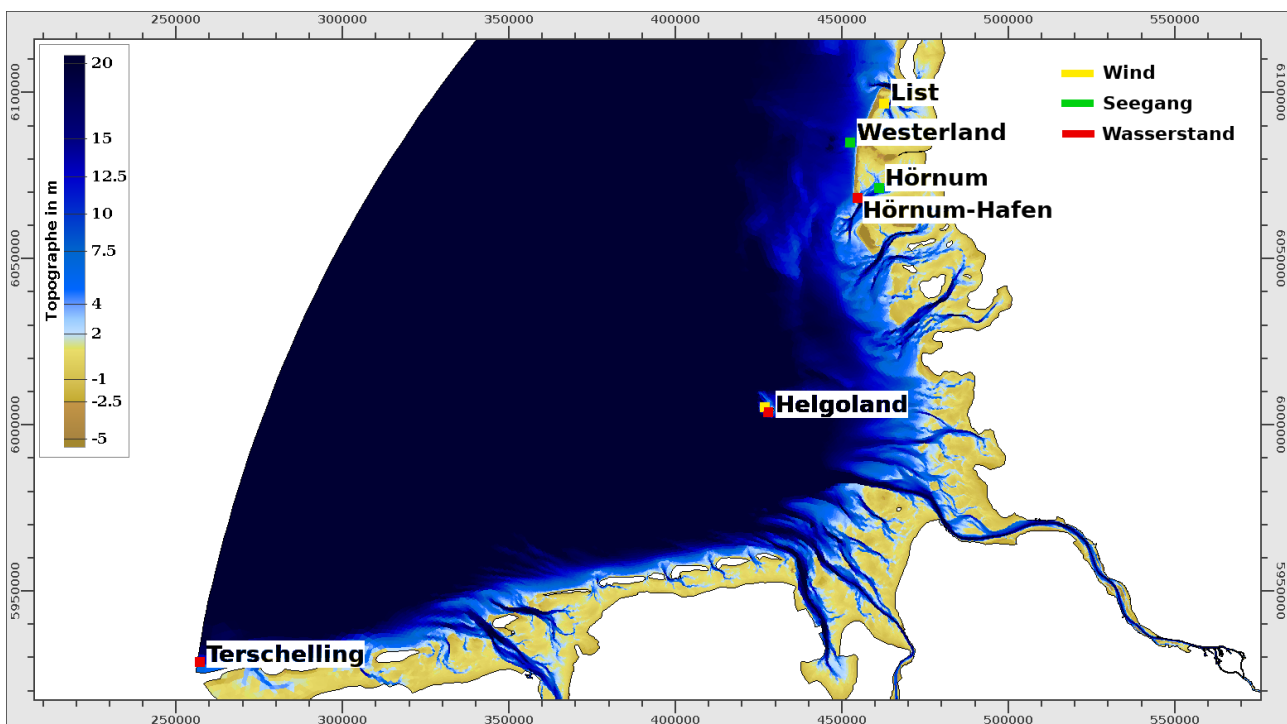


Bild 3: Lage der Pegel und Messstationen.

Dieser Modellstand ist Grundlage für weitere Untersuchungen, die dabei helfen sollen, die zentralen Aufgaben dieses Projekts, wie sie im Projektplan definiert sind, zu beantworten.

1. Prüfung, ob und in welchem Maße der vor und an der Westküste Sylts eingebrachte Sand durch Umlagerungsprozesse dem Wattenmeer zu Gute kommt
2. Abschätzung, in welchem Maße das Wattenmeer durch die Sandeinbringungen wächst
3. Prüfung, ob durch die Umlagerungen Bereiche entstehen, an denen Sand für andere Maßnahmen entnommen werden kann
4. Herstellung und Beschreibung des Bezugs zur Strategie Wattenmeer 2100

Dazu werden folgende Systemstudien durchgeführt:

- Es wird eine Sandaufspülung, die an eine reale Maßnahme vor Hörnum vom Sommer 2017 angelehnt ist, gerechnet. Hierzu wird eine zusätzliche Sedimentfraktion verwendet und deren Ausbreitung im Untersuchungsgebiet analysiert (Kapitel 4.2).
- Es werden vier Klimaszenarien gerechnet, die aus der Wattenmeerstrategie 2100 übernommen wurden. Hierbei wurde sowohl der Meeresspiegel als auch die Topographie angepasst (Kapitel 4.3).
- Für die Bereitstellung von Daten an den Projektpartner Bioconsult.SH für die biologische Habitatmodellierung werden zusätzlich die Jahre 2011 bis 2016 gerechnet. Verschiedene Kennwerte werden für die Monate Januar bis Dezember berechnet und dann über die Jahre gemittelt.

## 2.2 Anfangswerte

### 2.2.1 Topographie

Die verwendete Topographie des Modellgebiets der Deutschen Bucht basiert auf den Daten, die im Rahmen des Aufmod-Projekts zusammengestellt wurden (Heyer&Schrottke, 2013). Im Fokusgebiet werden neuere Daten einer konsistenten Bathymetrie 2012 verwendet, die vom LKN.SH im Rahmen des Projekts zur Verfügung gestellt wurden. Die verwendete Topographie des gesamten Modellgebiets ist in Bild 1 zu sehen.

Das Modellgebiet erstreckt sich von Terschelling am südwestlichen Rand bis Hvide Sande am nordöstlichen Rand und umfasst die gesamte Linie der deutschen Nordseeküste. Die drei großen Ästuar Ems, Weser und Elbe sind ohne ihre Nebenflüsse bis zum jeweiligen Wehr im Modell mit abgebildet.

Die Modelltopographie im Fokusgebiet sowie die verwendete Gitterauflösung im höher aufgelösten Bereich um die Hörnum Odde sind in Bild 4 zu sehen. Die hohe räumliche Auflösung in diesem Bereich ist mindestens erforderlich, um die dort stattfindenden Prozesse, vor allem die Wechselwirkung zwischen Seegang, Strömung und Sedimenttransport, detailliert modellieren zu können.

Gut zu erkennen ist zudem die exponierte Lage der westlichen Küste von Sylt, die kaum vor dem eingehenden Seegang geschützt ist. Der Bereich westlich von Amrum weist dagegen flachere Bereiche und vereinzelte Sandbänke im Bereich des Ebbdeltas auf. Das Vortrapptief, das Sylt und Amrum trennt und später im Tidebecken in das Hörnumtief übergeht, weist Tiefen von bis zu 25 m auf. Hier treten auch die größten Strömungsgeschwindigkeiten (s. Kapitel 4.1.2) auf.

Für den Bereich um die Hörnum Odde herum wird eine horizontale Gitterauflösung von 30 m bis 50 m gewählt, um Strukturen wie das Riff-Rinne-System entlang der Westküste abbilden zu können und die komplexen Strömungsverhältnisse in dem Bereich ausreichend genau simulieren zu können. Im restlichen Untersuchungsgebiet wird eine räumliche Auflösung von bis zu einigen hundert Metern verwendet.

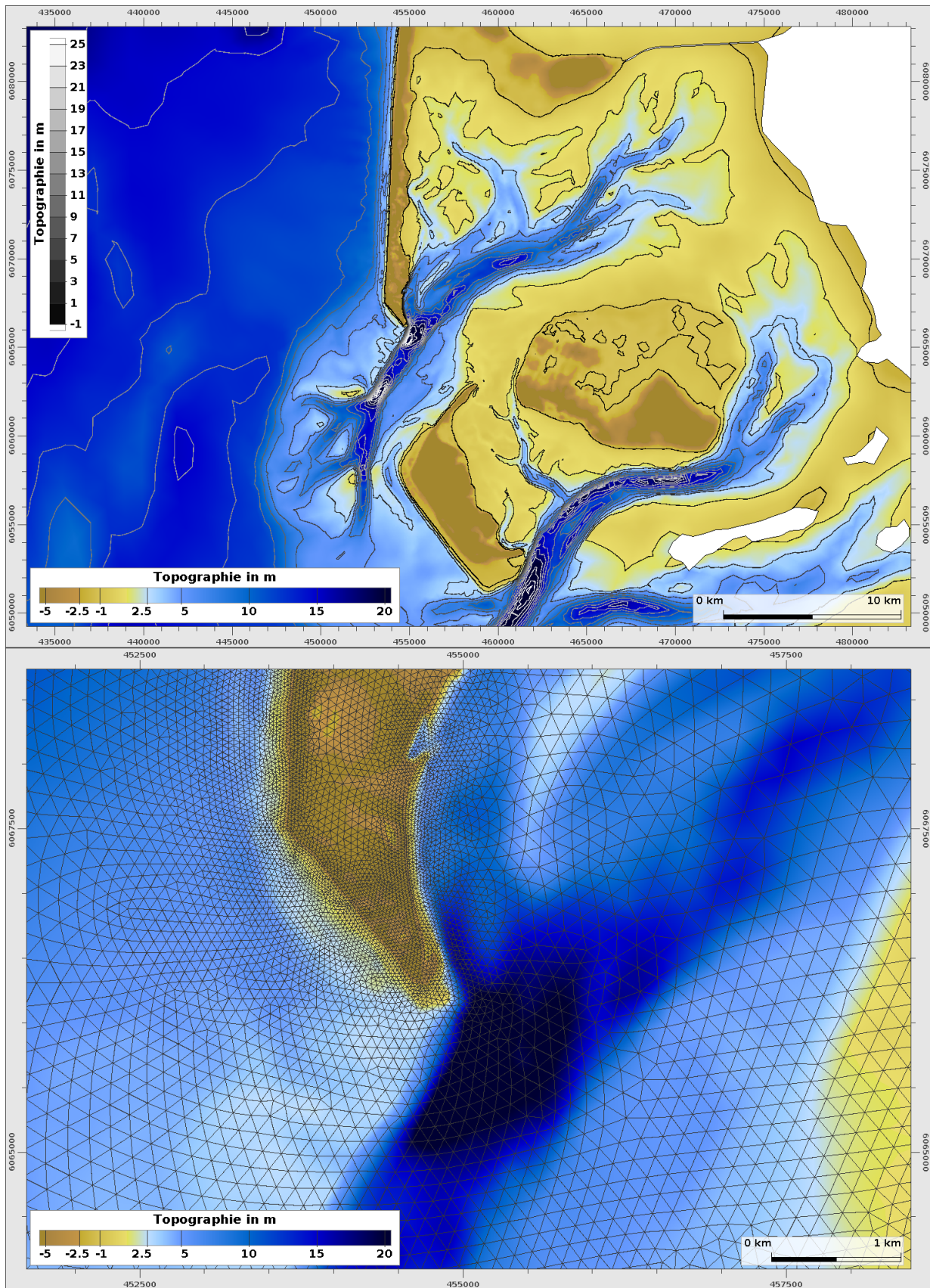
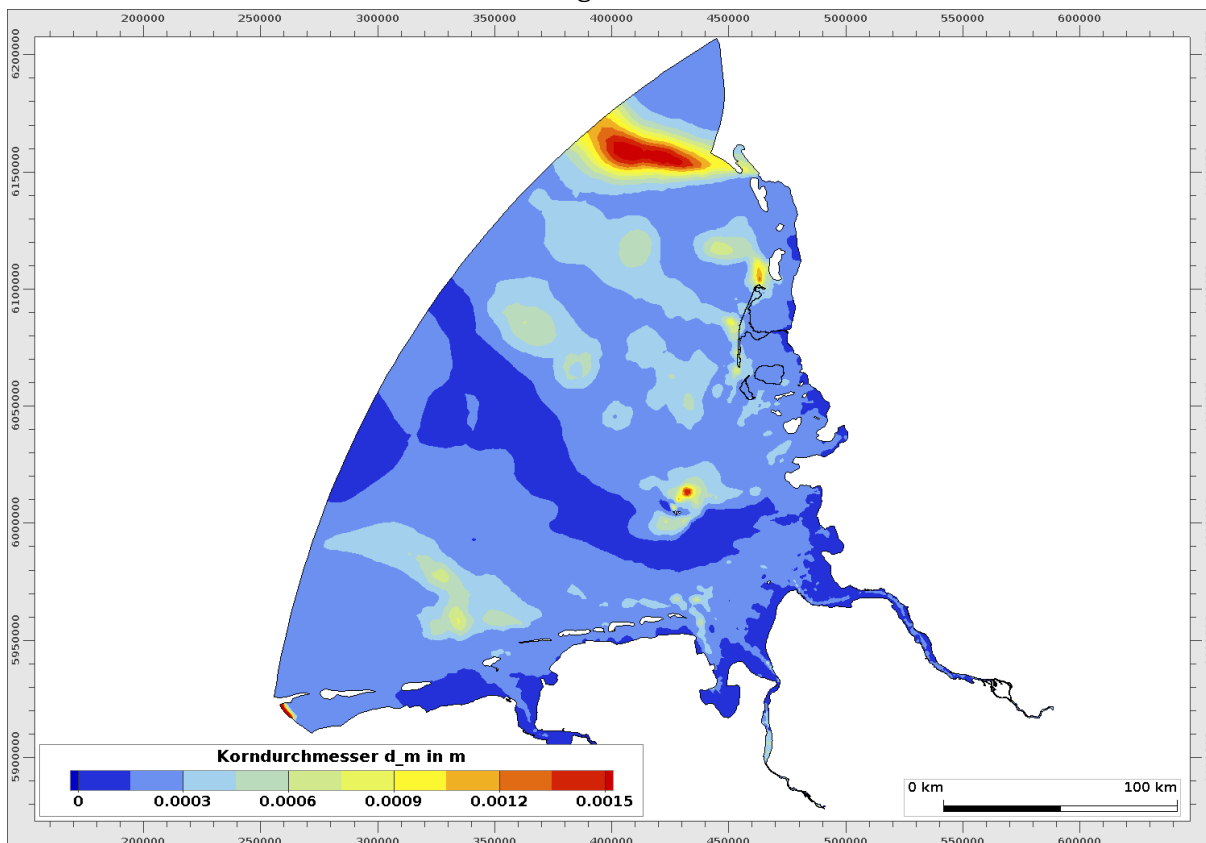


Bild 4: Oben: Topographie im Bereich des Hörnumer Tidebeckens. Unten: Verwendete Gitterauflösung im Bereich der Hörnumer Odde.

## 2.2.2 Sedimentinventar

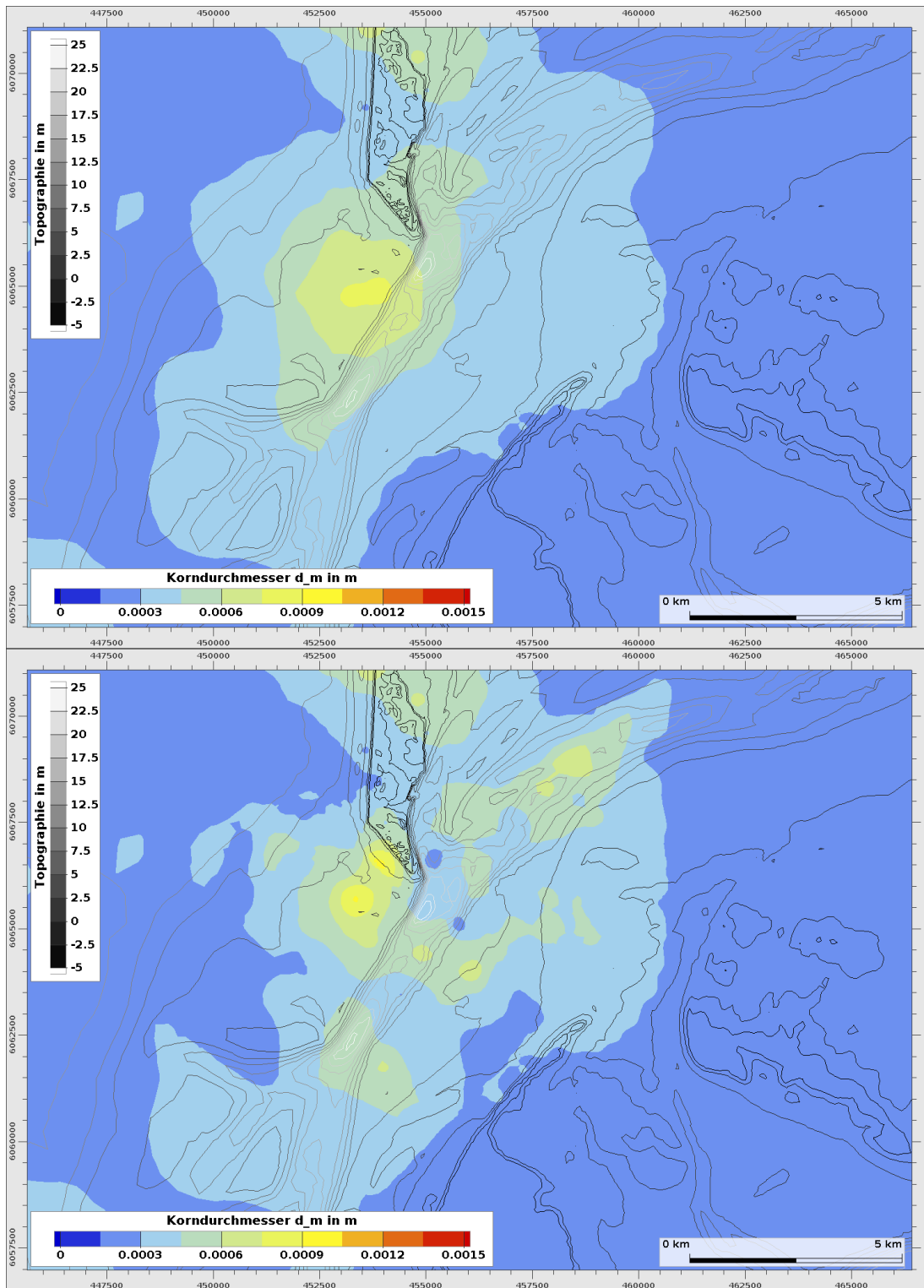
Das als Anfangsbedingung im Modell vorhandene Sedimentinventar wird aus dem funktionalen Bodenmodell generiert, ein Produkt des KFKI-Projektes „AufMod“ (Heyer&Schrottke, 2013). Es werden zehn Fraktionen zur räumlichen Verteilung der Oberflächensedimente des Bodenmodells verwendet. Die Korngrößenklassen werden nach der Udden-Wentworth-Skala beschrieben und erfassen Sedimente von „Very\_Fine\_Silt“ bis „Gravel“ in ihren jeweiligen Anteilen. Das Sedimentinventar ist in Bild 5 anhand des mittleren Korndurchmessers dargestellt.



*Bild 5: Mittlerer Korndurchmesser der Anfangsverteilung des verwendeten Sedimentinventars für das gesamte Modellgebiet.*

Im nördlichen Teil des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeers kommen hauptsächlich die größeren Sedimente vor. Im Hörnumer Tidebecken sind dies hauptsächlich Sedimente der Fein- und Mittelsandfraktionen und im Bereich des Ebbdeltas und der angrenzenden Sande tritt auch vermehrt die Grobsandfraktion auf.

Im Rahmen dieses Projekts werden vom Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Universität Kiel (FTZ) Sedimentproben im Bereich des Vortrapptiefs und auf Theeknobs entnommen. Diese Daten bieten eine höhere räumliche Auflösung als die Informationen des AufMod-Datensatzes und ermöglichen somit ein differenzierteres und aktuelleres Bild der Sedimentverteilung im Fokusgebiet. Die Unterschiede im mittleren Korndurchmesser sind in Bild 6 zu sehen.



*Bild 6: Oben: mittlerer Korndurchmesser im Fokusgebiet mit den Daten aus dem Aufmod-Projekt. Unten: Mittlerer Korndurchmesser im Fokusgebiet mit den neueren Daten vom FTZ.*

Die in diesem Bericht vorgestellten Untersuchungen werden aus zeitlichen Gründen mit dem Sedimentinventar aus dem Aufmod-Projekt durchgeführt, der Datensatz des FTZ kann bei zukünftigen Untersuchungen verwendet werden.

## 2.3 Randwerte

### 2.3.1 Seeseitiger Wasserstand

Die seeseitigen Randwerte des Wasserstands für den Jahreslauf 2010 werden mit dem Nordseemodell der BAW generiert und an mehreren Stützstellen entlang des Modellrandes extrahiert. Bei der Erzeugung der Randwerte wird zusätzlich die Messung an dem Pegel Terschelling Noordzee als Stützpunkt berücksichtigt.

Für die Klimaszenarien sowie die weiteren Jahresläufe zur Bereitstellung der Daten an Bioconsult.SH werden die Randwerte mit dem Dutch Continental Shelf Model DCSMv6FM (Zijl et al., 2013) erzeugt. Dabei handelt es sich um ein 2D-hydrodynamisches Modell, das auf einem unstrukturierten Gitter mit D-Flow FM (Kernkamp et al., 2011) läuft. Das Modellgebiet deckt das gesamte nordwest-europäische Schelf ab. Die verwendete Topographie basiert auf Daten des North-West Shelf Operational Oceanographic Systems ergänzt durch Daten aus der ETOPO2 Datenbank (Zijl et al., 2013).

An der offenen Seegrenze wird das Modell durch die harmonischen Bestandteile der Gezeiten (Partialtiden) gesteuert. Der atmosphärische Antrieb (Wind bei 10 m und atmosphärischer Oberflächendruck) wird unter Verwendung der Reanalysedaten COSMO-REA6 (Bollmeyer et al., 2015) berücksichtigt.

Für die Simulationen mit Meeresspiegelanstieg wird der Meeresspiegel direkt im DCSMv6FM-Modell erhöht. Dies kann dazu führen, dass der Meeresspiegelanstieg in den Randwerten an den Modellgrenzen des Deutsche-Bucht-Modells nicht überall gleich groß ist, sondern es kleinere Abweichungen in der Größenordnung von einigen cm geben kann.

Für die Klimaszenarien werden diese Randwerte gewählt, da diese auch im Expertennetzwerk für die gleichen Varianten eines Anstiegs des Meeresspiegels verwendet werden. Dies ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den beiden Projekten. Für die zusätzlichen Jahre, die für die Datenweitergabe an Bioconsult.SH gerechnet wurden, liegt für diese Zeiträume nur diese Art der Randwerte vor.

### 2.3.2 Wind

Zur Modellsteuerung des Windes werden dieselben Reanalysedaten aus COSMO-REA6 (Bollmeyer et al., 2015) verwendet, die auch in das DCSMv6FM Modell eingehen. Diese beinhalten zeit- und ortsvariable Wind-, Luftdruck- und Temperaturfelder. Diese Daten werden auf das Berechnungsnetz des HN-Modells interpoliert. Der Wind geht als antreibende Kraft sowohl in das HN-Modell als auch in das Seegangmodell ein.

Eine Zeitreihe der Windgeschwindigkeiten an der Station List für das Jahr 2010 ist in Bild 7 zu sehen. Der Zeitraum ab Ende August weist hierbei höhere Windgeschwindigkeiten als die erste Jahreshälfte auf. Die maximal erreichten Werte liegen bei knapp über 20 m/s. Es gibt drei Ereignisse, bei denen solche hohen Windgeschwindigkeiten erreicht werden, die alle im Zeitraum Ende August bis Mitte Dezember liegen. Im restlichen Jahr überschreiten die Windgeschwindigkeiten nur selten 15 m/s.



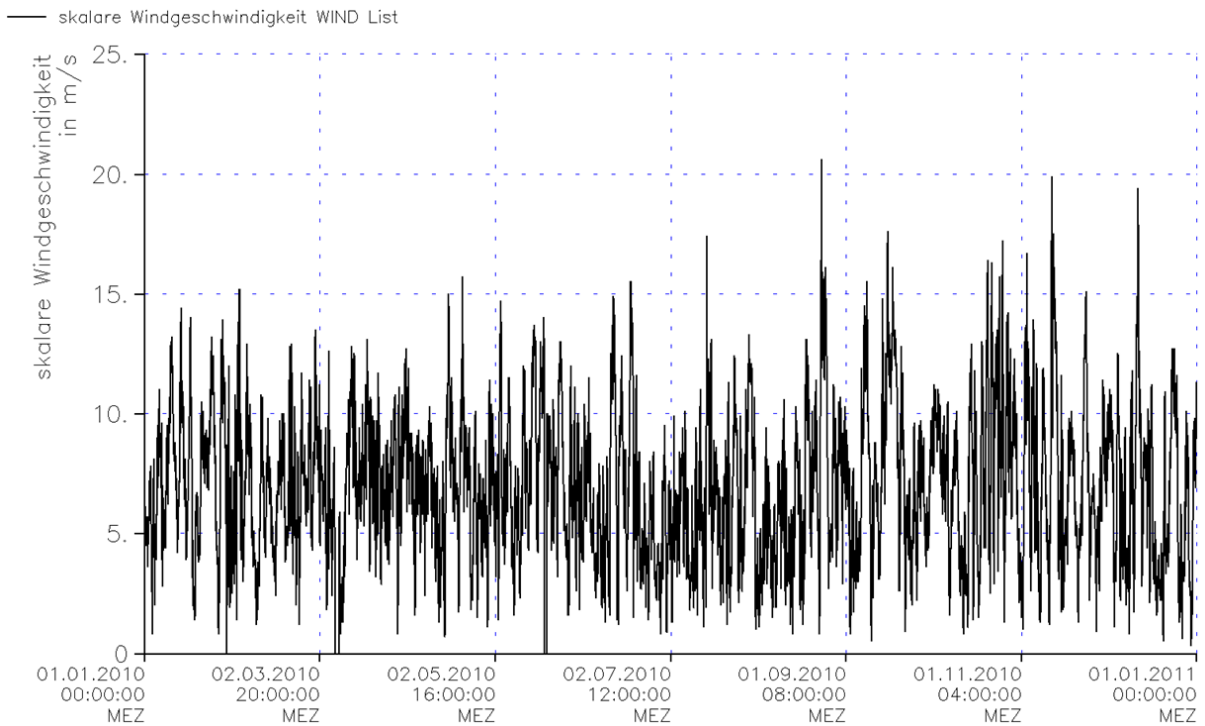


Bild 7: Zeitreihe der gemessenen Windgeschwindigkeit an der Station List für das Jahr 2010.

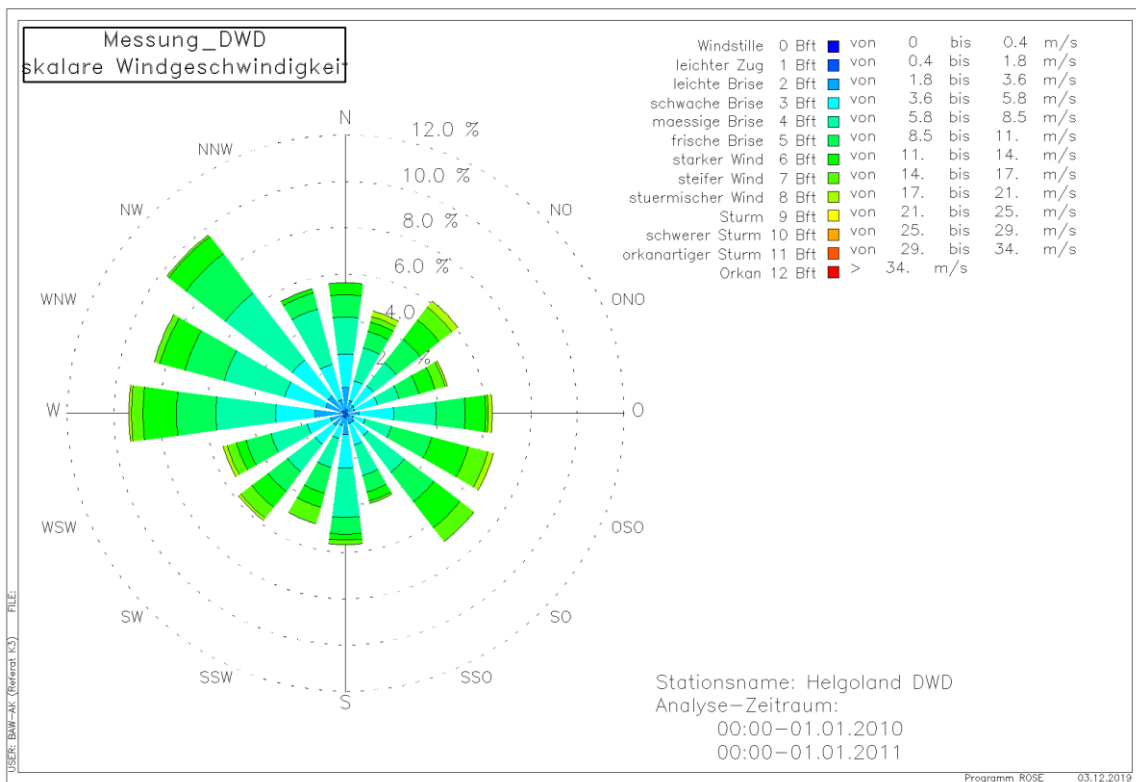


Bild 8: Verteilung und Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten für Jahr 2010 an der Station Helgoland.

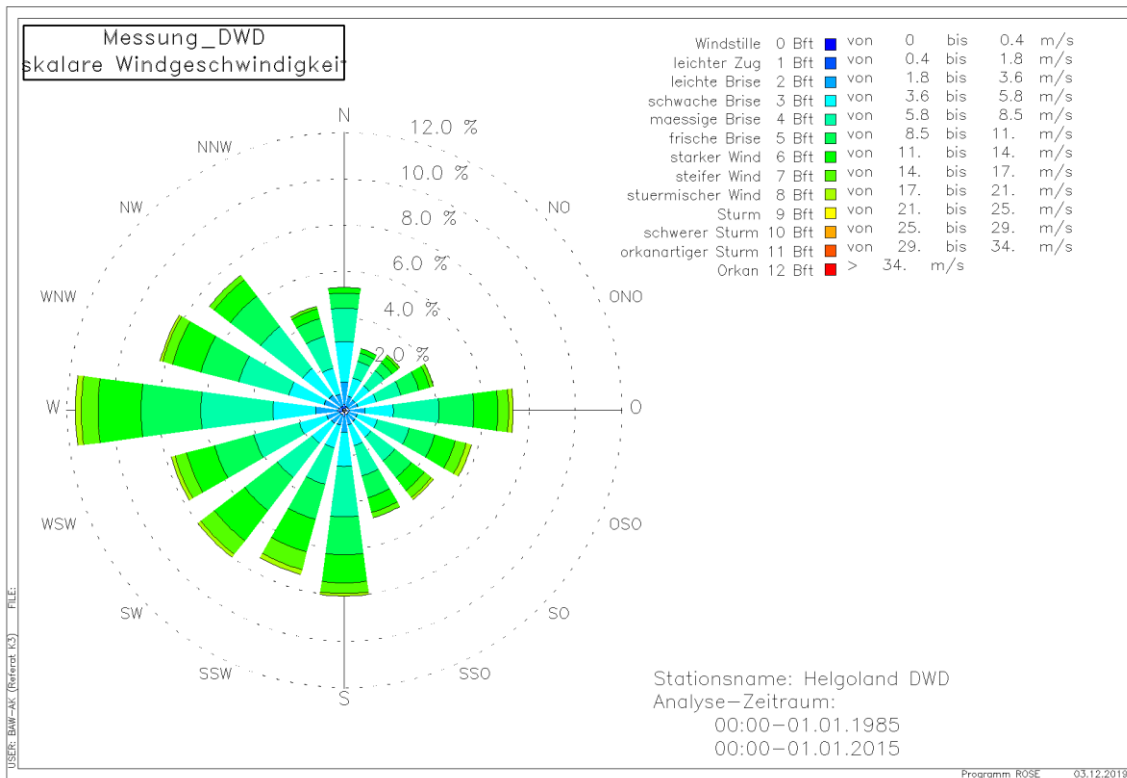


Bild 9: Verteilung und Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten für den Zeitraum 1985 – 2015 an der Station Helgoland.

Im Vergleich mit den jährlichen Mittelwerten zeigt sich, dass das Jahr 2010 verhältnismäßig windarm war (Booß et al, 2011). Im letzten Jahrhundert lässt sich für den geostrophischen Wind in der Deutschen Bucht eine regelmäßige, langfristige Schwankung mit einer Periode von ca. 40 Jahren erkennen. Der Zeitraum 2005 bis 2010 liegt hierbei in einem Minimum. Der mittlere geostrophische Wind für das Jahr 2010 lag bei 9,8 m/s. Im Vergleich dazu kann dieser Wert in Jahren mit stärkerem Wind (wie z. B. im Zeitraum 1990 bis 2000) auch die 12 m/s überschreiten.

Die Station Helgoland liefert am ehesten ein ungestörtes Bild der Windsituation über der deutschen Bucht.

Betrachtet man die Windsituation an dieser Station anhand von Messungen vom DWD für das Jahr 2010 (Bild 8) im Vergleich mit dem Zeitraum 1985 bis 2015 (Bild 9), ist zu erkennen, wie sich sowohl die Windrichtung als auch die Windgeschwindigkeiten für das Jahr 2010 im Vergleich zum langjährigen Mittel im Detail unterscheiden. Für das Jahr 2010 traten im Vergleich zum langjährigen Mittel mehr Windereignisse aus östlicher Richtung auf. Dies gilt vor allem für Ereignisse mit höheren Windgeschwindigkeiten. Die Winde aus westlicher Richtung kamen zudem häufiger aus Nordwest als aus Südwest.

In Tabelle 1 ist die Häufigkeitsverteilung für verschiedene Klassen der Windgeschwindigkeiten näher aufgeschlüsselt. Die niedrigeren Windgeschwindigkeiten für das Jahr 2010 resultieren zum Großteil daher, dass 2,6 % mehr Situationen mit Windgeschwindigkeiten zwischen 5,8 und 8,5 m/s aufgetreten sind und es dafür in den Klassen 8,5 bis 14 m/s insgesamt 2,3 % weniger Windereignisse gab.

*Tabelle 1: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Helgoland im Vergleich für das Jahr 2010 und den Zeitraum 1985 bis 2015 (Abweichungen im kumulativen Anteil von 100 % resultieren aus Rundungsungenauigkeiten in der Ausgabe).*

Windgeschwindigkeit in m/s	Anteil 2010 in %	Anteil 1985 - 2015 in %	Differenz 2010 und 1985-2015	Kumulativer Anteil 2010 in %	Kumulativer Anteil 1985 - 2015 in %
0 - 0,4	0	0,1	-0,1	0	0,1
0,4 - 1,8	2,2	2	0,2	2,2	2,1
1,8 - 3,6	8,7	9,1	-0,4	10,9	11,2
3,6 - 5,8	19,2	18,9	0,3	30,1	30,1
5,8 - 8,5	29,5	26,9	2,6	59,6	57
8,5 - 11	19,7	20,3	-0,6	79,3	77,3
11 - 14	12,9	14,6	-1,7	92,2	91,9
14 - 17	6,1	6	0,1	98,3	97,9
17 - 21	1,7	1,8	-0,1	100	99,7
21 - 25	0,1	0,1	0	100,1	99,8
25 - 29	0	0	0	100,1	99,8
29 - 34	0	0	0	100,1	99,8
> 34	0	0	0	100,1	99,8

Im Jahr 2010 traten zudem mit insgesamt 39,2 % mehr Situationen mit Ostwind auf als im langjährigen Vergleichszeitraum. Für diesen Zeitraum lag der Anteil bei 32,2 %. Vor allem bei den Ereignissen mit Windgeschwindigkeiten größer 11 m/s, wie sie in Bild 10 dargestellt sind, gab es hier deutliche Unterschiede zum langjährigen Mittel. 2010 gab es häufiger starken Wind aus Osten. Die sonst typische Situation für die Deutsche Bucht, dass der Starkwind hauptsächlich aus Südwesten kommt, trat verhältnismäßig selten auf.

Gerade mit Bezug auf die Häufigkeit von starken Ostwinden im Bereich der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste ist es aber auch sinnvoll, sich die Situation an der Station List am nördlichen Ende von Sylt zu betrachten. Dies ist in Bild 11 zu sehen. Durch die Nähe zum Festland mit seiner bremsenden Wirkung auf den Wind treten hier generell nur sehr selten hohe Windgeschwindigkeiten aus östlicher Richtung auf. Für die Tidebecken entlang der Nordseeküste spielen somit hauptsächlich Winde aus westlicher Richtung eine Rolle.

Sowohl für die Station Helgoland als auch für die Station List ist für das Jahr 2010 zu beobachten, dass im Vergleich mit dem Zeitraum 1985 bis 2015 verhältnismäßig wenige Starkwindereignisse aus südwestlicher Richtung auftreten.

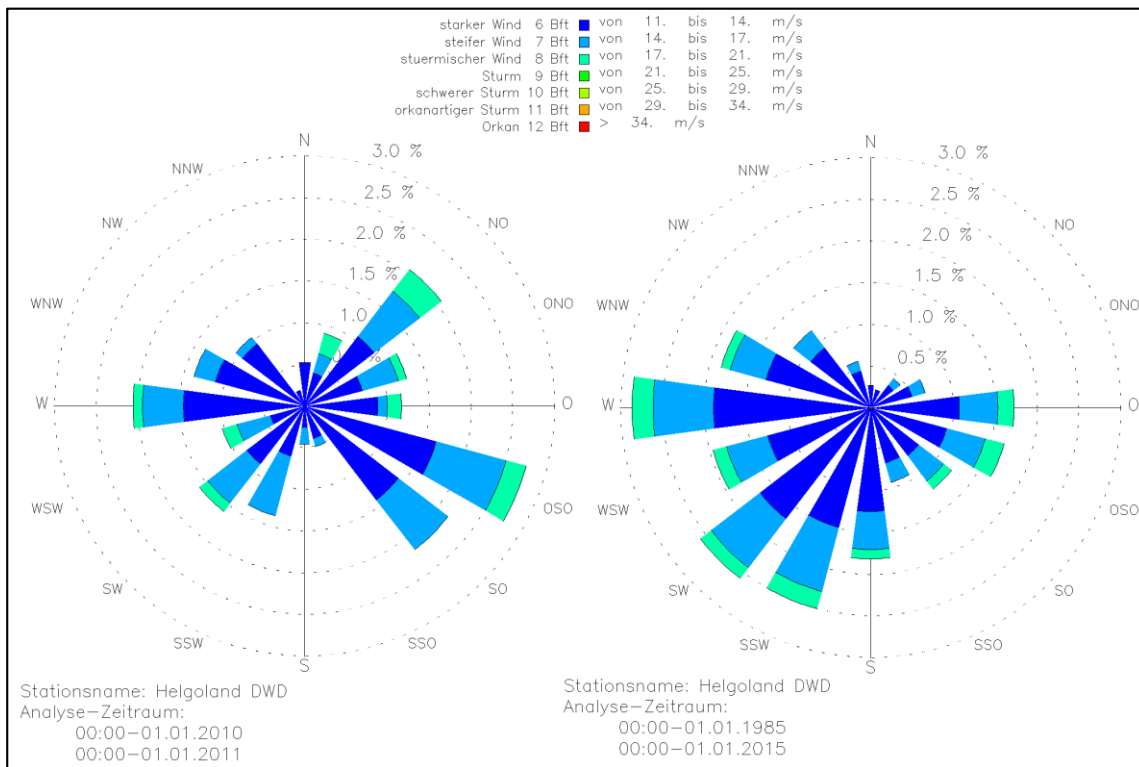


Bild 10: Vergleich der Ereignisse mit Windgeschwindigkeiten > 11 m/s an der Station Helgoland für das Jahr 2010 (links) und den Zeitraum 1985 – 2015 (rechts).

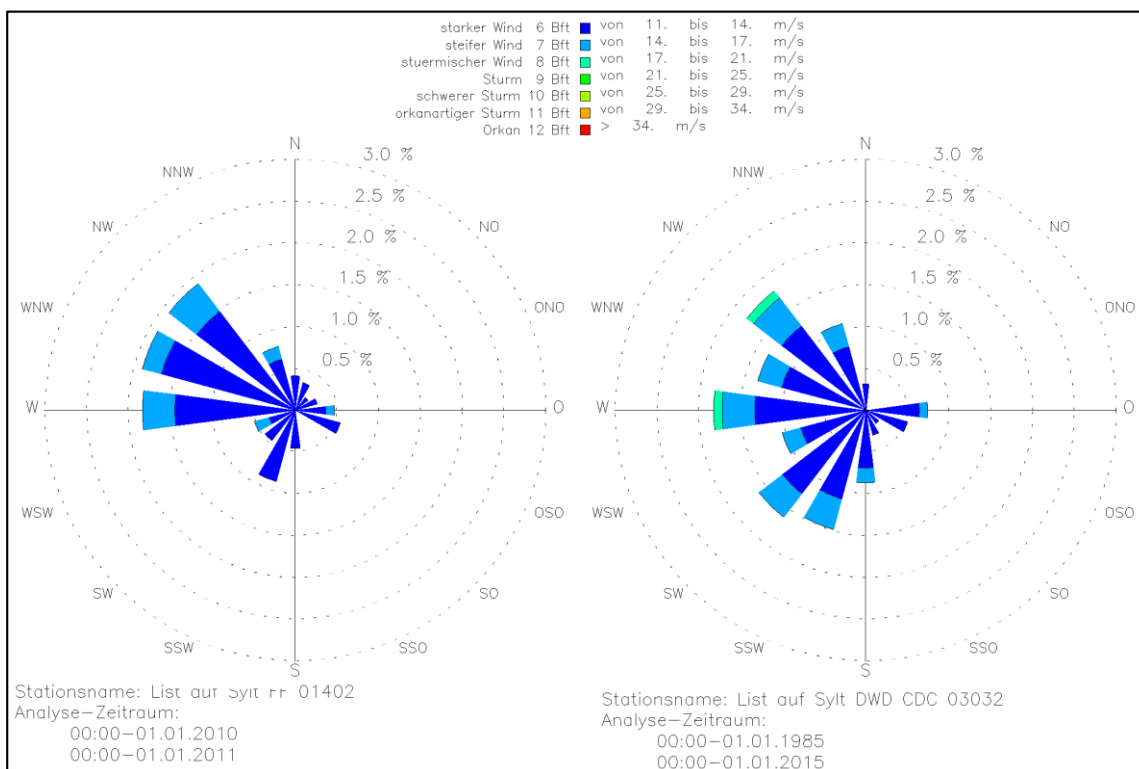


Bild 11: Vergleich der Ereignisse mit Windgeschwindigkeiten > 11 m/s an der Station List für das Jahr 2010 (links) und den Zeitraum 1985 – 2015 (rechts).

### 2.3.3 Oberwasserzufluss

Für das Jahr 2010 werden für die Ästuarie Elbe, Weser und Ems die Tageswerte der jeweiligen Pegel verwendet. Für die Elbe ist das Geesthacht, für die Weser Hemelingen und für die Ems Herbrum. Bild 12 zeigt den Verlauf für das Jahr 2010. Für die Jahre 2011 bis 2016 werden die in Tabelle 2 gezeigten konstanten Werte des mittleren Abflusses aus den Gewässerkundlichen Jahrbüchern verwendet.

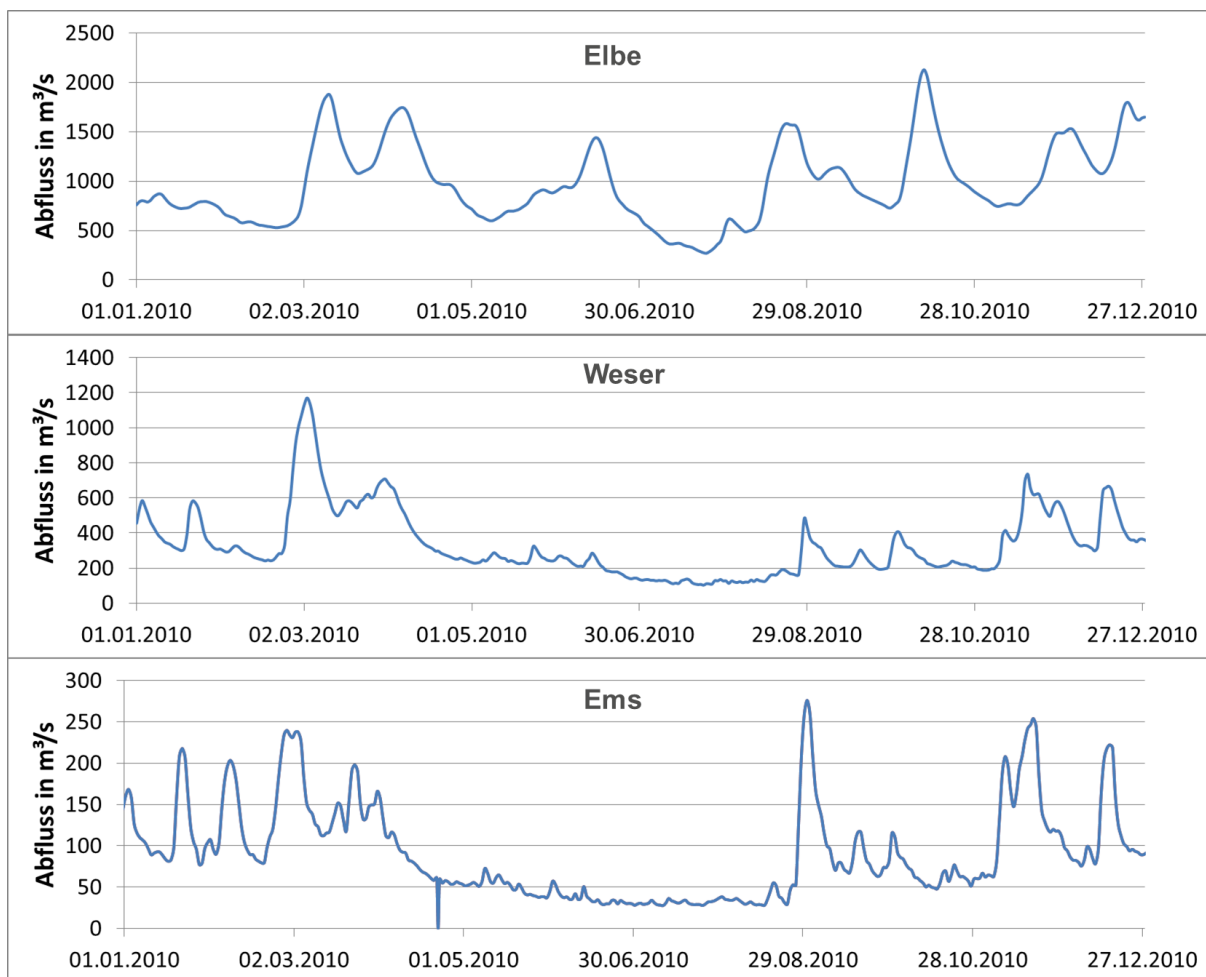


Bild 12: Zeitreihen des Oberwasserabflusses für die Elbe bei Geesthacht (oben), die Weser bei Hemelingen (mitte) und die Ems bei Herbrum (unten) für das Jahr 2010.

Tabelle 2: Mittlerer Abfluss für die Ästuarie Elbe, Weser und Ems in  $m^3/s$ .

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>Elbe</b>	886	955	635	960	498	481	486
<b>Weser</b>	317	302	234	297	214	250	243
<b>Ems</b>	80	76	66	59	59	83	83

### 3 Methode

#### 3.1 Mathematische Simulationsverfahren

Die Prognose der Wirkung baulicher Veränderungen auf die Tidedynamik und den Transport ist nach dem Stand von Technik und Wissenschaft mit wasserbaulichen Systemanalysen unter Zuhilfenahme einer dreidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellierung möglich. Um alle relevanten Prozesse abzubilden, werden drei Verfahren zur Berechnung der Hydrodynamik, der Morphodynamik und des Seegangs gekoppelt miteinander verwendet.

Bild 13 zeigt die wesentlichen natürlichen Prozesse, die den Modelluntersuchungen zugrunde gelegt sind, in grafischer Form. Das verwendete 3D HN-Modell bildet diese physikalischen Prozesse mit der Kombination der numerischen Verfahren UnTrim für den Wasserkörper, SediMorph für die Gewässer- und Seegrundsohle und dem K-Modell für den Seegang dreidimensional ab.

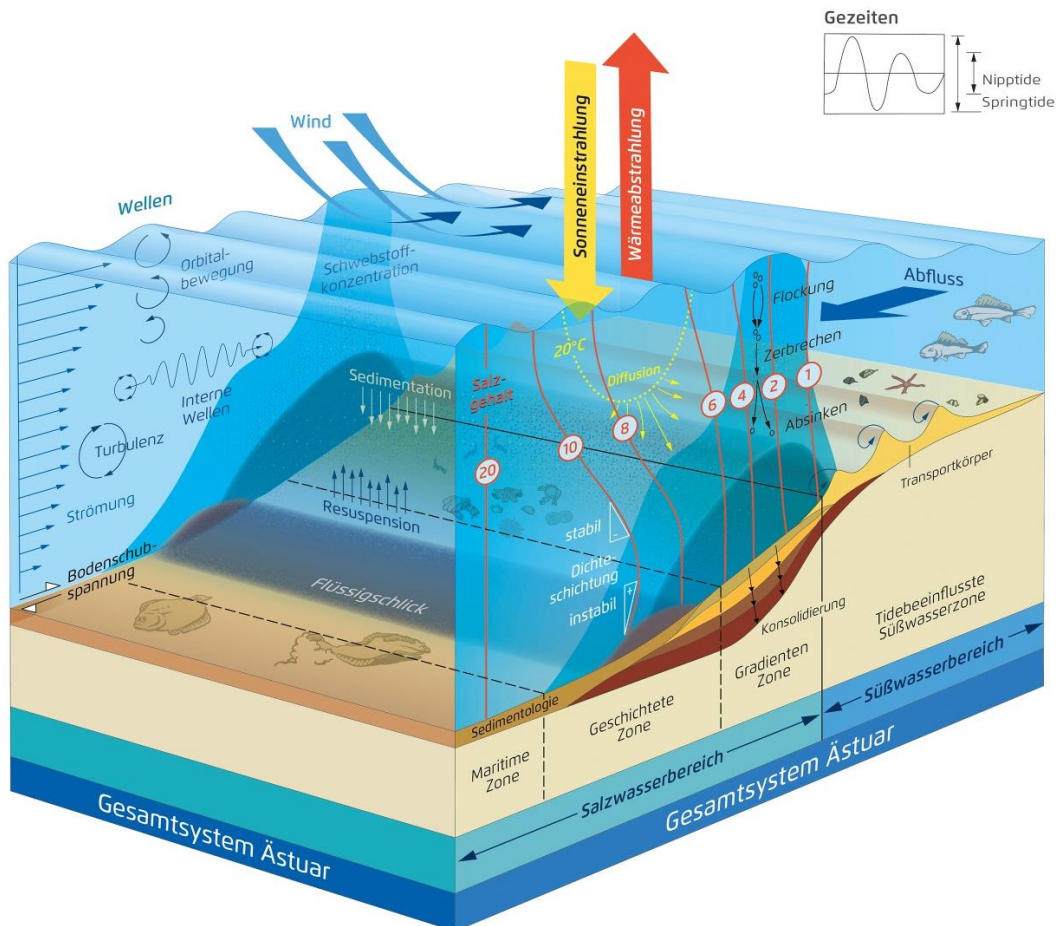


Bild 13: Im Modell berücksichtigte natürliche Prozesse.

##### 3.1.1 UnTrim

Bei dem mathematischen Verfahren UnTrim handelt es sich um eine Entwicklung, die von Prof. Vincenzo Casulli (Universität Trient, Italien) durchgeführt wurde. UnTrim ist ein semi-implizites Finite

- Differenzen (-Volumen) Verfahren zur numerischen Lösung der dreidimensionalen Flachwassergleichungen sowie der dreidimensionalen Transportgleichung für Salz, Wärme, Schwebstoffe sowie suspendierte Sedimente. UnTrim arbeitet auf einem unstrukturierten, orthogonalen Gitter (UOG). Hierbei wird das Lösungsgebiet von einer endlichen Anzahl konvexer Polygone (Dreiecke, Vierecke) überlappungsfrei überdeckt.

Die folgenden physikalischen Prozesse werden in dem mathematischen Modell zur Berechnung der Hydrodynamik und des Transports gelöster Stoffe berücksichtigt:

- reynoldsgemittelte Navier - Stokes - Gleichung (RANS)
- lokale Beschleunigung (Massenträgheit)
- advektive Beschleunigung
- Coriolisbeschleunigung
- barotroper Druckgradient
- barokliner Druckgradient
- hydrostatische oder nicht-hydrostatische Druckverteilung
- horizontale turbulente Viskosität (lokal isotrop, zeit- und ortsvariabel)
- turbulente Viskosität in Vertikalrichtung unter Berücksichtigung der vertikalen Dichteschichtung
- Bodenreibung
- Impulseintrag durch den Wind
- Quellen und Senken (Zu- und Abflüsse)
- Transport konservativer Tracer
- advektiver Transport durch die Strömung
- horizontale turbulente Diffusivität (lokal isotrop, zeit- und ortsvariabel)
- turbulente Diffusivität in Vertikalrichtung unter Berücksichtigung der vertikalen Dichteschichtung
- rheologische Viskosität

Folgende Berechnungsergebnisse werden durch das mathematische Modell an den diskreten Berechnungspunkten geliefert:

- Wasserspiegelauslenkung der freien Oberfläche
- Strömungsgeschwindigkeit
- Tracerkonzentration (Salzgehalt, Temperatur, Schwebstoff, ...)
- Turbulenz
- Dichte
- Ggfls. hydrodynamischer Druck

Dabei liegen die skalaren Größen (Wasserstand, Konzentration usw.) in den Zentrumspunkten und die vektoriellen Größen (Geschwindigkeit) auf den Mitten der Polygonränder vor. Den Veröffentlichungen von Casulli et. al. 1998 bis 2005 können Details zu dem mathematischen Modellverfahren *UnTrim* ent-

nommen werden (Casulli und Walters 2000; Casulli und Zanolli 2002; Casulli 1999; Casulli, V. and Zanolli, P. 1998; Casulli und Zanolli 2005).

### 3.1.2 SediMorph

Das Verfahren SediMorph ist eine Eigenentwicklung der Bundesanstalt für Wasserbau zur Simulation von dreidimensionalen sedimentologischen Prozessen an der Gewässersohle. Hierzu werden Massenbewegungen infolge Geschiebe- und Suspensionstransport der einzelnen Kornfraktionen bilanziert. Aus diesen Sedimentströmen werden die Veränderungen der Sohlhöhe bestimmt. Auch die Beschreibung des Aufbaus und der Veränderung der Zusammensetzung des Bodens, d.h. die Verwaltung des Sedimentinventars und die Entstehung von Sohlformen sind innerhalb des Moduls SediMorph realisiert. Ferner wird der fraktionierte Geschiebetransport berechnet. Auch das Verfahren SediMorph arbeitet auf unstrukturierten orthogonalen Gittern.

Folgende Größen und Prozesse können von dem Modellverfahren berechnet und berücksichtigt werden:

- veränderliche Kornzusammensetzungen an der Gewässersohle
- Prädiktion von Sohlformen wie Riffel und Dünen
- Sohlrauheit, welche sich aus der räumlich und zeitlich veränderlichen Verteilung der Kornzusammensetzung und Formenvielfalt an der Sohle ergibt
- Sohlschubspannungen infolge der Strömung
- Sohlschubspannungen infolge des Seegangs
- Erosionsraten für die als Schwebstoff transportierten Sedimentfraktionen
- Berechnung des fraktionierten Geschiebetransports
- Kombination von Geschiebe- und Schwebstofftransport für (fein-)sandige Fraktionen
- Hiding/Exposure-Funktionen
- Berechnung der Morphodynamik (zeitlich und räumlich veränderliche Wassertiefen) infolge Geschiebe- und Schwebstofftransport

Die bereitgestellten Berechnungsergebnisse beinhalten:

- Verteilung der einzelnen Sedimentfraktionen
  - prozentual, oder
  - als Masse in  $\text{kg/m}^2$ .
- mittlerer Korndurchmesser
- Sohlrauheit
- Bodenschubspannung
- Porenwasser
- Dünenhöhe und -länge
- Riffelhöhe und -länge
- Transportkapazitäten der einzelnen Fraktionen
- Transportraten der einzelnen Fraktionen
- Erosionsraten der einzelnen Fraktionen



- Depositionsraten der einzelnen Fraktionen
- integrale Massenflüsse

### 3.1.3 K-Modell

Das Verfahren K-Modell, ein spektrales Seegangmodell mit nicht-linearer Dissipation, ist eine Entwicklung des Helmholtz-Zentrum Geesthacht (Schneeggenburger 1998). Es berechnet die Entstehung, Ausbreitung und Dissipation von Seegang im Ozean und in Küstengewässern. Das K-Modell arbeitet in der von der BAW verwendeten Variante ebenfalls auf einem unstrukturierten orthogonalen Gittern, das unabhängig von dem des hydrodynamischen Modells gewählt werden kann.

Folgende physikalische Prozesse werden berücksichtigt:

- Erhaltung der Aktionsdichte (action density) der Wellen
- Advektiver Transport der Aktionsdichte der Wellen durch die Strömung
- Aufsteilen der Wellen (shoaling) bei Änderung der Wassertiefe und/oder der Strömungsgeschwindigkeit
- Refraktion der Wellen infolge horizontaler Gradienten der Wassertiefe und/oder der Strömungsgeschwindigkeit
- Energieeintrag durch Wind an der Wasseroberfläche
- Energieverluste durch turbulente Diffusion
- Energieverluste durch Reibung an der Gewässersohle

Folgende integrale Seegangsparameter für Seegang, Windsee und Dünung werden vom Modell als Ergebnisse bereitgestellt:

- signifikante Wellenhöhe
- Peak-Periode der Wellen
- mittlere Periode der Wellen
- mittlere Richtung der Wellenausbreitung
- mittlere Streuung (spread) der Wellenausbreitung
- Beschleunigung (durch Radiation Stress)

Der Einfluss des Seegangs auf den Sedimenttransport wird an zwei Stellen berücksichtigt. Die Radiation Stresses wirken in der Hydrodynamik als Impulsquelle auf die Strömungsgeschwindigkeiten und können diese sowohl in der Stärke als auch in ihrer Richtung verändern. Darüber hinaus wird auch ein seegangsinduzierter Anteil der Bodenschubspannung bestimmt, in dessen Berechnung verschiedene Parameter des Seegangs wie z.B. die Wellenhöhe und -periode einfließen.

## 3.2 Analyse und Bewertung

Die Rechenwerte aus der Modellsimulation und -analyse bedürfen grundsätzlich der fachwissenschaftlichen Interpretation, um fundierte Aussagen über die Entwicklung des Untersuchungsgebiets abzugeben. Die Berechnungsergebnisse sind somit nicht die alleinige Grundlage der gutachterlichen

Aussagen, weil sowohl die gewässerkundlichen Erkenntnisse über das Untersuchungsgebiet als auch die methodenspezifischen Erfahrungen des Gutachters mit in die Bewertung einfließen müssen.

Aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen können neben synoptischen Darstellungen grundsätzlich eine Vielzahl tideabhängiger und tideunabhängiger Kennwerte der Wasserstände, der Strömung, des Seegangs und des Sedimenttransports errechnet werden, um das System zu beschreiben und die Wirkungen einer Maßnahme zu quantifizieren. Für die Analysen eines Nipp-Spring-Zyklus wurde der Zeitraum vom 06.07.2010 um 18:00 Uhr bis zum 21.07.2010 um 14:00 Uhr ausgewählt. Zusätzlich werden einige Analysen auch für das gesamte Jahr 2010 durchgeführt.

Der Zeitraum des Nipp-Spring-Zyklus wurde in Abstimmung mit anderen Projekten gewählt. Dies ermöglicht einen zusätzlichen Wissenstransfer zwischen den Projekten. Es handelt sich um einen Zeitraum, in dem verhältnismäßig niedrige Windgeschwindigkeiten auftreten, wie Bild 14 zu entnehmen ist.



*Bild 14: Gemessene Windgeschwindigkeit in m/s an der Station List für den Zeitraum des analysierten Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010.*

Die Analyseverfahren und –parameter sind ausführlich auf den Internetseiten der BAW dokumentiert, siehe [http://wiki.baw.de/de/index.php/Analyse\\_der\\_Berechnungsergebnisse](http://wiki.baw.de/de/index.php/Analyse_der_Berechnungsergebnisse).

Motiviert durch die Fragestellungen des Sedimentmanagements werden weitere Analysemöglichkeiten geschaffen, die präzise quantitative Aussagen für bestimmte Bilanzräume ermöglichen. Eine dafür notwendige Weiterentwicklung der Simulationssoftware ist die Möglichkeit, während der Simulation in jedem (Sub-) Zeitschritt an jeder Stelle der Topologie die exakten Mengen berechnen und bilanzieren zu können. Das ist ein signifikanter Unterschied zu dem Vorgehen bei einer Tidekennwertanalyse, bei dem z.B. alle 10 Minuten ein synoptischer Datensatz geschrieben wird, der im Post-Processingent-

sprechend ausgewertet wird. Bei einem synoptischen Datensatz ist der Systemzustand nur zu genau diesem Zeitpunkt bekannt.

Die exakten Transporte werden dazu in eine CF-netCDF-Datei<sup>2</sup> geschrieben. Eine Auswertung der Modellergebnisse in Form einer Tidekennwertanalyse kann nach wie vor durchgeführt werden. Eine weitere wichtige Methode ist jedoch eine Bilanzierung des Transportes in interessierenden geographischen Bereichen, z.B. Naturschutzgebieten. Die interessierenden Kompartimente sind frei wählbar. Im Post-Processing werden die Transporte innerhalb und zwischen den Kompartimenten aggregiert, so dass letztlich exakte Bilanzen berechnet werden können. Auf diese Weise kann z.B. die zeitliche Entwicklung der Akkumulation einzelner Sedimentfraktionen in dem Bilanzraum dargestellt werden.

Kennwertanalysen geben Hinweise auf die relevanten Kräfte, die für den Sedimenttransport von Bedeutung sind und in welchen Bereichen bestimmte Prozesse dominieren (Kapitel 4.1.1 bis Kapitel 4.1.4). Diese Erkenntnisse sind notwendig, um die synoptischen Ergebnisse zur morphodynamischen Entwicklung des Untersuchungsgebiets interpretieren und bewerten zu können (Kapitel 4.1.5). Darüber hinaus werden mehrere morphologische Einheiten (Bilanzräume) abgestimmt, in denen ausgewählte Modelldaten aggregiert werden, um sie einer vereinfachten quantitativen Bewertung zugänglich zu machen (Kapitel 4.1.6). Zum einen werden hier die Bilanzräume des LKN.SH verwendet, die in Bild 15 dargestellt sind. Zum anderen werden auch neue Bilanzräume erstellt, die im Fokusgebiet eine detaillierte Betrachtung der Bewegung von Sedimenten erlauben. Diese sind in Bild 16 abgebildet.

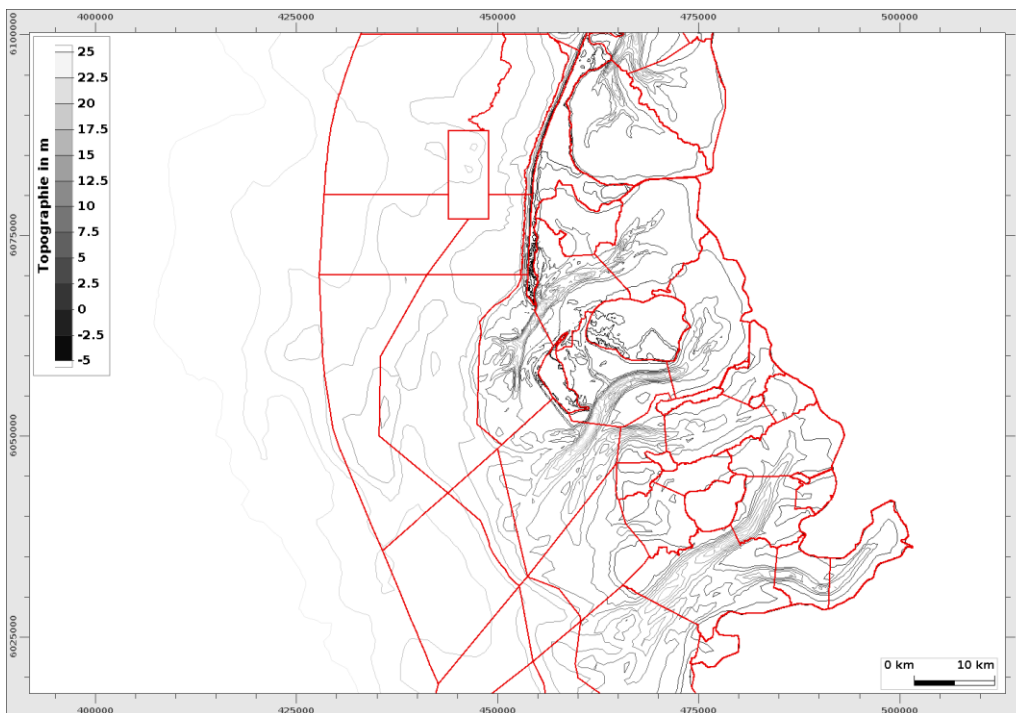
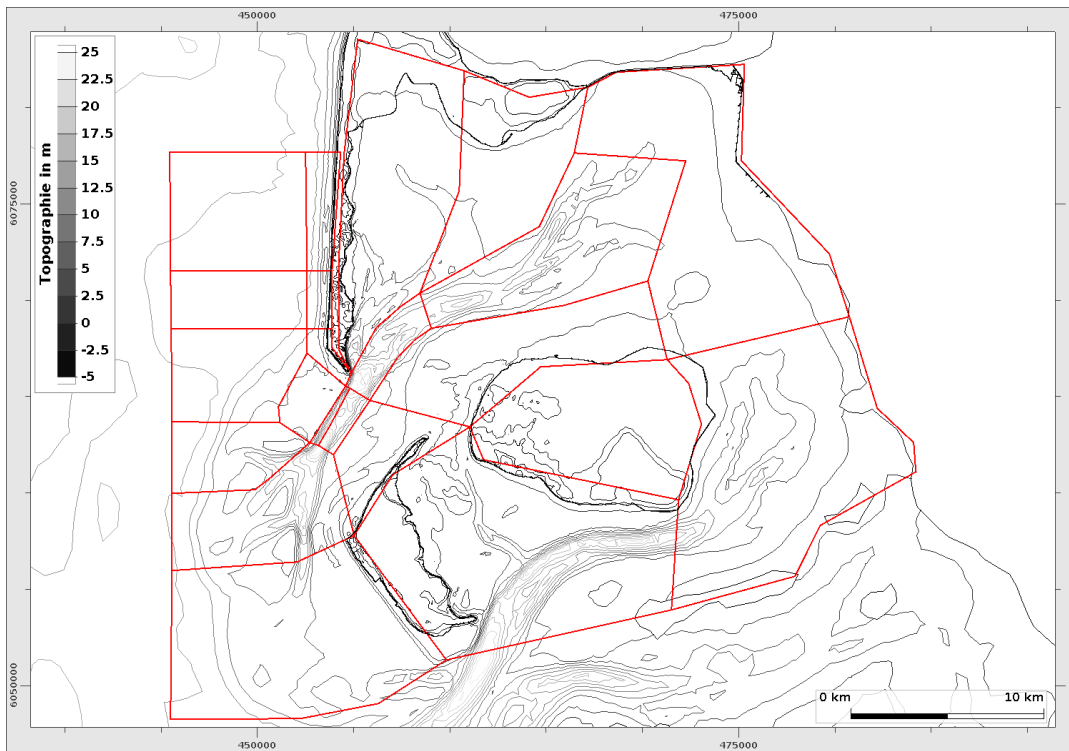


Bild 15: Bilanzierungspolygone des LKN entlang der schleswig-holsteinischen Nordseeküste.

2 This project took advantage of netCDF software developed by UCAR/Unidata.



*Bild 16: Bilanzierungspolygone für das Hörnumer Tidebecken.*

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Beschreibung des Referenzzustands

#### 4.1.1 Wasserstand

Zur Bestimmung der Güte des Modells eignet sich als erstes ein Vergleich der berechneten Zeitreihen des Wasserstands mit Messungen an Pegeln entlang der Deutschen Bucht. Exemplarisch ist dieser Vergleich für die Pegel Terschelling am südöstlichen Rand des Modellgebiets (Bild 17), Helgoland in der Mitte des Modellgebiets (Bild 18) und Hörnum-Hafen an der Westküste von Sylt im Fokusgebiet (Bild 19) dargestellt.

In den Zeitreihen ist eine gewisse Abweichung der Modellergebnisse zu den Messungen sowohl in der Amplitude als auch in der Phase zu erkennen. Im Untersuchungsgebiet ist der Tidenhub im Modell etwas geringer. In Tabelle 3 und Tabelle 4 ist dieser Effekt für den Pegel Hörnum-Hafen anhand von Tidekennwerten des Wasserstands für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli und für das gesamte Jahr 2010 aufgeführt. Im Modell ist der Tidenhub sowohl für den ausgewählten Nipp-Spring-Zyklus als auch für das gesamte Jahr um etwa 15 cm niedriger als in den Messungen. Hierbei sind die Differenzen vor allem im Jahresmittel beim Tideniedrigwasser größer als beim Tidehochwasser.

Diese Differenzen sind etwas größer als in vergleichbaren Küstenmodellen der BAW. Grund hierfür ist eine unterschiedliche Herangehensweise bei der Beschreibung der effektiven Sohlrauheit. Für diese Studien wird die effektive Sohlrauheit einzig aus der Zusammensetzung des Sedimentinventars bestimmt. Sowohl die Rauheitswirkung des Sedimentkorns als auch die weitaus größere Rauheitswirkung von Sohlformen wird über einen Prädiktor berücksichtigt. Dieser Ansatz wird für diese Untersuchungen gewählt, damit das Modell in der Lage ist, bei Simulationen längerer Zeiträume dynamisch auf veränderte Bedingungen in der Morphologie zu reagieren.

Die Auswirkungen dieser Abweichungen auf die vom Modell berechnete Morphodynamik können als gering eingeschätzt werden. Als wesentlich bedeutsamer ist beim Modellaufbau die Kopplung mit dem Seegangmodell anzusehen. Kapitel 4.1.4 zeigt deutlich die im Vergleich zur Tide stärkere Wirkung des Seegangs auf den Sedimenttransport.

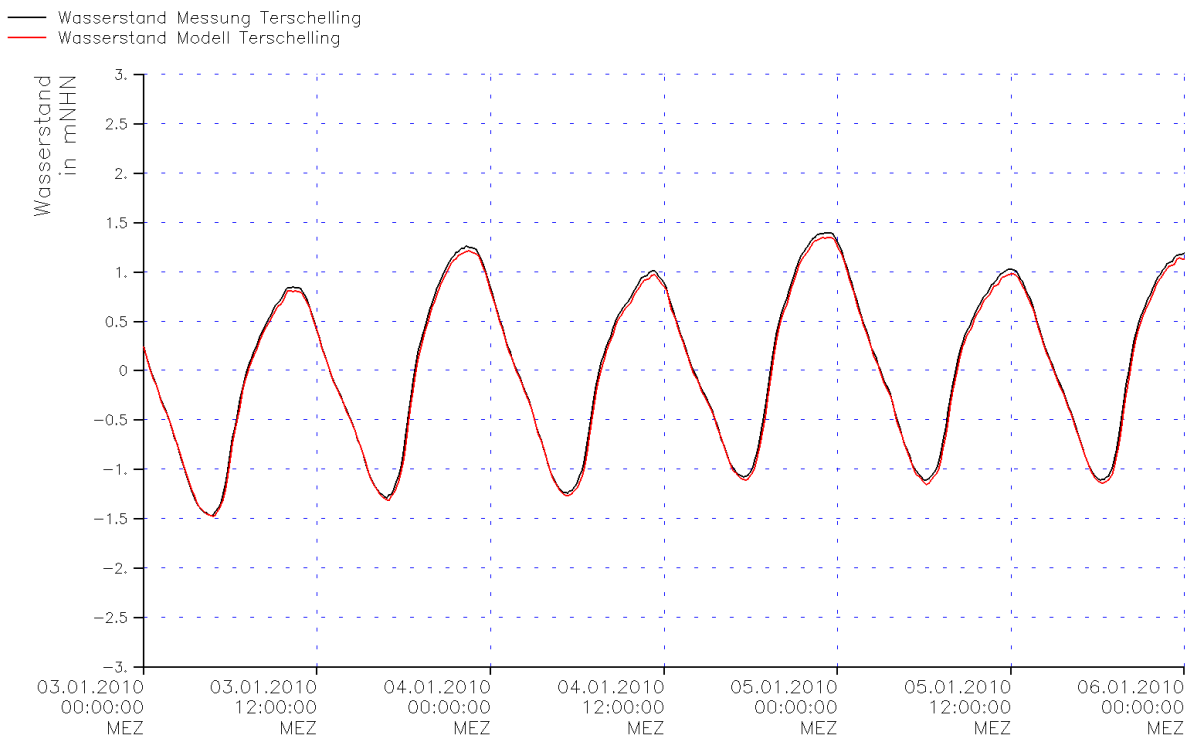


Bild 17: Vergleich des gemessenen und modellierten Wasserstands am Pegel Terschelling.

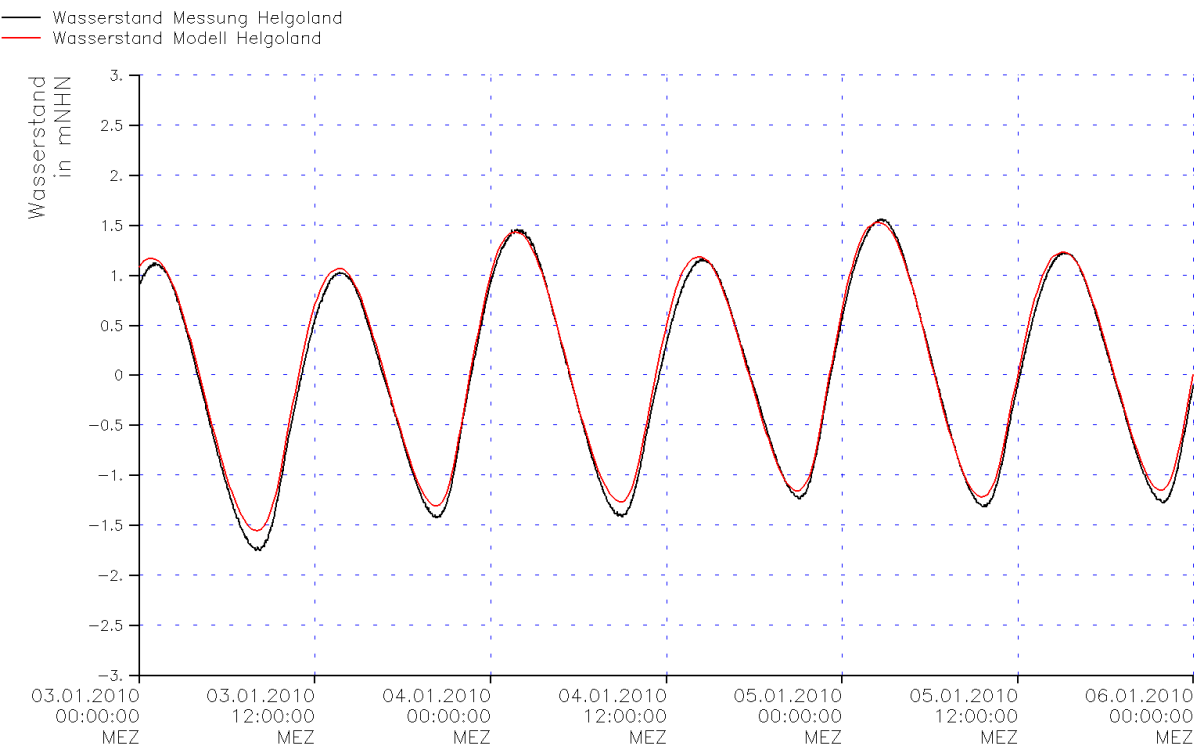


Bild 18: Vergleich des gemessenen und modellierten Wasserstands am Pegel Helgoland.

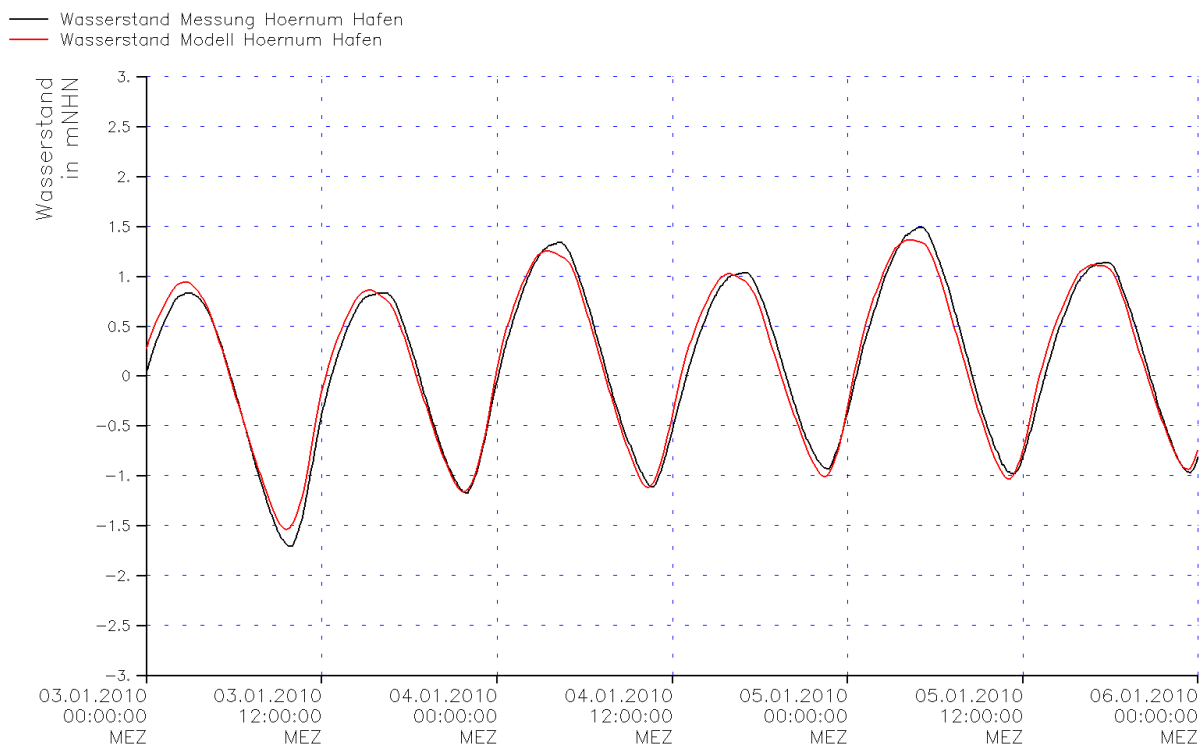


Bild 19: Vergleich des gemessenen und modellierten Wasserstands am Pegel Hörnum Hafen.

Tabelle 3: Vergleich verschiedener mittlerer Tidekennwerte des Wasserstands zwischen Modell und Messung am Pegel Hörnum-Hafen für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010.

	Tidenhub in m	Tideniedrigwasser in m	Tidehochwasser in m
Messung	2,20	-1,16	1,03
Modell	2,03	-1,07	0,95

Tabelle 4: Vergleich verschiedener mittlerer Tidekennwerte des Wasserstands zwischen Modell und Messung am Pegel Hörnum-Hafen für das gesamte Jahr 2010.

	Tidenhub in m	Tideniedrigwasser in m	Tidehochwasser in m
Messung	2,08	-1,11	0,97
Modell	1,94	-0,99	0,94

Am Pegel Helgoland zeigt das Modell tendenziell das gleiche Verhalten, wie in Tabelle 5 zu sehen ist. Das mittlere Tidehochwasser für das Jahr 2010 wird mit einer Differenz von 6 cm gut getroffen. Beim Tideniedrigwasser sind die Unterschiede mit 14 cm größer.

*Tabelle 5: Vergleich verschiedener Tidekennwerte des Wasserstands am Pegel Helgoland für das Jahr 2010 zwischen Modell und Messung und den Messungen von 2006 – 2014.*

	Tidenhub in m	Tideniedrigwasser in m	Tidehochwasser in m
Messung 2010	2,39	-1,25	1,14
Modell 2010	2,19	-1,11	1,08
Messung 2006	2,34	-1,17	1,18
Messung 2007	2,35	-1,11	1,23
Messung 2008	2,34	-1,13	1,20
Messung 2009	2,33	-1,17	1,15
Messung 2010	2,39	-1,25	1,14
Messung 2011	2,36	-1,17	1,18
Messung 2012	2,37	-1,21	1,16
Messung 2013	2,35	-1,23	1,12
Messung 2014	2,39	-1,22	1,17
Messung 2006-2014	2,36	-1,19	1,17

Zusätzlich werden für diesen Pegel die Tidekennwerte der Messungen des Zeitraums 2006 bis 2014 analysiert. Das Jahr 2010 zählt hier zu einem der energiereicheren Jahre mit einem Tidenhub von 2,39 m. Der niedrigste Wert tritt im 2009 mit einem Tidenhub von 2,33 m auf. Der Mittelwert für den gesamten analysierten Zeitraum liegt bei 2,36 m.

#### **4.1.2 Strömung**

Zur Einschätzung der berechneten Strömungsgeschwindigkeiten können Messungen aus dem Jahr 1996, die im Rahmen eines KFKI-Forschungsprojekts erhoben wurden (Ross, 1998) und die Strömungsverhältnisse entlang des Vortrapptiefs zwischen Sylt und Amrum beschreiben, herangezogen werden. Auch wenn das untersuchte Gebiet morphologisch aktiv ist, hat sich die grundlegende Charakteristik zwischen Sylt und Amrum nur geringfügig geändert, so dass zumindest ein qualitativer Vergleich mit Erkenntnissen dieser Messkampagne zulässig ist. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Messkampagne des Frühjahrs betrachtet, da es sich hier um einen windarmen Zeitraum handelt. Dies passt gut zu den meteorologischen Bedingungen des Zeitraums der Tidekennwertanalyse der Modellergebnisse.



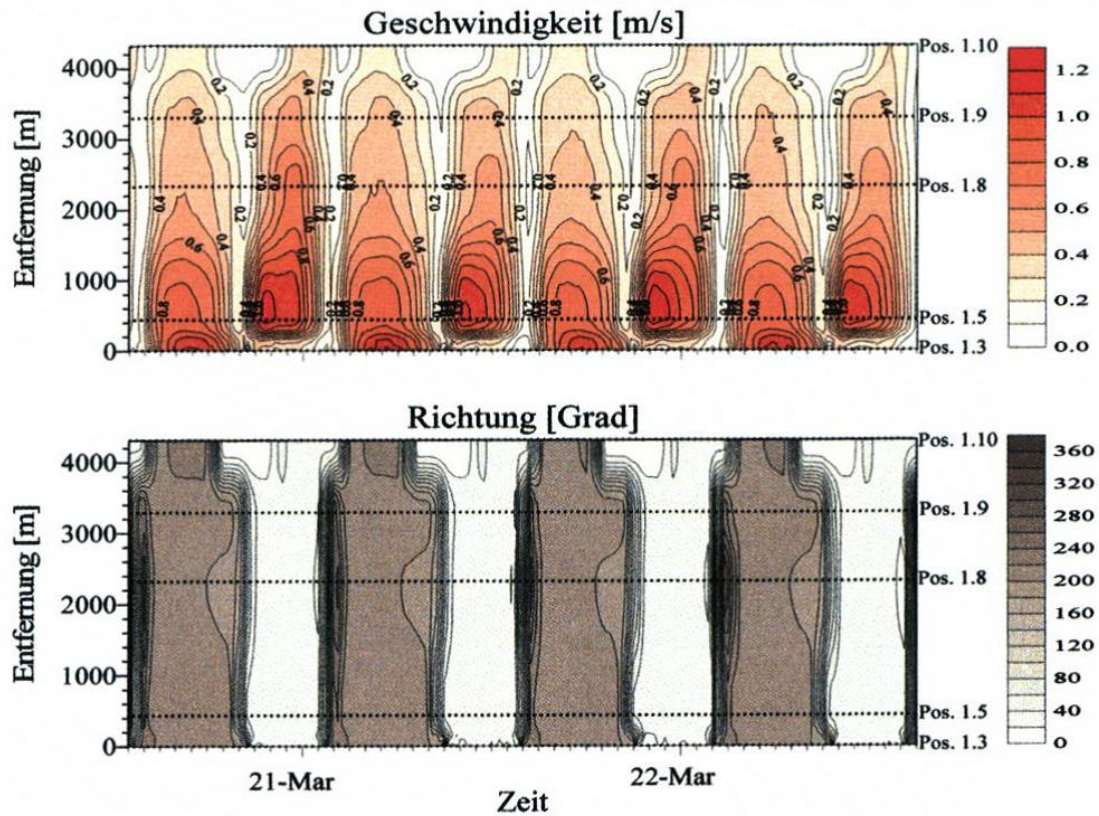


Bild 20: Gemessene Strömungsgeschwindigkeit und -richtung zwischen Sylt (0 m) und Amrum (4200 m) für vier Tiden (Ross, 1998).

Im Rahmen der Messkampagne werden an mehreren Positionen entlang eines Profils von der Hörnummer Odde hin zur Amrumer Odde Strömungsmessungen mit einem ADCP durchgeführt. Aus diesen Messungen werden Tidekennwerte der Strömungsberechnet. Das Maximum der Strömungsgeschwindigkeiten während der Ebbe liegt dicht bei der Hörnummer Odde und es findet ein stetiger Abfall der Strömungsgeschwindigkeiten von Hörnum nach Amrum statt. Während der Flut liegt das Maximum eher in der Mitte des Vortrapptiefs und die Strömungsgeschwindigkeiten nehmen sowohl in Richtung Hörnum als auch Richtung Amrum ab (Bild 20).

Dieses Muster ist auch in den Modellergebnissen entlang dieses Profils vorhanden, wie in Bild 21 für die maximalen Geschwindigkeiten des Ebbestroms und in Bild 22 für die des Flutstroms zu erkennen ist. Das Profil der Messkampagne ist dabei zur Orientierung in Rot eingezeichnet. Bei den Messungen liegen die maximalen Geschwindigkeiten sowohl während des Ebb- als auch während des Flutstroms bei 1,1 – 1,2 m/s. Diese Werte werden auch im Modell erreicht.

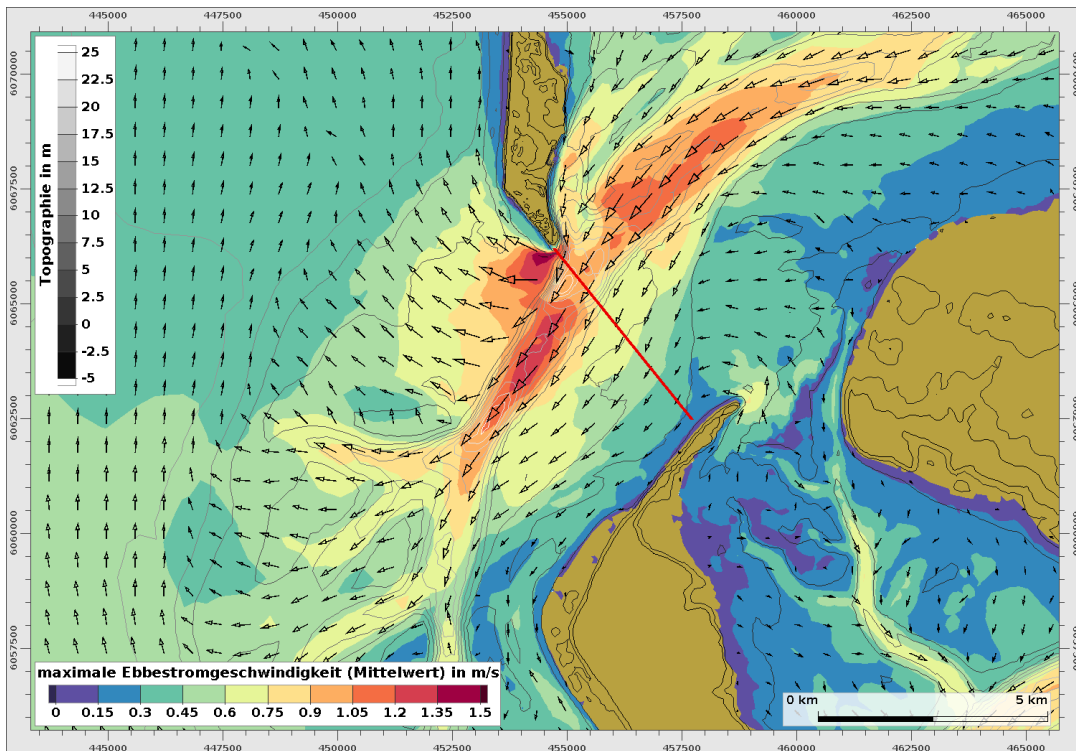


Bild 21: maximale Ebbestromgeschwindigkeit für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010 für den Bereich zwischen Sylt und Amrum.

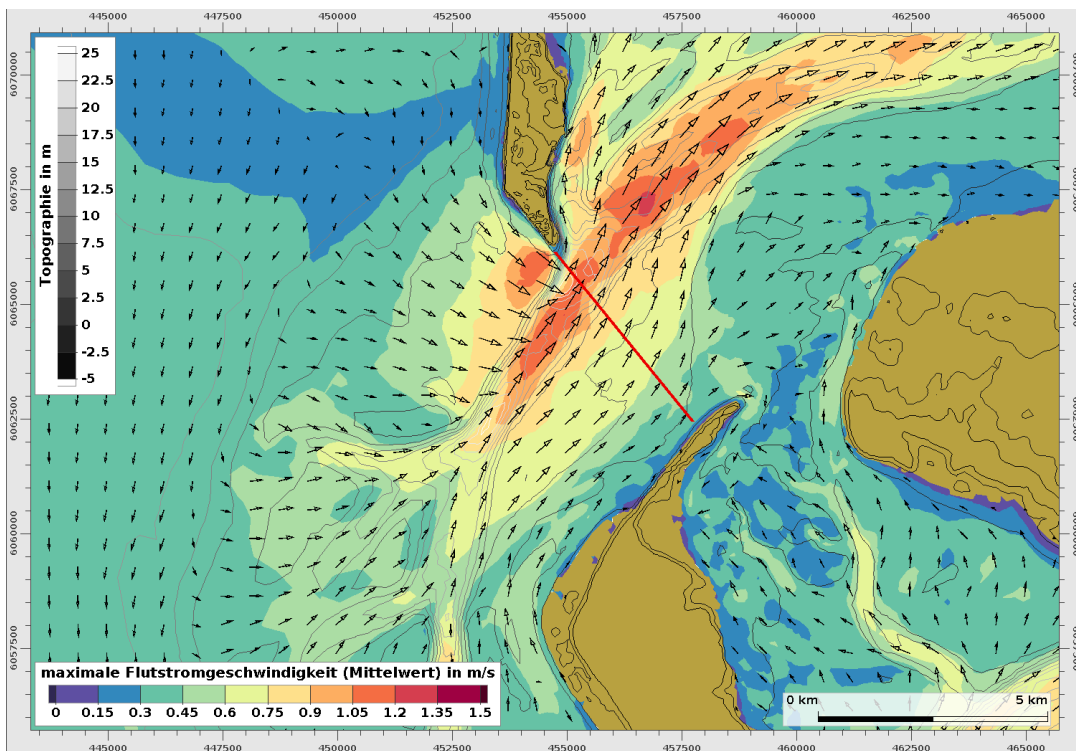
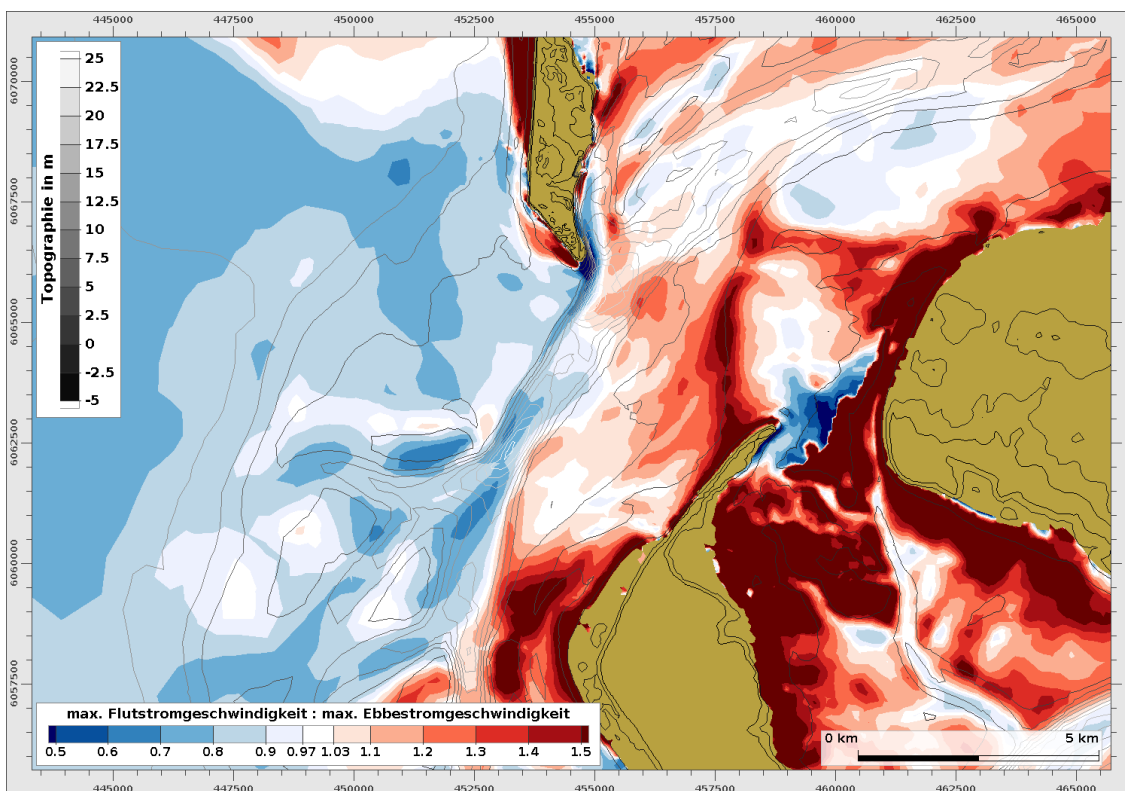


Bild 22: maximale Flutstromgeschwindigkeit für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010 für den Bereich zwischen Sylt und Amrum.

Betrachtet man sich die Strömungsgeschwindigkeiten in der Fläche, ist zudem zu sehen, dass weiter südlich im Seegatt die Strömungsgeschwindigkeiten etwas höher sind. Zusätzlich zu den hohen Strömungsgeschwindigkeiten im Vortrapptieft tritt außerdem ein weiteres Maximum südwestlich der Spitze der Hörnummer Odde auf den Theeknobsänden auf. In diesem Bereich treten auch abrupt Änderungen der Strömungsrichtung von bis zu 90° auf.

Bei den Messungen wird eine Ebbstromdominanz von der Hörnummer Odde etwa bis zur Mitte des Vortrapptiefs ermittelt. Weiter östlich Richtung Amrum wird dann der Flutstrom dominant. Dieses Muster tritt auch in den Simulationsergebnissen auf, wie in Bild 23 zu sehen ist. Hier ist das Verhältnis der maximalen Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten zueinander dargestellt. Weiter südlich in Richtung Ebbdelta ist jedoch das gesamte Vortrapptief ebbstromdominiert und eine Flutstromdominanz ist nur in den flacheren Bereichen vor der Küste von Amrum zu erkennen.

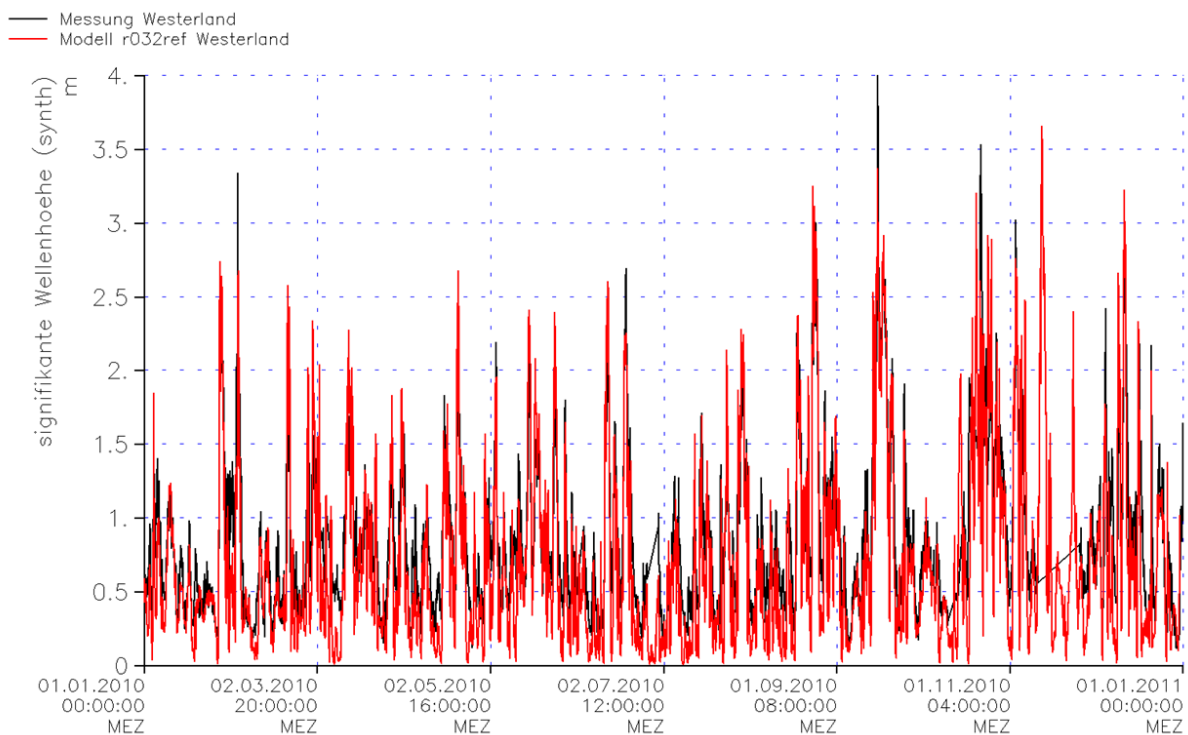
Die sehr starke Flutstromdominanz in Bild 23 in dem Bereich zwischen Amrum und Föhr rührt daher, dass in den flacheren Bereichen während der Ebephase nur noch sehr niedrige Wassertiefen vorhanden sind, bzw. die Wattflächen phasenweise auch komplett trocken fallen können. Dementsprechend treten im Verhältnis zum Flutstrom an diesen Stellen deutlich niedrigere Strömungsgeschwindigkeiten auf.



*Bild 23: Verhältnis der maximalen Flutstromgeschwindigkeit zur maximalen Ebbstromgeschwindigkeit für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010. Rote Bereiche sind flutstromdominant und blaue Bereiche sind ebbstromdominant.*

### 4.1.3 Seegang

Der berechnete Seegang wird mit Messungen an den Pegeln Westerland im Küstenvorfeld und Hörnum am östlichen Ende des Hörnumtiefs verglichen. Für den Pegel Westerland ist in Bild 24 zu erkennen, dass unter Normalbedingungen die signifikante Wellenhöhe unter 1,5 m liegt. Bei stärkerem Wind kann diese aber in dem betrachteten Zeitraum auf bis zu 3,5 m ansteigen. Im Vergleich zur Messung zeigt sich, dass gerade bei extremen Ereignissen sowohl im niedrigen als auch im hohen Bereich die signifikante Wellenhöhe nicht immer genau getroffen wird. Die generelle Seegangsdynamik wird aber gut wiedergegeben. Zur besseren Vergleichbarkeit ist zusätzlich in Bild 25 ein kürzerer Zeitraum von zwei Monaten abgebildet.



*Bild 24: Signifikante Wellenhöhe für das Jahr 2010 am Pegel Westerland aus Messungen (schwarze Kurve) und aus Modellergebnissen (rote Kurve).*

Auch wenn der Seegang von Januar bis Ende August immer mal wieder stärker wird mit Wellenhöhen größer 2 m, so treten die stärkeren Seegangseignisse in der zweiten Jahreshälfte mit den für diese Region typischen Herbst- und Winterstürmen auf. Hier gibt es in diesem Jahr fünf Ereignisse, bei denen in der Spitze Wellenhöhen von mehr als 3 m erreicht werden.



*Bild 25: Signifikante Wellenhöhe für die Monate August und September 2010 am Pegel Westerland aus Messungen (schwarze Kurve) und aus Modellergebnissen (rote Kurve).*

Betrachtet man in Bild 26 den Pegel Hörnum, der am östlichen Ende des Hörnumtiefs liegt, ist deutlich die dämpfende Wirkung der Inseln Sylt und Amrum sowie der flacheren Bereiche im Ebbdelta auf den Seegang zu erkennen. Die signifikante Wellenhöhe ist hier kleiner als im Küstenvorfeld. Die generelle Dynamik, die im Küstenvorfeld auftritt, ist aber immer noch zu erkennen. Die maximalen Wellenhöhen, die hier auftreten, liegen bei knapp 1,5 m.

Der Blick auf die flächenhafte Verteilung der mittleren signifikanten Wellenhöhe für das gesamte Jahr 2010 in Bild 27 zeigt diese Dynamik noch deutlicher. Es ist gut zu sehen, dass die Wellenhöhe mit Fortschreiten des Seegangs in das Tidebecken abnimmt. Während die mittleren Wellenhöhen im Küstenvorfeld noch zwischen 0,6 und 0,8 m liegen, fallen sie im Wattenmeer auf 0,2 bis 0,4 m ab.

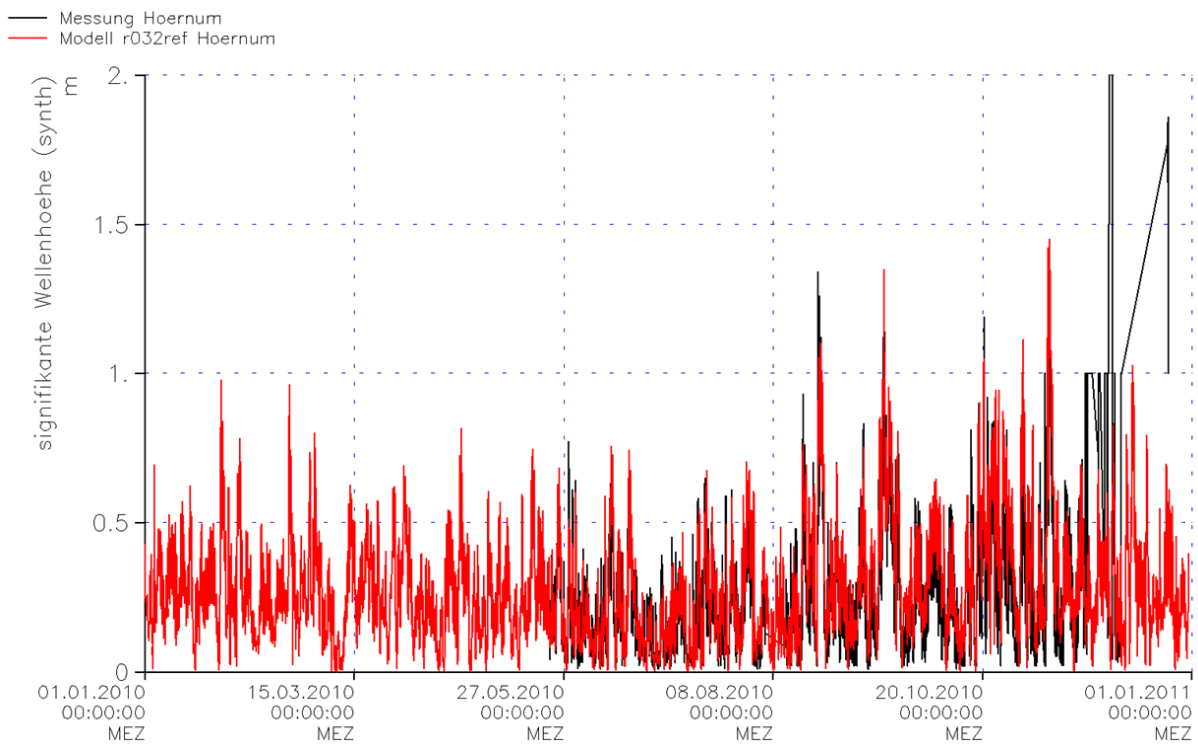


Bild 26: Signifikante Wellenhöhe für das Jahr 2010 am Pegel Hörnum aus Messungen (schwarze Kurve) und aus Modellergebnissen (rote Kurve). (Ausfall des Messgeräts für den Zeitraum bis Ende Mai und ab Anfang Dezember).

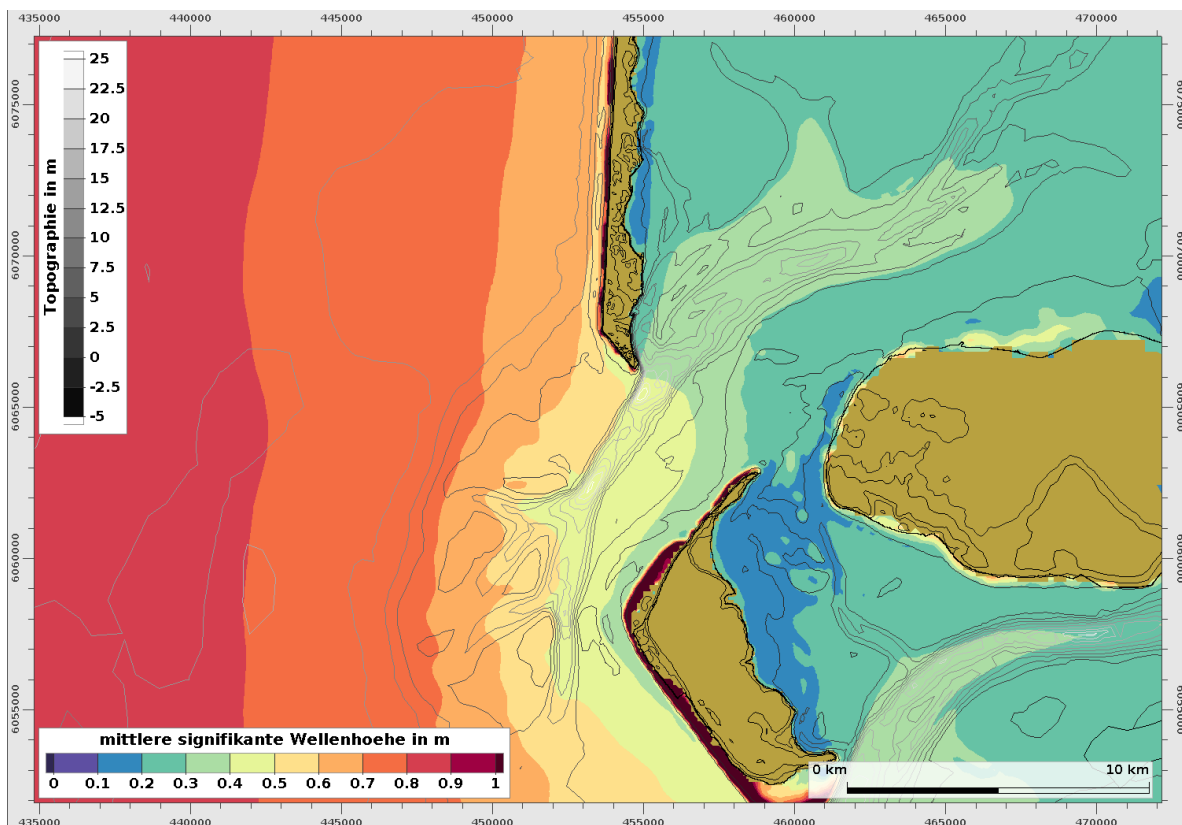


Bild 27: Mittlere signifikante Wellenhöhe für das Jahr 2010.

#### 4.1.4 Bodenschubspannung

Die Schnittstelle zwischen Hydrodynamik und Morphodynamik ist die Bodenschubspannung, die in der Sedimenttransportmodellierung maßgebend für die Art und die Stärke des Transportes ist. In gekoppelten Modellen wird die Bodenschubspannung sowohl aus der Strömungsgeschwindigkeit als auch aus den Seegangparametern berechnet. Betrachtet man die Bodenschubspannung in der Fläche, wie sie in Bild 28 und Bild 29 für die maximalen Bodenschubspannungen während Flut- und Ebbsstrom für einen Nipp-Spring-Zyklus dargestellt ist, sind diese zwei unterschiedlichen Einflüsse gut zu erkennen.

Zum einen treten ausgelöst durch die hohen tidebedingten Strömungsgeschwindigkeiten hohe Bodenschubspannungen im Seegatt auf. Zusätzlich dazu können aber aufgrund der Wirkung des Seegangs auch immer wieder teils stark erhöhte Werte je nach Windsituation in den flacheren Bereichen z. B. entlang der Küsten, im Bereich des Ebbdeltas oder auf den Theeknobsänden auftreten. Diese sind vor allem während des Flutstroms besonders deutlich zu erkennen, da in dem analysierten Zeitraum der Wind hauptsächlich aus Südwest kommt und somit in Richtung des Flutstroms wirkt. Während der Ebbphase übt der Seegang dann eine dämpfende Wirkung aus. Dies lässt sich auch gut in den residuellen Bodenschubspannungen pro Tide in Bild 30 erkennen.

Während in den tiefen Bereichen des Seegatts kein stark ausgeprägtes Signal zu erkennen ist, da sich hier Flut- und Ebbsstrom ansatzweise ausgleichen, ist in den umliegenden Bereichen mit stärkerem Seegangseinfluss ein nach Nordosten gerichtetes Residuum zu erkennen.

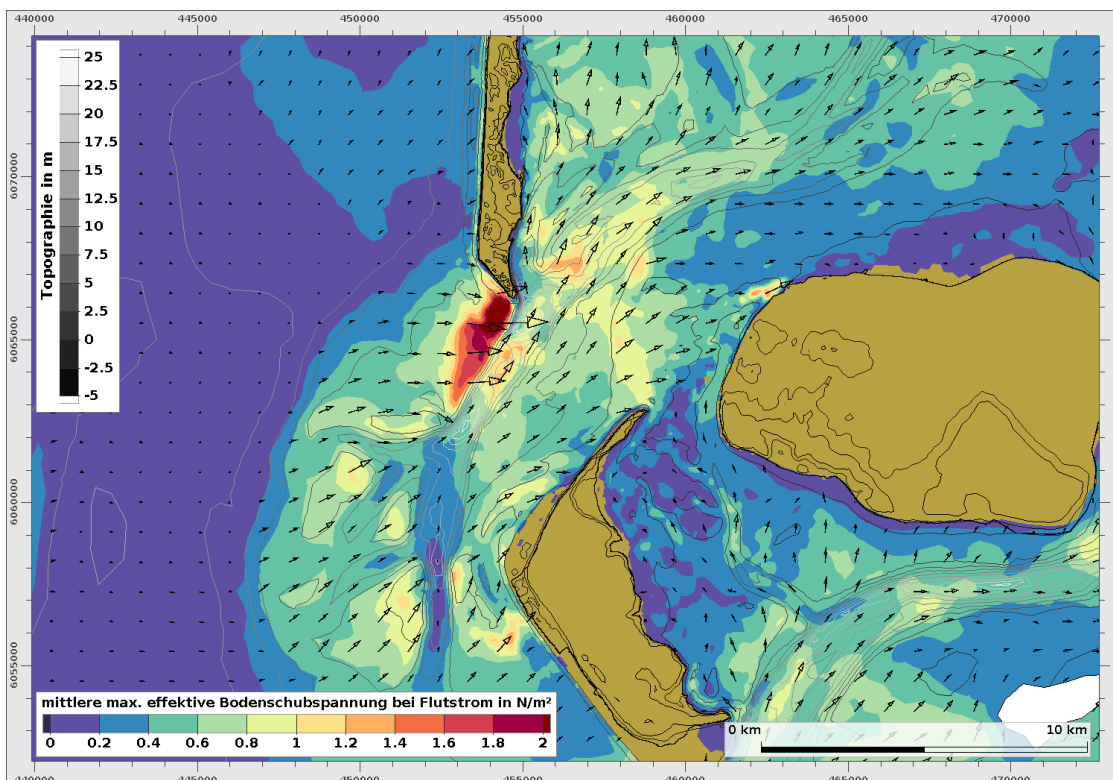


Bild 28: Mittelwert der maximalen Bodenschubspannungen während des Flutstroms für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010.

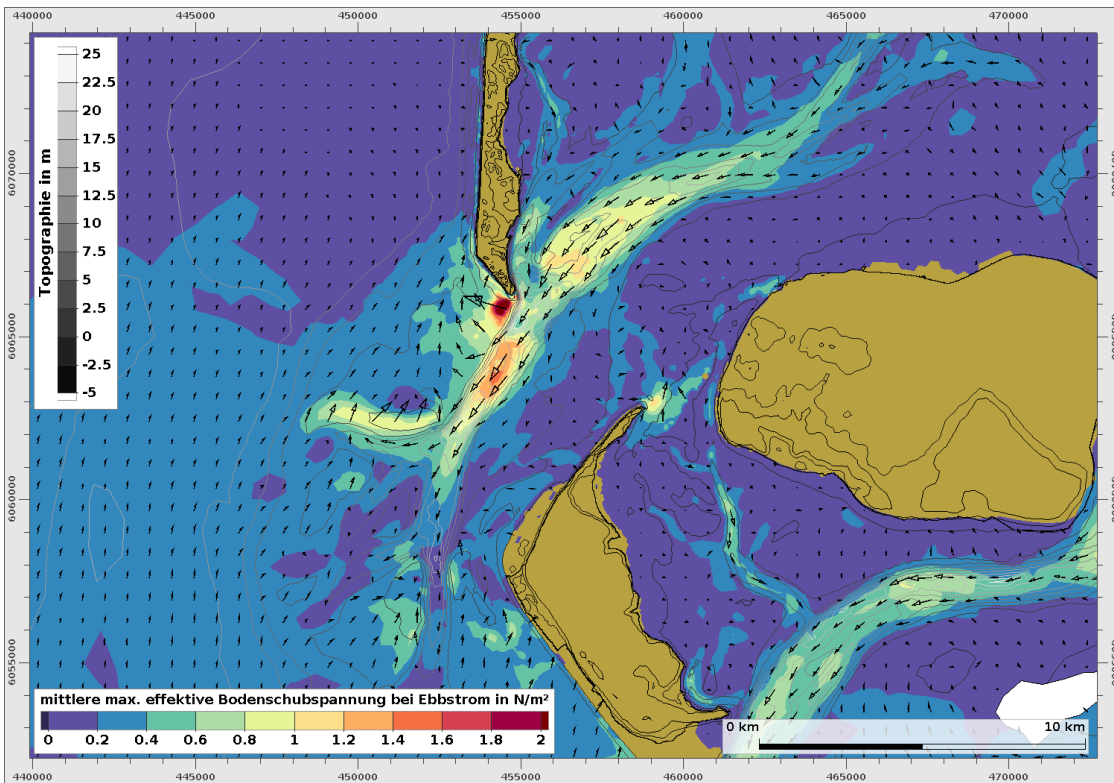


Bild 29: Mittelwert der maximalen Bodenschubspannungen während des Ebbstroms für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010.

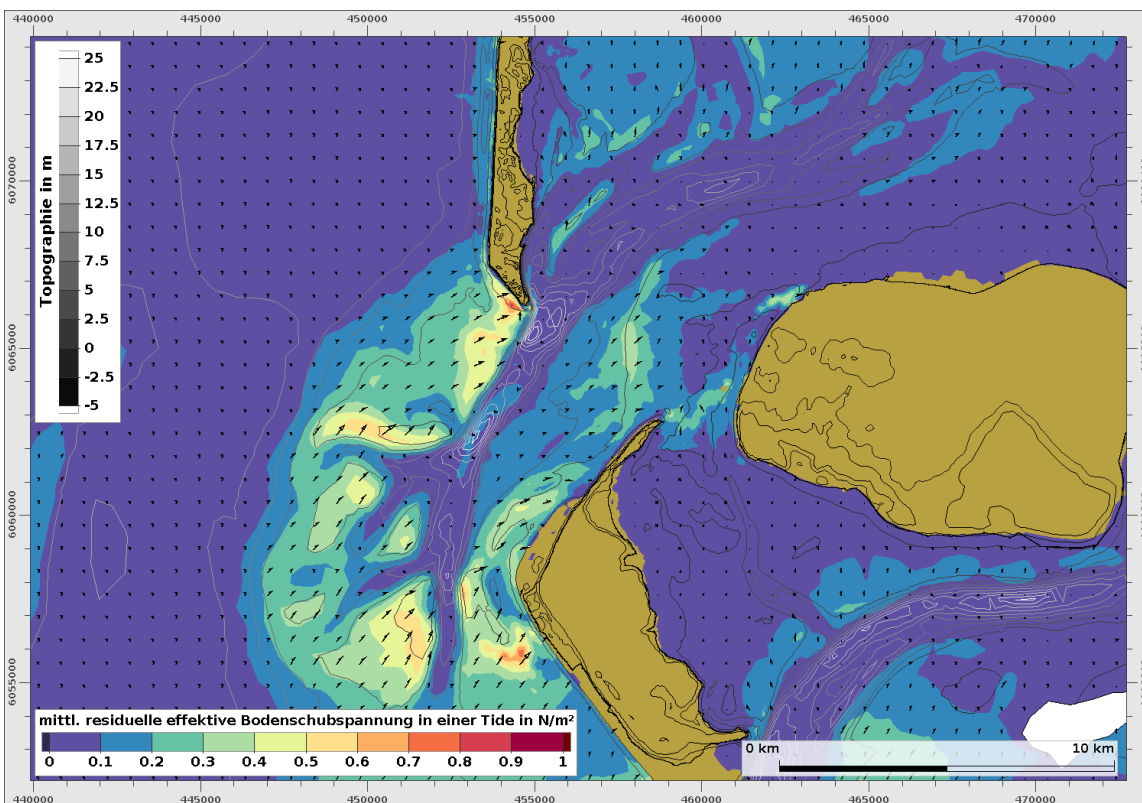


Bild 30: Mittlere residuelle Bodenschubspannung in einer Tide für einen Nipp-Spring-Zyklus im Juli 2010.



Vergleicht man diese Ergebnisse mit den residuellen Bodenschubspannungen für das gesamte Jahr 2010 in Bild 31, sieht man den Einfluss der Richtung, aus der der Seegang hauptsächlich kommt. Über das ganze Jahr betrachtet, zeigt das Residuum der Bodenschubspannungen nach Osten in das Tidebecken hinein. Die maximal auftretenden Werte liegen hier entlang der Westküsten Sylts und Amrums, auf den Theeknobsänden und um die Sandbänke des Ebbdeltas herum.

Im Seegatt ist eine leichte Dominanz mit dem Ebbstrom in Richtung des Ebbdeltas zu erkennen. Das deutlichere Signal wird aber durch den mehrheitlich aus Westen kommenden Seegang ausgelöst. Diese Wirkung ist vor allem in den Bereichen des Ebbdeltas und des Vorstrandbereiches mit Wassertiefen kleiner 5 m zu erkennen.

Um die Bedeutung des Seegangs für den Sedimenttransport hervorzuheben, ist in Bild 32 die gleiche Analyse für einen Jahreslauf ohne Seegang dargestellt. Es fällt auf, dass die Residuen der Bodenschubspannung generell deutlich niedriger sind und an vielen Orten kein deutliches Signal auftritt. Einzig im Seegatt ist weiterhin die Dominanz des Ebbstroms zu erkennen.

Für die Mobilisierung und Erosion der sandigen Sedimentfraktionen und den damit einhergehenden beschleunigten Transport in Suspension spielen aber vor allem die maximal auftretenden Werte eine wichtige Rolle (Bild 33). Bodenschubspannungen größer  $3 \text{ N/m}^2$  treten nur in Gebieten mit signifikantem Seegangseinfluss auf. Entlang der Westküste von Sylt und auf den Theeknobsänden ist dies für das Jahr 2010 zwischen 6 und 15% der analysierten Zeit der Fall.

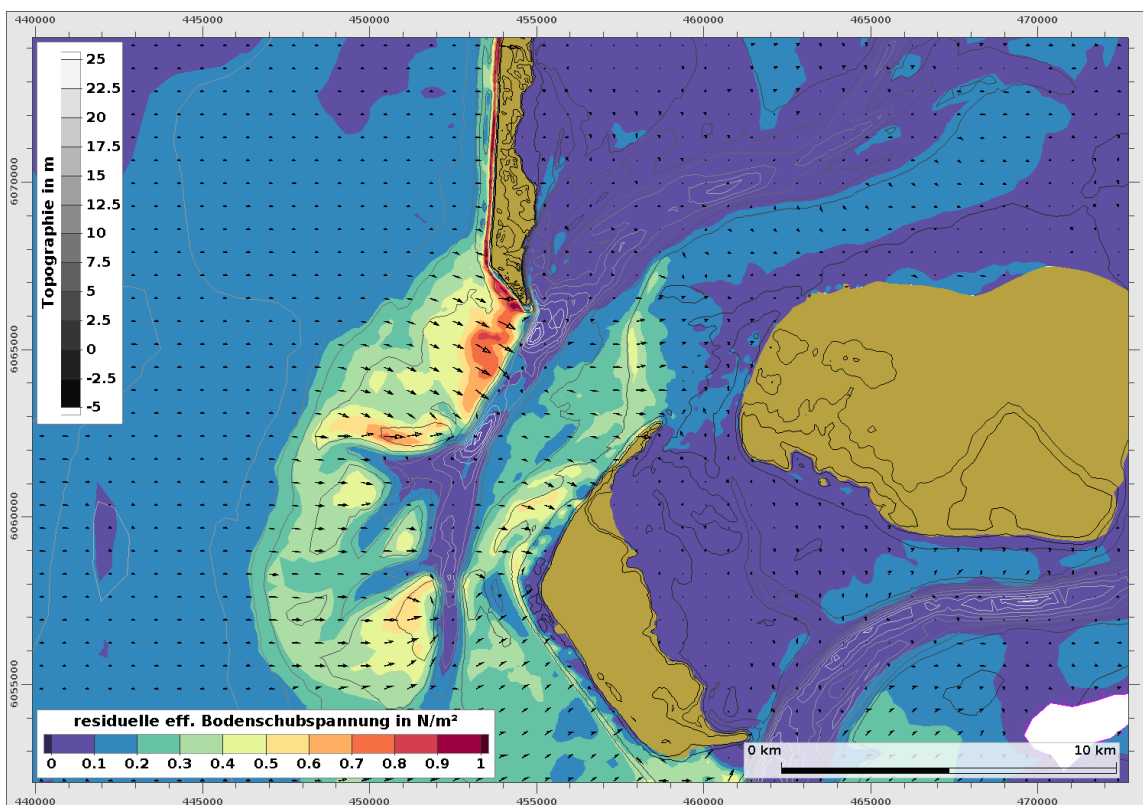


Bild 31: Residuelle Bodenschubspannungen für das Jahr 2010 mit Seeganskoppelung.

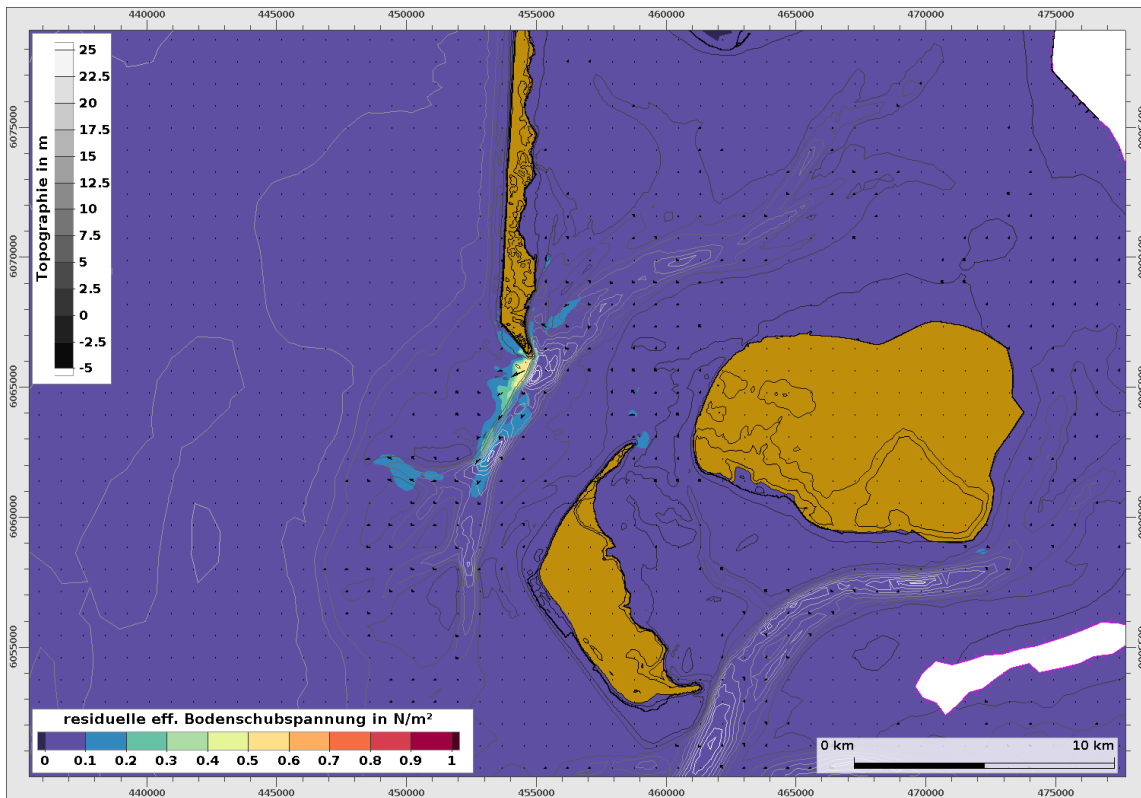


Bild 32: Residuelle Bodenschubspannungen für das Jahr 2010 ohne Seganskoppeling.

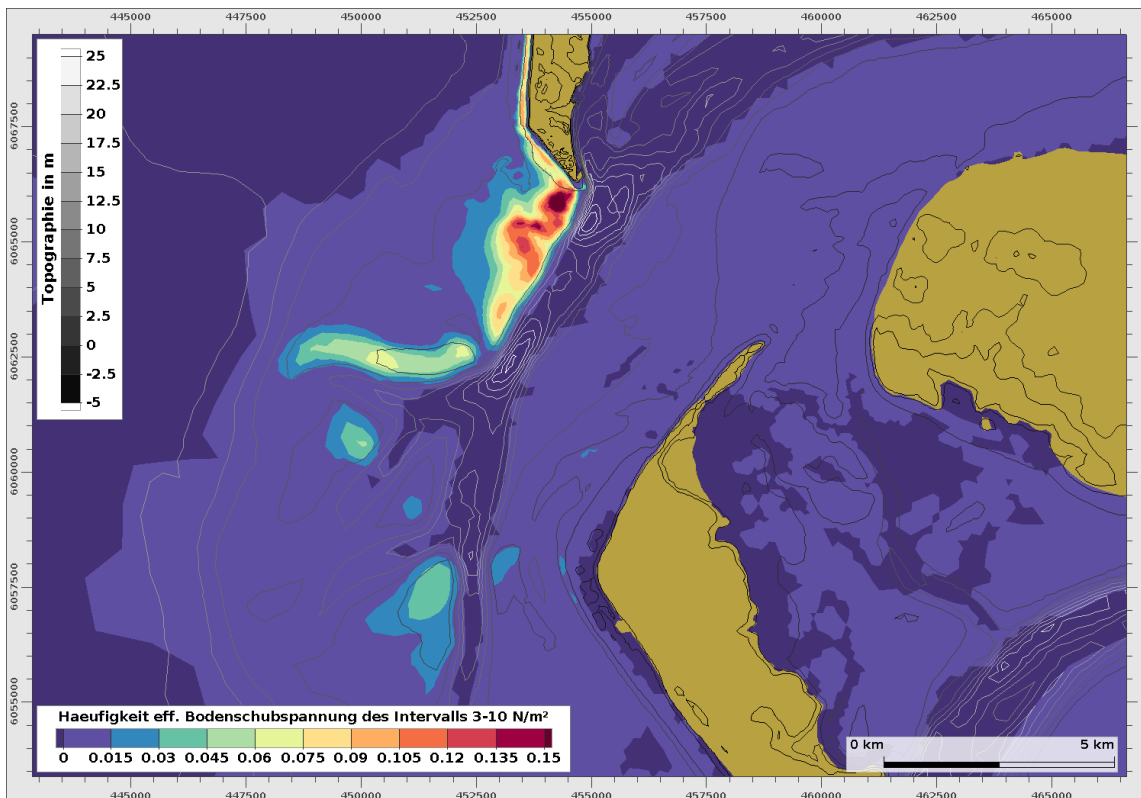


Bild 33: Häufigkeit der effektiven Bodenschubspannungen zwischen 3 und 10  $\text{N/m}^2$  für das Jahr 2010.

#### 4.1.5 Morphodynamik

Im Fokusgebiet sind folgende morphologische Prozesse hinsichtlich ihrer Entwicklung von besonderem Interesse (Bild 34):

1. Umlagerungen an der Hörnumer Odde
2. Bildung des Schütthangs im Vortrapptief und damit einhergehend die Entwicklung der Theeknobsände
3. Umlagerungen an der Amrumer Odde
4. Vertiefung des Vorstrandbereichs bei Hörnum
5. Verlagerung der Kormoraninsel
6. Umlagerungen der Sandbänke im Ebbdelta

In Bild 35 ist der Vergleich der morphologischen Entwicklung anhand der Tiefenänderung im Modell nach einem Jahr für den Zeitraum 2010 mit den mittleren gemessenen Änderungen des Zeitraum 2007 bis 2013 für das Gebiet südlich von Hörnum dargestellt. Bild 36 zeigt denselben Vergleich für die Westküste Amrums und das Ebbdelta.

Das Modell bildet viele der grundlegenden Tendenzen korrekt ab, aber gerade in den energiereichen Bereichen mit starker Seegangswirkung wird die morphologische Entwicklung in der Stärke eher überschätzt.

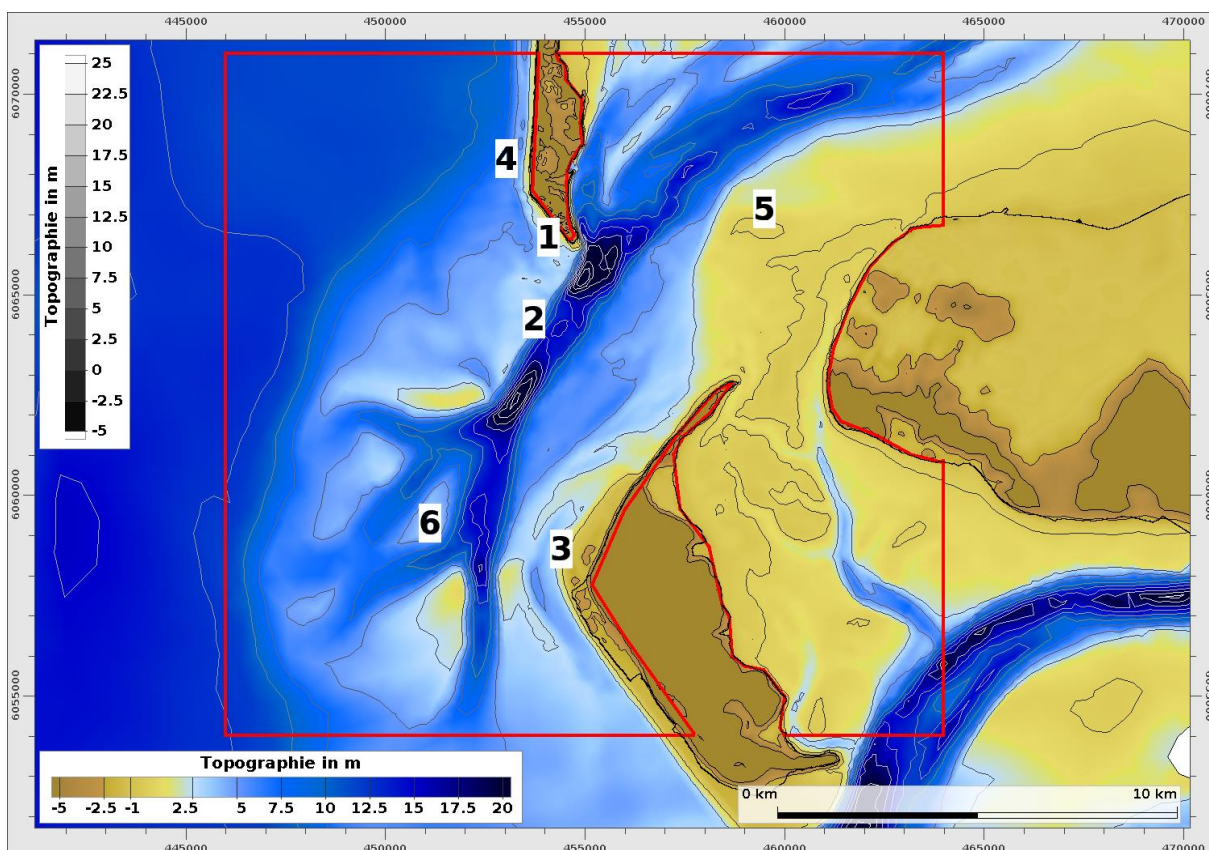


Bild 34: Morphologische Hot Spots im Fokusgebiet.

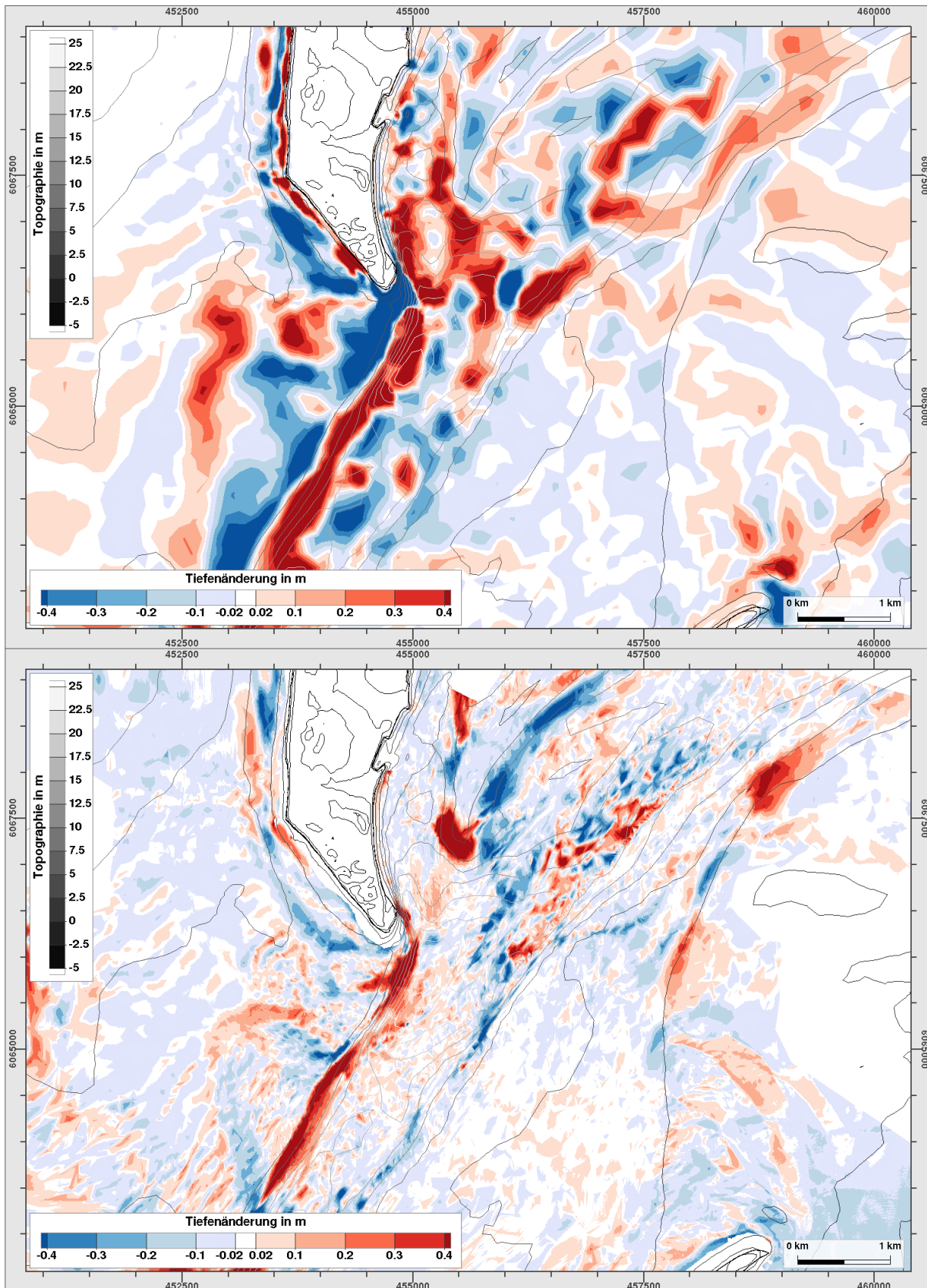


Bild 35: Vergleich von simulierten Tiefenänderungen für das Jahr 2010 (oben) und den gemessenen mittleren jährlichen Änderungen für den Zeitraum 2007-2013 (unten) für den Bereich um Hörnum.

### **Umlagerungen an der Hörnumer Odde:**

Im Bereich des Tetrapoden-Längswerks entlang der Westküste der Hörnumer Odde ist auch im Modell die in den Messungen sichtbare Ablagerung von Sedimenten zu sehen. Südlich und südwestlich entlang des Küstenverlaufs der Hörnumer Odde findet Erosion statt. Diese ist an der Spitze der Odde besonders ausgeprägt, was in der Tendenz ebenfalls in Übereinstimmung mit den Messungen ist. Die langfristige Tendenz zeigt eine Wanderung der Odde nach Osten. Im Modell findet hier am östlichen Bereich der Odde auf dem Strand oberhalb von 0 m NHN Deposition statt. Unterhalb kommt es zum Abtrag von Sedimenten. Größere Ablagerungen am Ufer finden dann erst wieder etwas weiter nördlich statt.

### **Bildung des Schütthangs im Vortrapptief:**

Auf den Theeknobsänden findet im Modell im westlichen Teil größtenteils Deposition statt. Das Material dazu wird zum einen mit dem Ebbstrom nahe der Hörnumer Odde von Ost nach West bewegt und zum anderen wirkt hier auch von der anderen Seite der hauptsächlich von Westen kommende Seegang. Zusätzliches Material wird von Norden mit dem Küstenlängstransport auf die Theeknobsände transportiert. In den Messungen ist hier ein deutlich feineres Muster zu erkennen, bei dem sich die Wanderung von Dünenkörpern abzeichnet. Diese Vorgänge sind im Modell auflösungsbedingt nicht abgebildet.

Hin zum Hang des Vortrapp-Tiefs findet dann auf den Sänden Erosion statt und das dort bewegte Sediment trägt maßgeblich zur Bildung eines Schütthangs am westlichen Ufer des Vortrapptiefs bei. Auch wenn in den flacheren Bereichen im Modell in der Summe Sediment erodiert, wächst der Schütthang stärker an. Das Wachstum des Schütthangs geht nicht direkt mit einem Verlust der höher gelegenen Sande einher, sondern es weist darauf hin, dass zusätzliches Material über Theeknobsand in das Vortrapptief transportiert wird.

### **Umlagerungen an der Amrumer Odde:**

Entlang der Küste Amrums findet ein Abtrag von Sedimenten statt, die sich entlang Odde in das Tidebecken bewegen. Diese Entwicklung ist sowohl im Modell als auch in den Messungen zu beobachten. In diesem Bereich herrscht eine eindeutige Transportrichtung vor, ausgelöst durch die Dominanz des Flutstroms in diesem Bereich als auch durch den vorwiegenden Seegangseinfluss aus Westen.

### **Vertiefung des Vorstrandbereichs bei Hörnum:**

Die Vertiefung des Vorstrandbereiches entlang der Westküste von Sylt findet im Modell in weiten Teilen statt, jedoch wird im Vergleich zu den Messungen ein zu großer Teil des Sediments in Richtung Strand bewegt. Hier ist eine bessere Beschreibung der Wirkung des Seegangs in der Brandungszone erforderlich.

### **Verlagerung der Kormoraninsel:**

Im Bereich der Kormoraninsel ist eine leichte Verschiebung von Material in nordöstlicher Richtung zu erkennen, die auch in der Natur beobachtet wurde. Hier ist der Flutstrom die maßgebliche Kraft, da der Seegang hier nur bei stärkeren Ereignissen als starke antreibende Kraft für den Sedimenttransport wirkt.

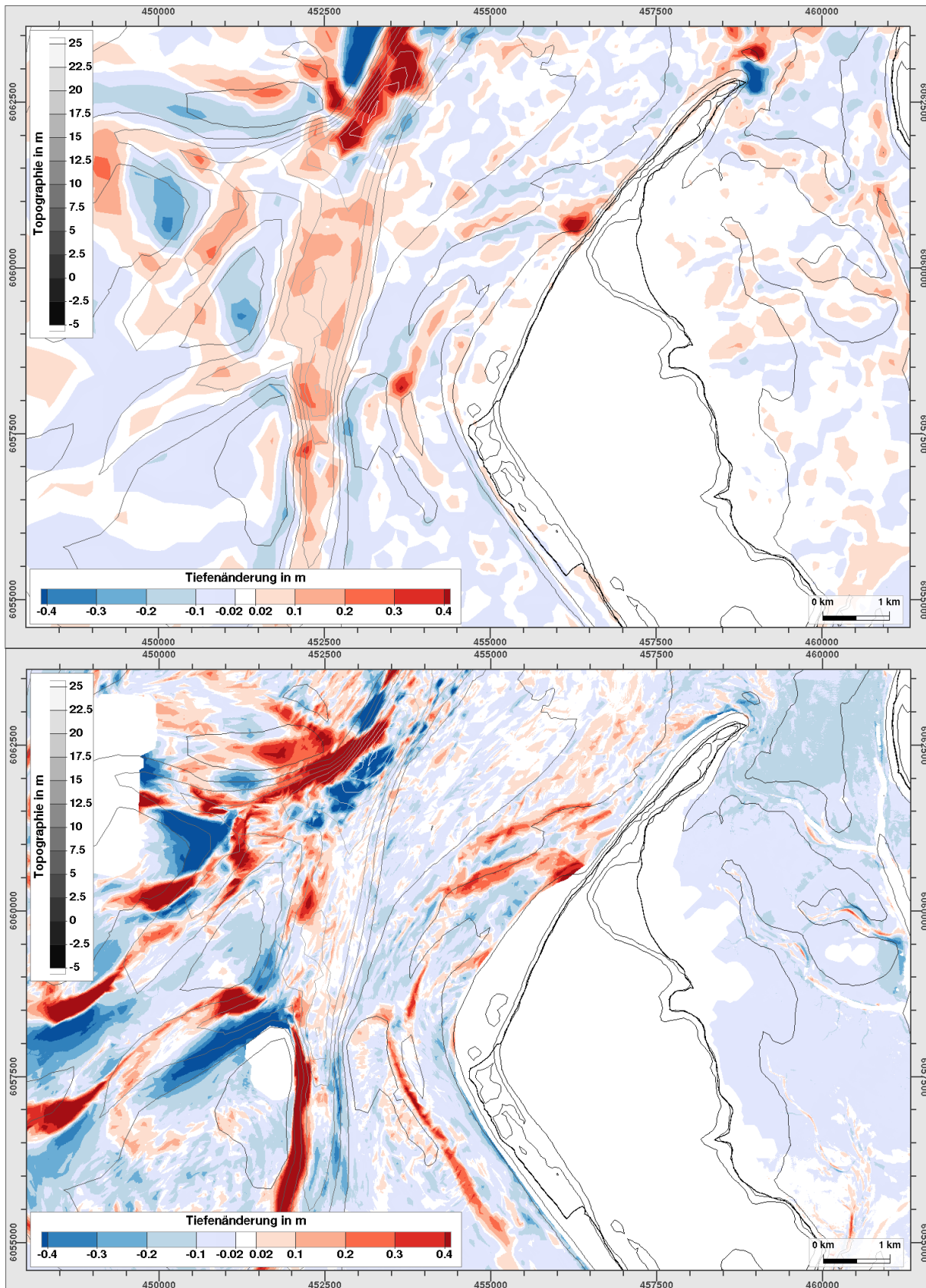


Bild 36: Vergleich von simulierten Tiefenänderungen für das Jahr 2010 (oben) und den gemessenen mittleren jährlichen Änderungen für den Zeitraum 2007-2013 (unten) für den Bereich des Ebb-deltas.

### Umlagerungen der Sandbänke im Ebbdelta:

Die Dynamik im Ebbdelta wird in der Stärke der Entwicklung aktuell vom Modell nur unzureichend abgebildet. Grundlegende Muster lassen sich wiederfinden, so z.B. Sedimentation in den tieferen Bereichen der Seitenarme und Erosion an den Sandbänken und den Hängen der Rinnen. Die Messungen zeigen jedoch eine deutlich größere morphodynamische Aktivität in diesem Bereich.

#### 4.1.6 Bilanzierung von morphologischen Änderungen

Für die vom LKN verwendeten und in Kapitel 3.2 beschriebenen Bilanzierungspolygone ergeben sich für das Jahr 2010 die folgenden simulierten Änderungen im Sedimentvolumen. Beispielhaft ist in Bild 37 die zeitliche Entwicklung für ein Kontrollvolumen entlang der Binnenküste des Hörnumertidebeckens zu sehen. In diesem Kontrollvolumen findet Deposition statt und es tritt ein Sedimentzuwachs von 350.000 m<sup>3</sup> auf. Gut sichtbar ist hier die Bedeutung von Einzelereignissen für den Sedimenthaushalt. Davon unabhängig findet zwar durchgehend ein leichter Anstieg statt, aber ein Großteil des Sedimentzuwachses erfolgt in der zweiten Jahreshälfte bei drei Ereignissen mit starkem Seegang.

Für die folgenden Abbildungen werden diese Änderungen in den verschiedenen Bilanzierungseinheiten als Differenz aus dem Sedimentvolumen zum Anfangs- und Endzeitpunkt der Simulation gebildet und dann in der Fläche dargestellt.

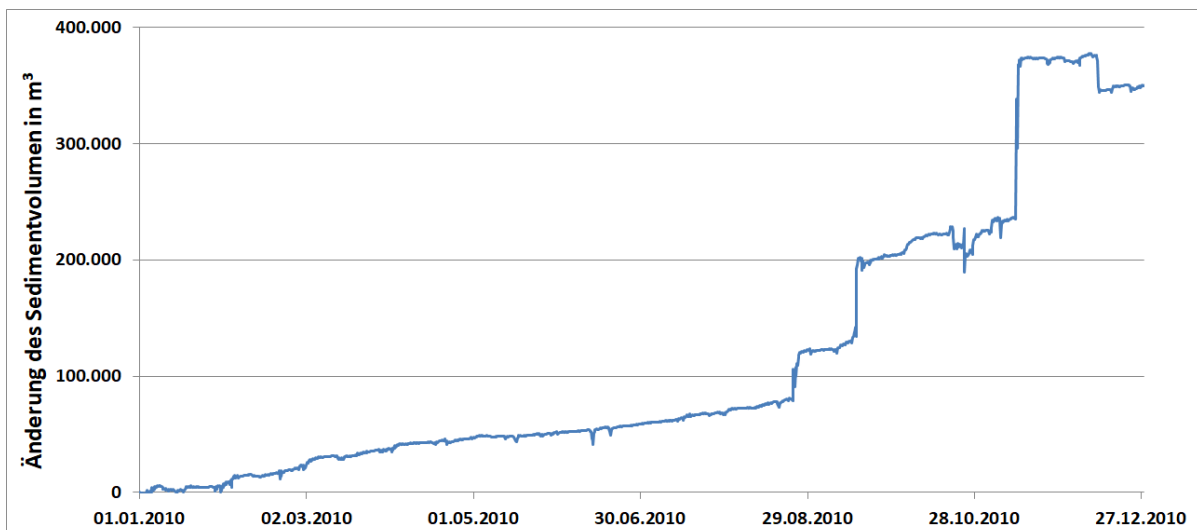
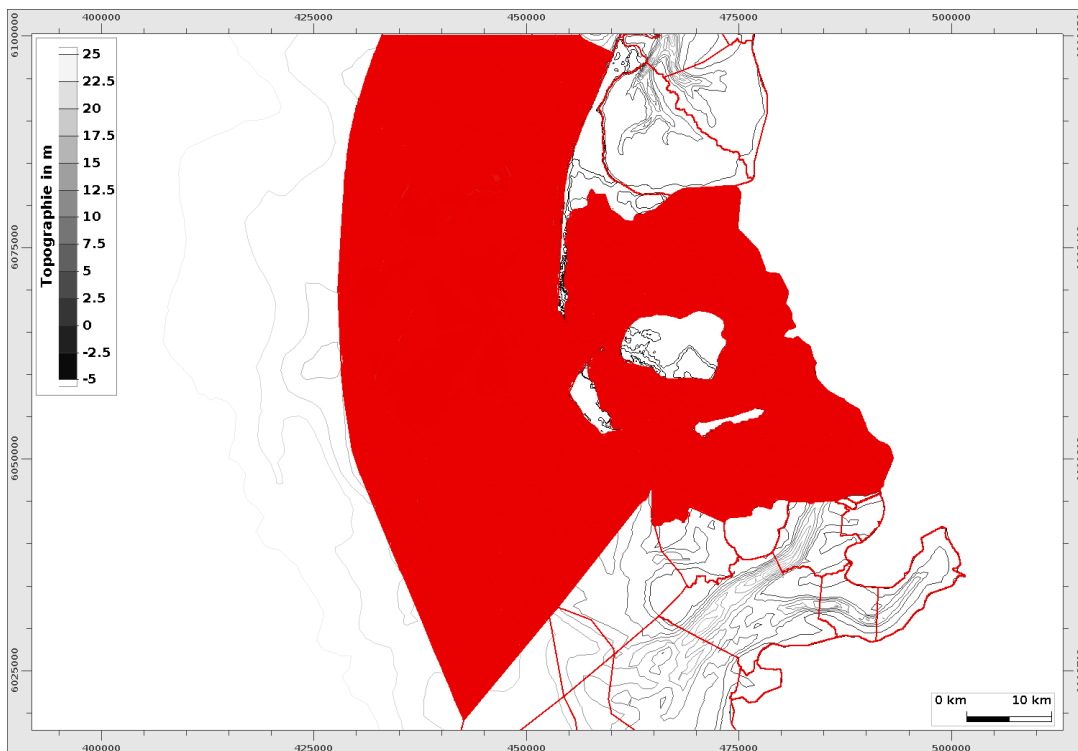


Bild 37: Zeitliche Änderung des Sedimentvolumens für ein Kontrollvolumen entlang der Binnenküste des Hörnumertidebeckens.

Die Kontrollvolumen, die für die Morphologie des nördlichen Teils des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres mit Fokus auf das Hörnumertidebecken und angrenzende morphologische Einheiten (Bild 38) von Bedeutung sind, sind als Einheit ansatzweise ausgeglichen. Es tritt ein leichter Sedimentgewinn von ~ 125.000 m<sup>3</sup> auf, was für die Größe des betrachteten Gebiets als sehr gering einzuschätzen ist.



*Bild 38: Ausgewählte Kontrollvolumen für den nördlichen Teil des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres.*

Innerhalb des Gebiets gibt es lokal aber durchaus größere Umlagerungen. In Bild 39 ist die Entwicklung für die einzelnen Bilanzierungseinheiten zu sehen. Es sind einige generelle Tendenzen zu erkennen. Entlang der Küstenvorfelder und der Ebbdeltas kommt es zu Sedimentverlusten. Das dort erodierte Material wird zum einen in die Bereiche der Tidebecken entlang der Binnenküste transportiert und zum anderen weiter zur See hinaus, wo es bei Wassertiefen größer 10 m abgelagert wird.

Ein Vergleich mit den berechneten mittleren jährlichen Änderungen des Sedimentvolumens des Zeitraums 2010 bis 2016 (Bild 40) zeigt eine gute Übereinstimmung. In einigen Bilanzierungspolygonen kommt es zu leichten Abweichungen in der Stärke der Änderungen, aber es sind die gleichen, oben beschriebenen Tendenzen zu erkennen. Die einzelnen Jahre dieses Zeitraums, dargestellt in Bild 41, liefern ein sehr ähnliches Bild.

Einzig das Jahr 2013 zeigt hier größere Abweichungen mit stärkerer Erosion sowohl entlang der Außenküsten als auch in den vorderen Bereichen der Tidebecken. Dies resultiert dann auch in einer Zunahme der Ablagerungen entlang der Binnenküste mit Ausnahme des nordöstlichen Teils des Hörnummer Tidebeckens. Grund für die stärkeren Änderungen in diesen Bereichen ist der Seegang während der beiden Orkane Christian und Xaver, die im Oktober respektive Dezember des Jahres aufgetreten sind.



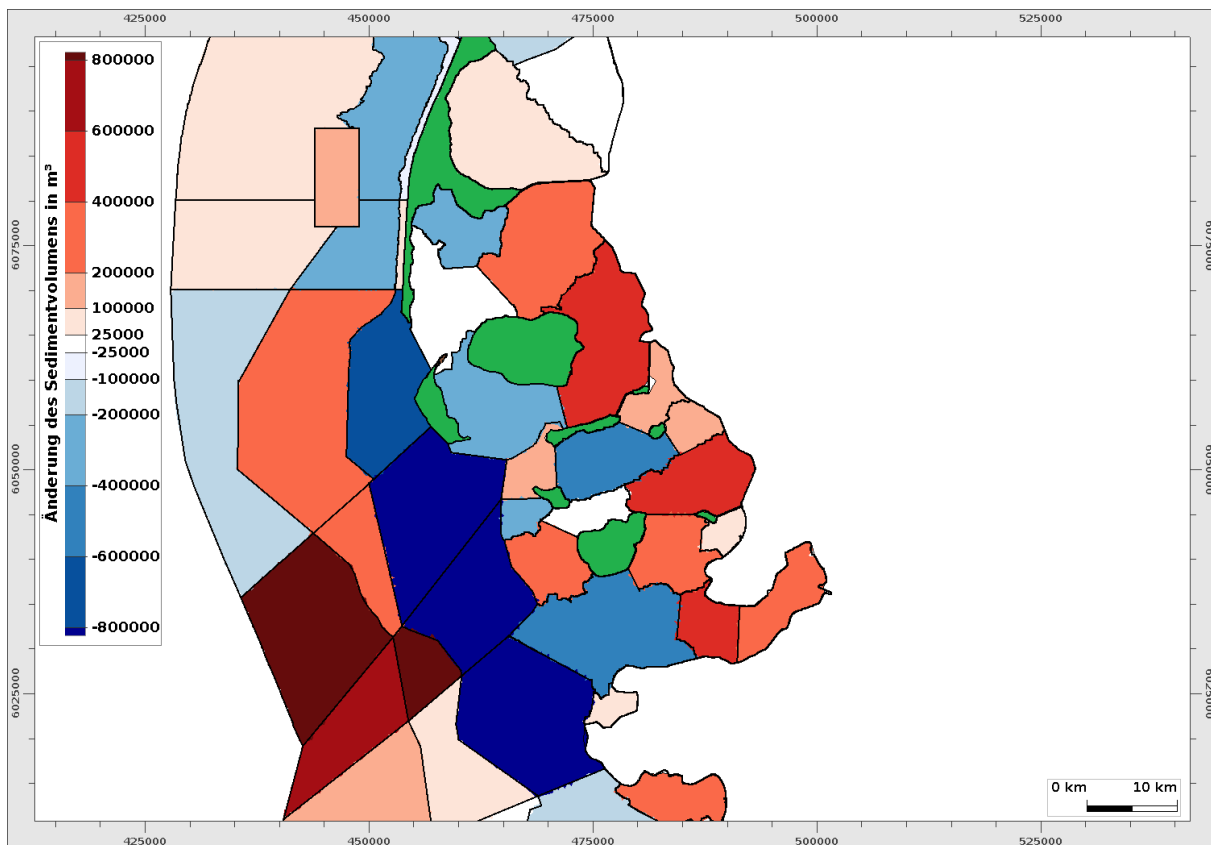


Bild 39: Änderung des Sedimentvolumens in  $m^3$  für Bilanzierungspolygone entlang der schleswig-holsteinischen Nordseeküste für das Jahr 2010.

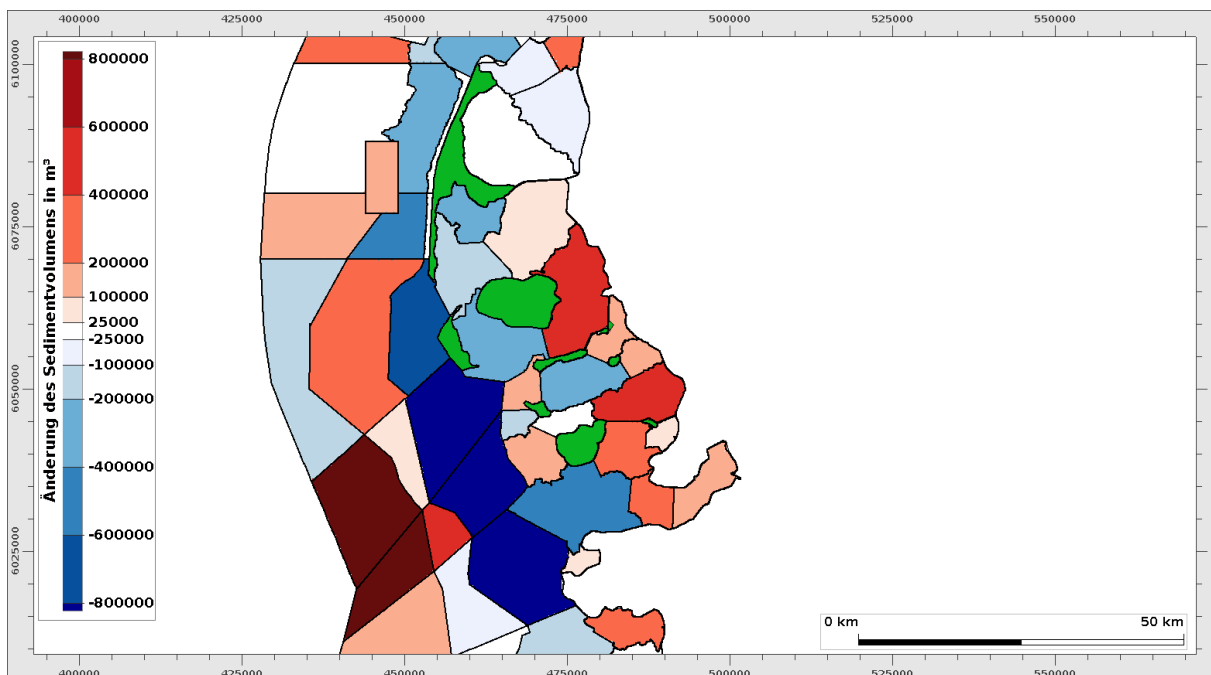


Bild 40: Mittlere jährliche Änderung des Sedimentvolumens in  $m^3$  für Bilanzierungspolygone entlang der schleswig-holsteinischen Nordseeküste für den Zeitraum 2010 bis 2016.

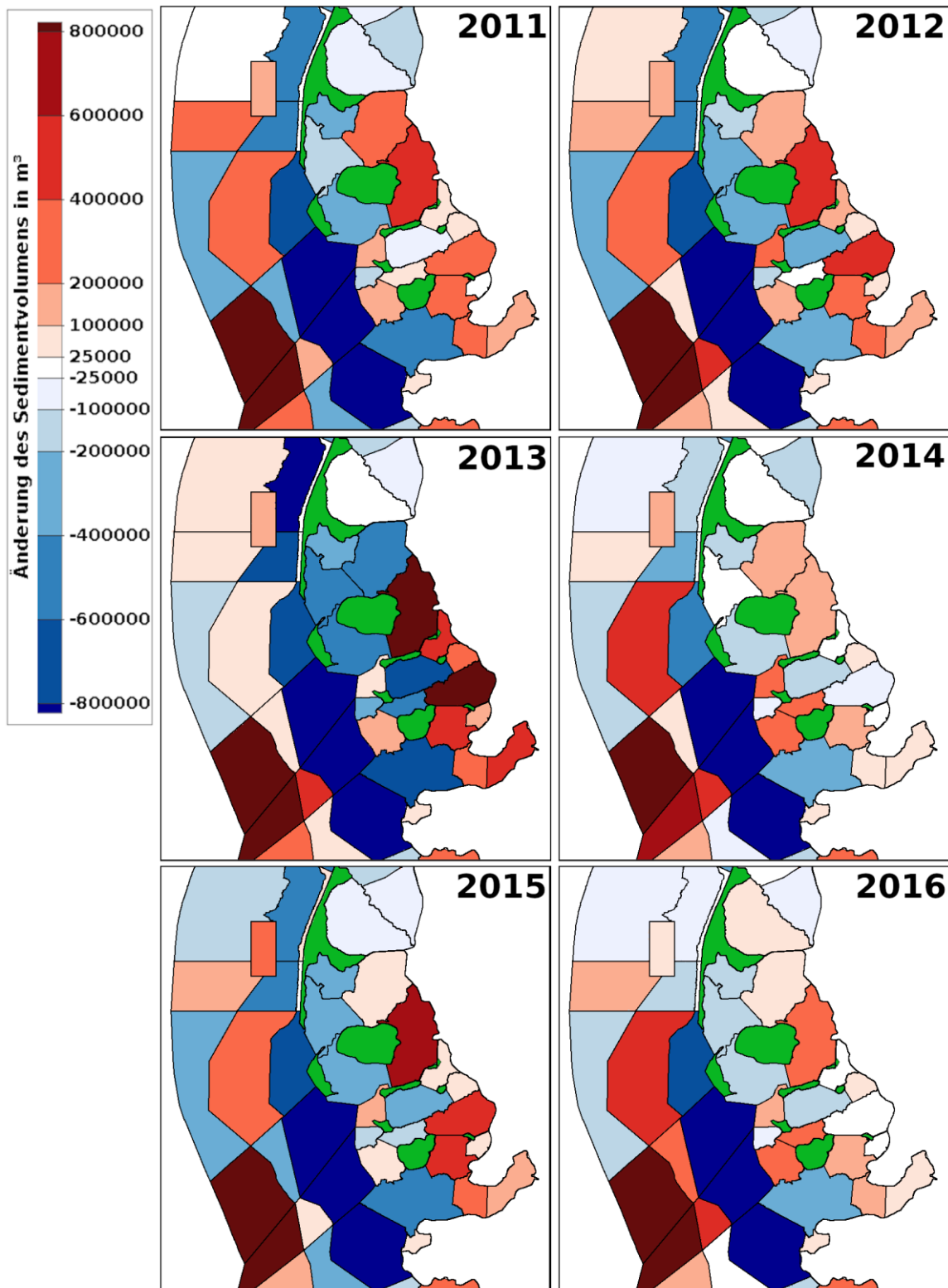


Bild 41: Änderung des Sedimentvolumens in m<sup>3</sup> für Bilanzierungspolygone entlang der schleswig-holsteinischen Nordseeküste für die Jahre 2011 bis 2016.

Für ein differenzierteres Bild im Bereich des Fokusgebiets werden diese Analysen auch für feiner aufgelöste Kontrollvolumen durchgeführt. Die Änderungen des Sedimentvolumens, die im gerechneten Jahr 2010 auftreten, sind Bild 42 zu entnehmen. In der Summe kommt es in diesen Kontrollvolumen zu einem Sedimentverlust von etwa 1 Mio. m<sup>3</sup>.

Sowohl im Bereich der Hörnumer als auch der Amrumer Westküste und des Küstenvorfeldes kommt es zur Erosion. Das innerhalb des Gebiets umgelagerte Sediment landet im Vortrapptief sowie im angrenzenden Teil des Ebbdeltas. Innerhalb des Tidebeckens kommt es zu Verlusten im nördlichen Teil und zu Zunahmen entlang der nördlichen Küste von Föhr und auf den Wattflächen entlang des nordöstlichen Teils der Binnenküste.

Ein Blick auf die mittleren jährlichen Änderungen für den Zeitraum 2010 bis 2016 (Bild 43) zeigt auch hier eine gute Übereinstimmung. Wo es in der Tendenz zu Abweichungen vom Mittel kommt, wie zum Beispiel in der Gegend nördlich von Föhr, werden diese Abweichungen, wie oben bereits erwähnt, stark durch das Jahr 2013 geprägt.

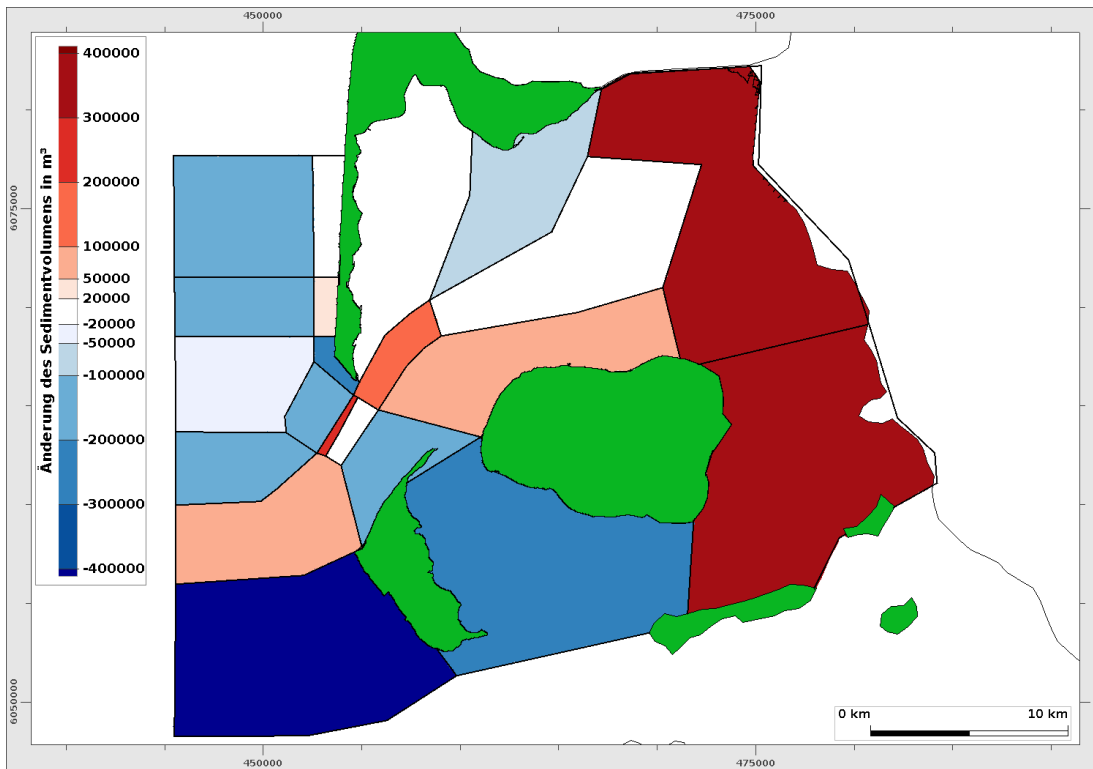


Bild 42: Änderung des Sedimentvolumens in  $m^3$  für verschiedene Bilanzierungspolygone im Fokusgebiet für das Jahr 2010.

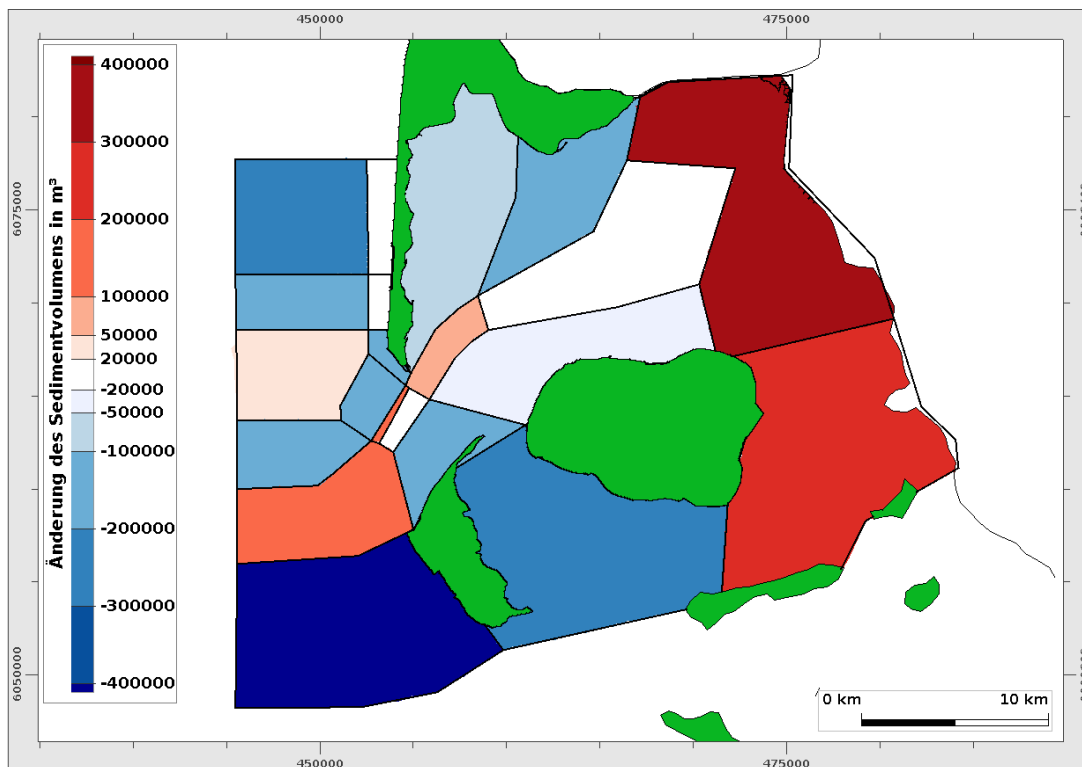


Bild 43: Mittlere jährliche Änderung des Sedimentvolumens in  $m^3$  für verschiedene Bilanzierungspolygone im Fokusgebiet für den Zeitraum 2010 bis 2016.

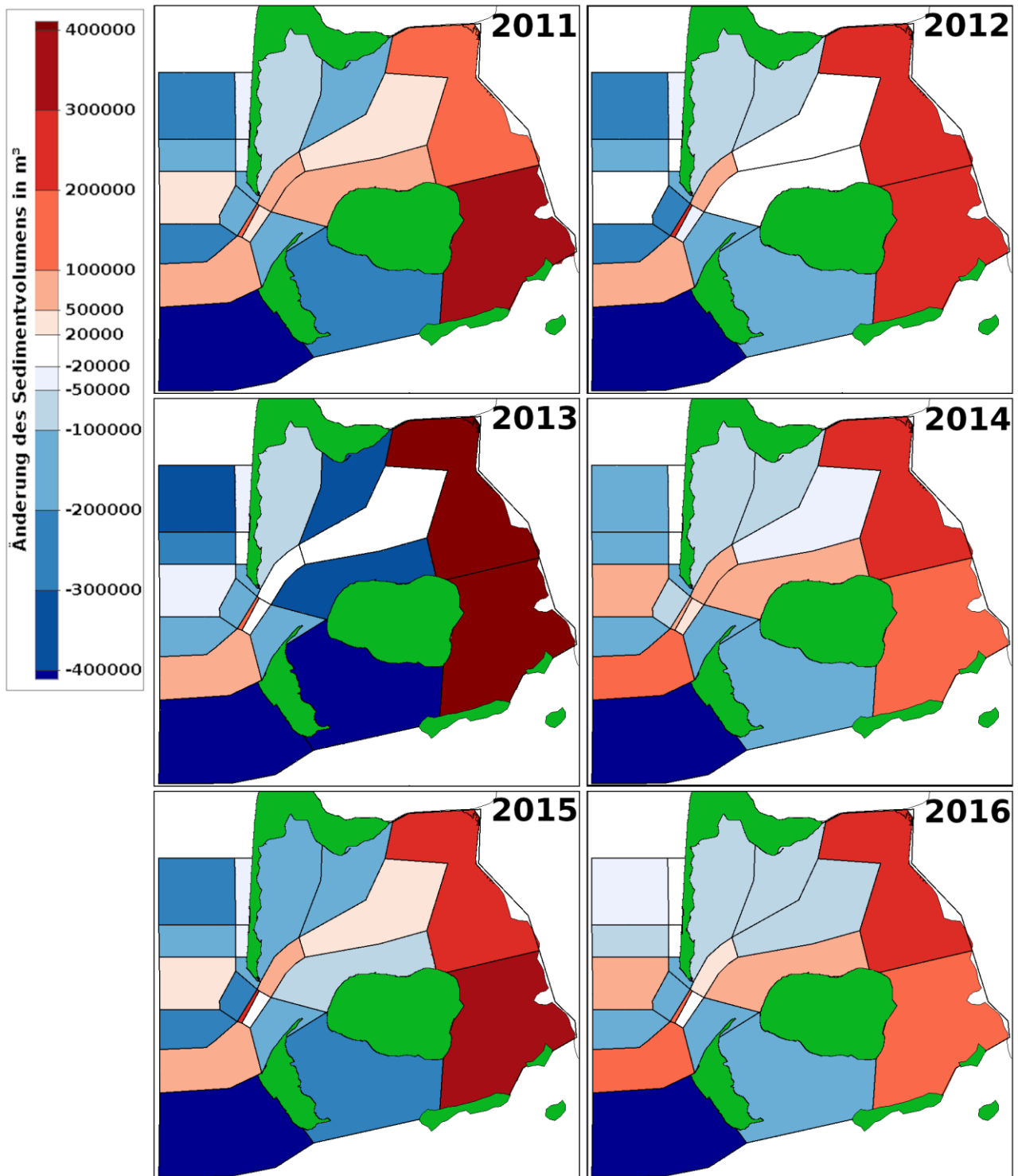
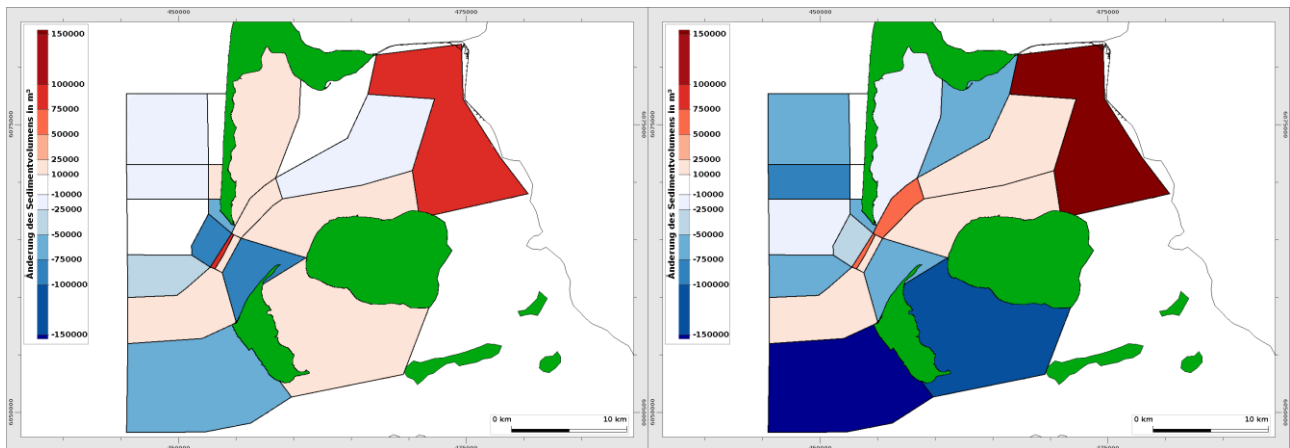


Bild 44: Änderung des Sedimentvolumens in  $m^3$  für verschiedene Bilanzierungspolygone im Fokusgebiet für die Jahre 2011 bis 2016.

Betrachtet man diese Änderungen nur für bestimmte Zeiträume eines Jahres, wird die Bedeutung des Seegangs deutlicher. In Bild 45 ist dies für die Zeiträume von Mai bis August mit eher niedrigem Seegang und von September bis Dezember mit mehreren stärkeren Stürmen dargestellt. Der stärkere Seegang führt zu einer erhöhten Erosion im Küstenvorfeld und den angrenzenden Bereichen des Tidebeckens. Dafür erhöht sich die Sedimentation entlang der Binnenküste und im Vortrapp- und Hörnumtief.



*Bild 45: Änderung des Sedimentvolumens in m<sup>3</sup> für verschiedene Bilanzierungspolygone im Fokusgebiet für die Zeiträume 1.5.2010 – 1.8.2010 (links) und 1.9.2010 – 1.12.2010 (rechts).*

Analysiert man die Flüsse des Geschiebetransports zwischen den Kontrollvolumen, lassen sich daraus grundlegende Transportpfade für das Gebiet ableiten. Diese sind in Bild 46 dargestellt. Entlang der westlichen Küste findet ein Transport in südlicher Richtung auf die Theeknobsände und entlang der Hörnum Odde statt. An der südlichen Spitze der Odde wirkt dann der Ebbstrom diesem Transport entgegen und das Material wird zum Teil auf die Theeknobsände geschoben. Von den Sänden gelangt das Sediment dann in das Vortrapptief und wird dort sowohl in Richtung Ebbdeltaals auch weiter in das Tidebecken hinein transportiert. Östlich vom Vortrapptief findet Geschiebetransport nach Osten in das Tidebecken statt. Auch von hier gelangt Material in die tieferen Bereiche des Vortrapp- und des Hörnumtiefs.

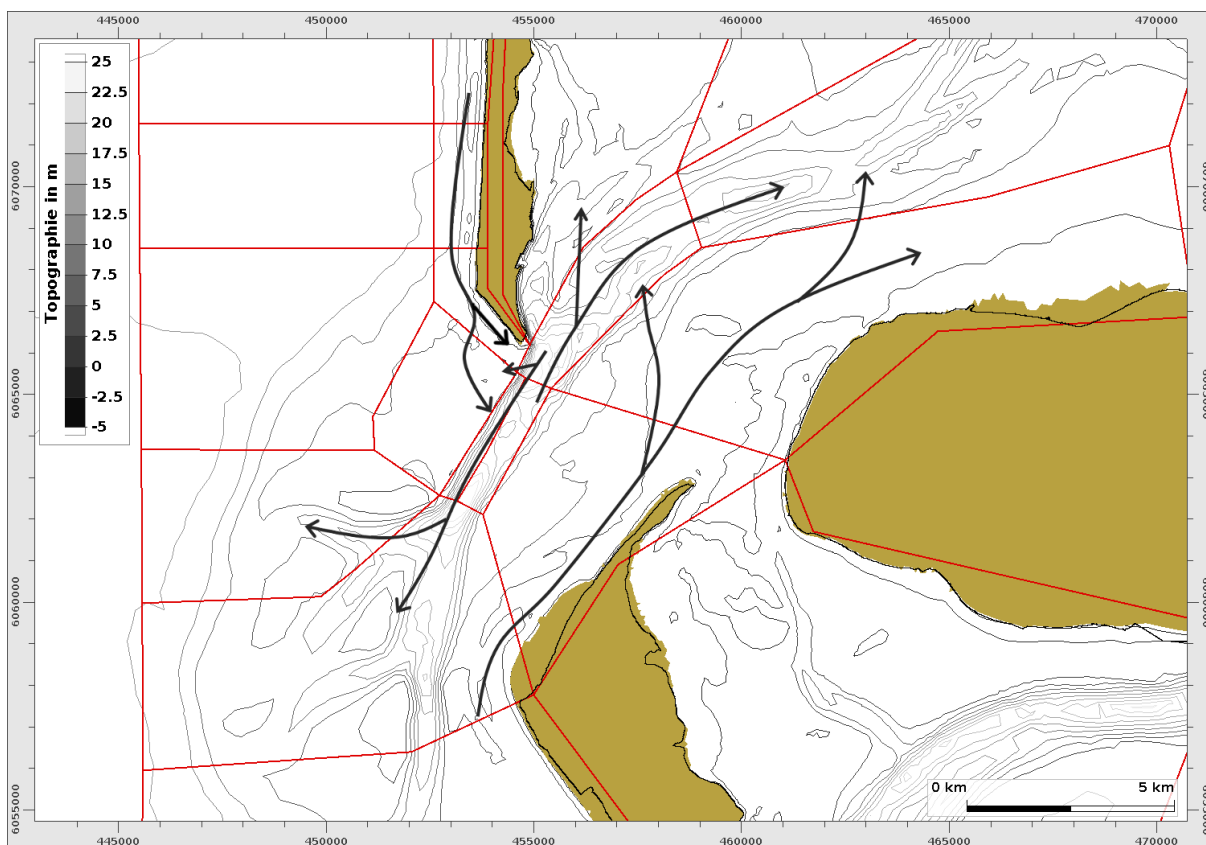


Bild 46: Qualitative Beschreibung der Pfade des Geschiebetransports für das Fokusgebiet.

Diese Ergebnisse sind konsistent mit den Analysen zu den Einflüssen der Tidedynamik und des See- gangs auf die Verteilung der Bodenschubspannung.

## 4.2 Modellierung einer Sandaufspülung

### 4.2.1 Untersuchungskonzept

Aufbauend auf dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Modellzustand wird die Simulation einer Sandaufspülung im Vorstrandbereich von Hörnum durchgeführt und die Ausbreitung des eingebrachten Sediments analysiert. Die Vorspülung erfolgt im Modell Mitte Juni 2010 und danach wird bis zum Ende des Jahres simuliert.

Um die Ausbreitung von Sedimenten, die im westlichen Vorstrand von Sylt eingebracht werden, besser zu verstehen, wird in Anlehnung an eine reale Sandaufspülung vom Sommer 2017 ein Modellsetup konzipiert, das diese möglichst gut abbilden soll. Es werden  $400.000\text{ m}^3$  Sand auf eine Fläche von ca.  $0,6\text{ km}^2$  eingebracht. Die Lage des Vorspülbereiches ist in Bild 47 zu sehen. Der Vorspülvorgang wird entlang von fünf Reihen, die eine Nord-Süd-Ausrichtung haben, durchgeführt. Mit zunehmender Entfernung zur Küste wird mehr Sediment vorgespült.

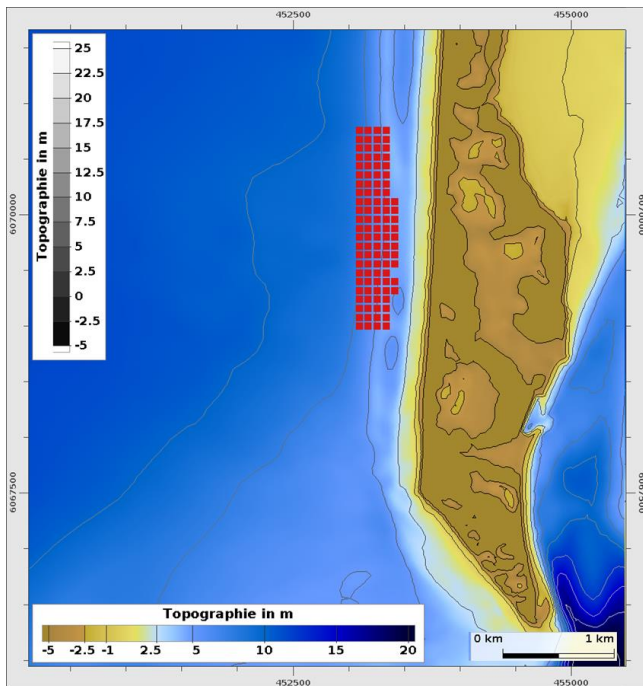


Bild 47: Lage des Bereiches der Sandaufspülung vom Sommer 2017.

Die Vorspülung erfolgt mit einem Hopperbagger. Bei diesem Vorgang fällt ein hochkonzentriertes Sediment-Wassergemisch mit hoher vertikaler Geschwindigkeit durch die Wassersäule und breitet sich nach dem Auftreffen auf dem Boden größtenteils horizontal aus. Je nach Zusammensetzung des Sediments kann auch eine leichte Verdriftung stattfinden. Einzelne Verbringvorgänge werden im Modell jedoch nicht umgesetzt. Stattdessen wird über einen Zeitraum von einer Woche ein räumlich variables, hochkonzentriertes Sediment-Wassergemisch in die Wassersäule eingeleitet. Dort unterliegt das eingebrachte Sediment dann den dort vorherrschenden Transportbedingungen. Ein Großteil deponiert aufgrund der Sinkgeschwindigkeit im Nahbereich und wird von dort durch Seegang und Strömung resuspendiert und mit der Strömung verfrachtet.

Die räumliche Variabilität ähnelt der realen Maßnahme, bei der ebenfalls mit zunehmender Entfernung zur Küste mehr Sediment eingebracht wurde. Das im Modell vorgespülte Sedimentvolumen pro Reihe ist in Tabelle 6 zu sehen. In der Summe werden  $407.600\text{m}^3$  Sediment erreicht. Dies entspricht dem Wert der realen Vorspülung.

Tabelle 6: Im Modell vorgespültes Sedimentvolumen in  $\text{m}^3$ .

Reihe 1	Reihe 2	Reihe 3	Reihe 4	Reihe 5
151049	140113	80990	29656	5795

Das vorgespülte Sediment wird im Modell als separate Fraktion verwaltet. Dies ermöglicht eine gute Verfolgung ihrer Ausbreitung sowie eine problemlose Bilanzierung. Die Sedimentmengen werden schnell eingemischt und unterliegen den gleichen Transportbedingungen wie die aus dem anfänglichen Sedimentinventar stammenden Fraktionen. Die verwendeten Sedimentfraktionen können dabei sowohl als Geschiebe und in Suspension transportiert werden. Der Geschiebetransport findet dabei



bevorzugt statt. Bei ausreichend hohen Bodenschubspannungen kann das Sediment dann zusätzlich erodiert werden und in Suspension gelangen.

Die Untersuchung wird mit zwei unterschiedlichen Fraktionen durchgeführt. Eine Fraktion mit einem Korndurchmesser von 100 µm und einer Sinkgeschwindigkeit von 7 mm/s sowie eine andere mit einem Korndurchmesser von 200 µm und einer Sinkgeschwindigkeit von 22 mm/s. Diese Korndurchmesser sind geringer als das Material, was in dieser Gegend üblicherweise für solche Maßnahmen zur Verfügung steht und einen mittleren Korndurchmesser um 400 µm aufweist. Aus modelltechnischen Gründen ist dies im Modell nicht möglich, da die hohen Sinkgeschwindigkeiten der Mittelsandfraktion einen so kleinen Zeitschritt erfordern, dass die Simulationen nicht in einem annehmbaren Zeitraum durchgeführt werden können. Der verwendete Ansatz ermöglicht aber dennoch Aussagen über grundsätzliche Transportpfade von eingebrachtem Sediment.

#### **4.2.2 Ergebnisse**

Wie stark und wie weit sich das Sediment ausbreitet, hängt stark von den Sediment- und Transporteigenschaften der verwendeten Sedimentfraktionen ab. Hier ist besonders von Bedeutung, wie leicht das Sediment suspendiert und wie schnell es wieder deponiert wird. Um die Ausbreitungspfade in einem derzeit realisierbaren Simulationszeitraum entdecken zu können, wurde daher mit einer sandigen Fraktion gerechnet, die aufgrund der Sinkgeschwindigkeit von 7 mm/s, beziehungsweise 22 mm/s zwar schnell deponiert wird, aber auch leichter erodiert und auch in Suspension transportiert werden kann.

In Bild 48 ist die Ausbreitung der Sedimentfraktion am Ende des Simulationszeitraums zu sehen. Zwischen diesem Zeitpunkt und dem Vorgang der Vorspülung liegen ca. fünf Monate. Das Material breitet sich zuerst küstennah hauptsächlich nach Süden aus und gelangt entlang der Hörnumer Odde und über Theeknobsand in das Vortrapptief. Dort bleibt es hauptsächlich am westlichen Schütthang liegen. Eine weitere Ausbreitung des Sediments erfolgt von hier mit der Tideströmung sowohl in das Ebbdelta als auch in das Tidebecken. Die Transportpfade entsprechen also den in Bild 46 skizzierten.

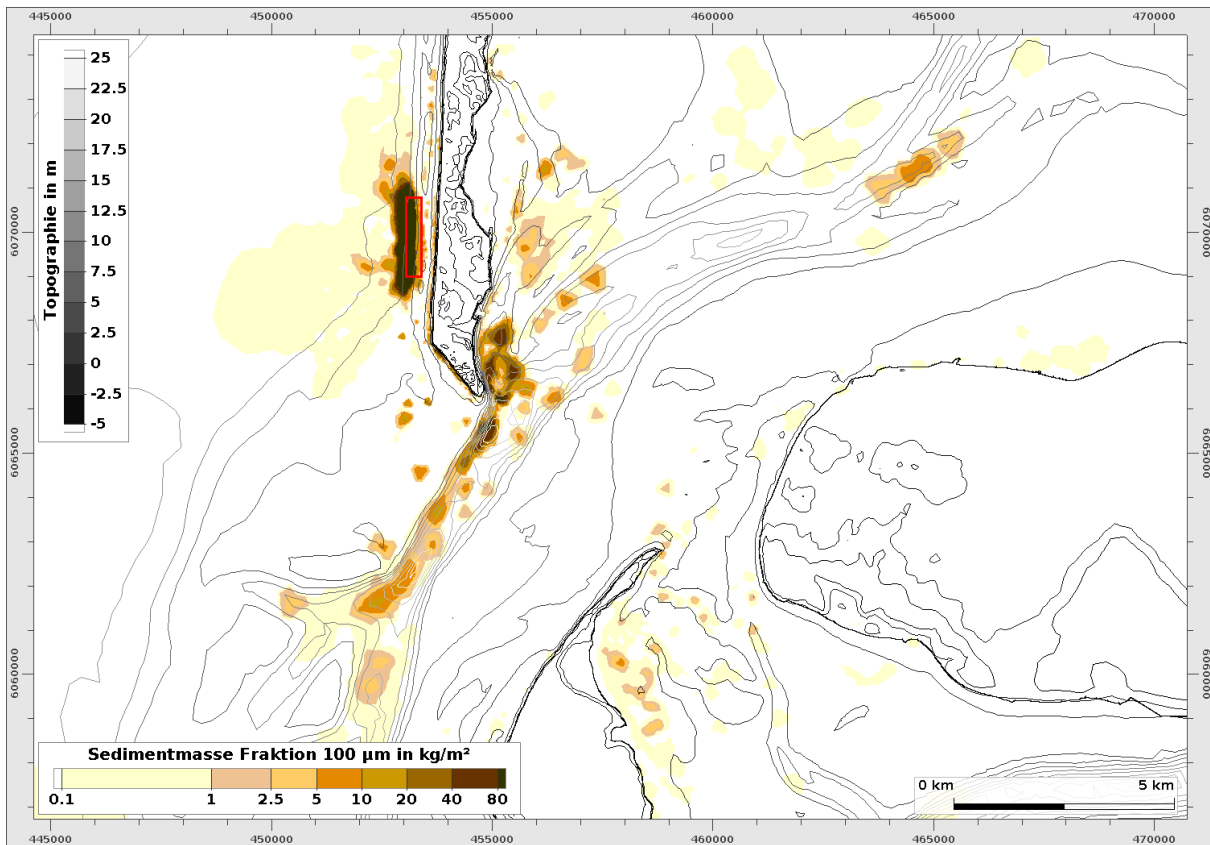


Bild 48: Verteilung der Sedimentmasse der Fraktion 100 µm am Ende des Simulationszeitraums in kg/m<sup>2</sup> (logarithmische Skalierung).

Weiterhin findet im Modell eine Verlagerung des Vorspülkörpers von der Küste weg statt. Diese Entwicklung ist in Bild 49 zu sehen. Vor allem der Teil des eingebrachten Sediments, der auf dem höhergelegenen Teil des Riffs liegt, wird abgetragen. Dort werden ansatzweise die gleichen Tiefen wie zu Beginn der Simulation erreicht. Die dem Meer zugewandte Seite ist stabiler und hier kommt es am westlichen Ende des Transekts zu einem leichten Anwachsen der Sohle.

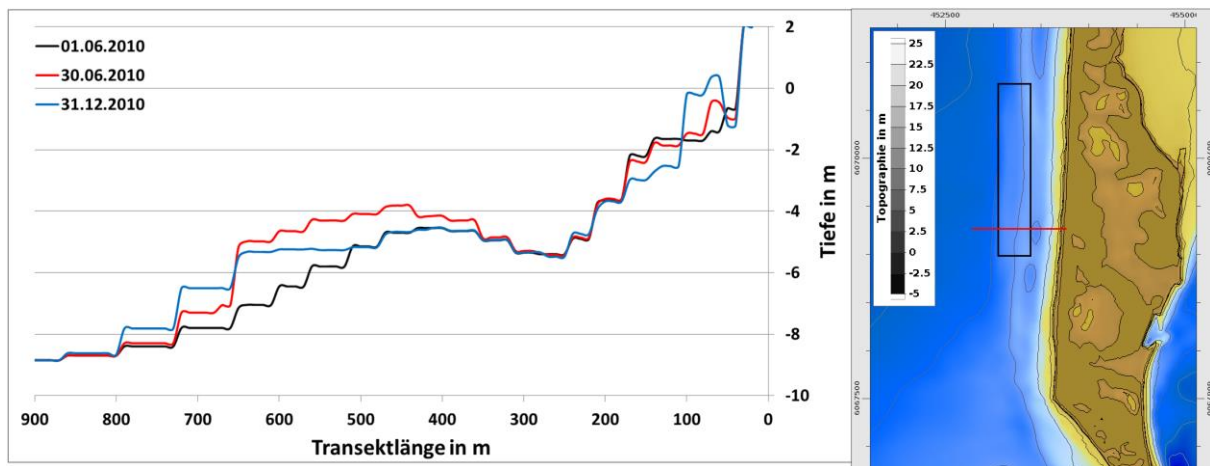


Bild 49: Topographie entlang eines Querprofils durch den Vorspülkörper zu drei verschiedenen Zeitpunkten.

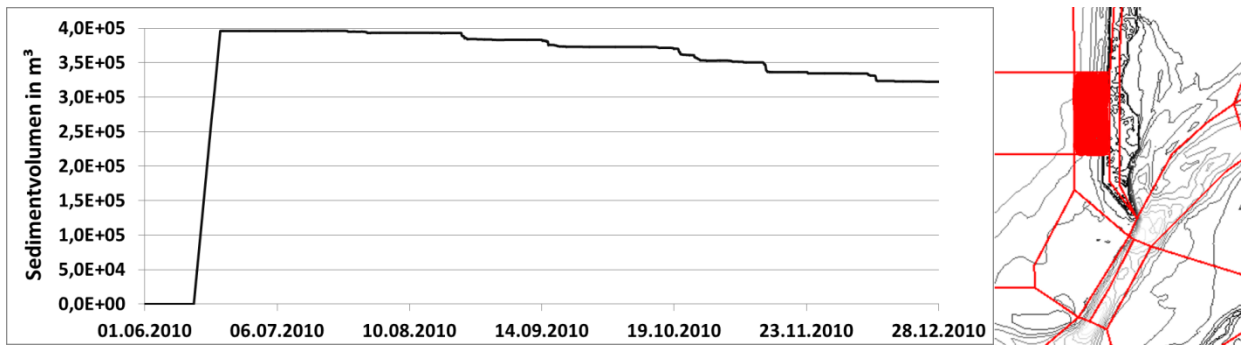


Bild 50: Entwicklung des Sedimentvolumens der vorgespülten Sedimentfraktion 100 µm in m³ im Bilanzierungspolygon des Vorspülkörpers.

Zum Ende des Simulationszeitraumes befinden sich immer noch ca. 80 % des vorge spülten Materials in der näheren Umgebung der Maßnahme. Größere Änderungen treten sprunghaft auf und gehen mit starkem Seegang einher, der das Material mobilisiert. Unter normalen Bedingungen, wenn das Sediment vorwiegend als Geschiebe transportiert wird, ist der Vorspülkörper recht stabil.

Wie das Material, das mobilisiert wird, quantitativ verteilt wird, ist Tabelle 7 zu entnehmen. Ca. 60 % des mobilisierten Sediments gelangen bis in das Tidebecken. Etwas über 30 % verbleiben in den tieferen Bereichen des Vortrapp- und des Hörnumtiefs und weitere 25 % in den flacheren Bereichen östlich von Sylt. Ein kleiner Teil bleibt auch auf den Wattflächen zwischen Amrum und Föhr liegen.

Etwas über 10 % landen am Schütthang und dem angrenzenden Teil des Vortrapptiefs, während ca. weitere 10 % bis hinaus in das Ebbdelta transportiert werden.

Generell lässt sich somit festhalten, dass der eingebrachte Sand lokal auftretende Transportprozesse unterstützt und dazu beiträgt, Defizite auszugleichen und dem Sedimenteintrag in das Wattenmeer zugutekommt.

Tabelle 7: Prozentuale Verteilung des mobilisierten Sediments nach 5 Monaten für verschiedene Bilanzierungspolygone.

Hörnumtief West	25	
Tidebecken Sylt	25	
Ebbdelta	8	
Schütthang	7	
Hörnumtief Ost	6	
Amrum Föhr	5	
Vortrapptief	5	
Küstenvorfeld Vorspülbereich	3	
Ebbdelta Amrum	3	
Hörnum West	2	
Theeknobs	2	

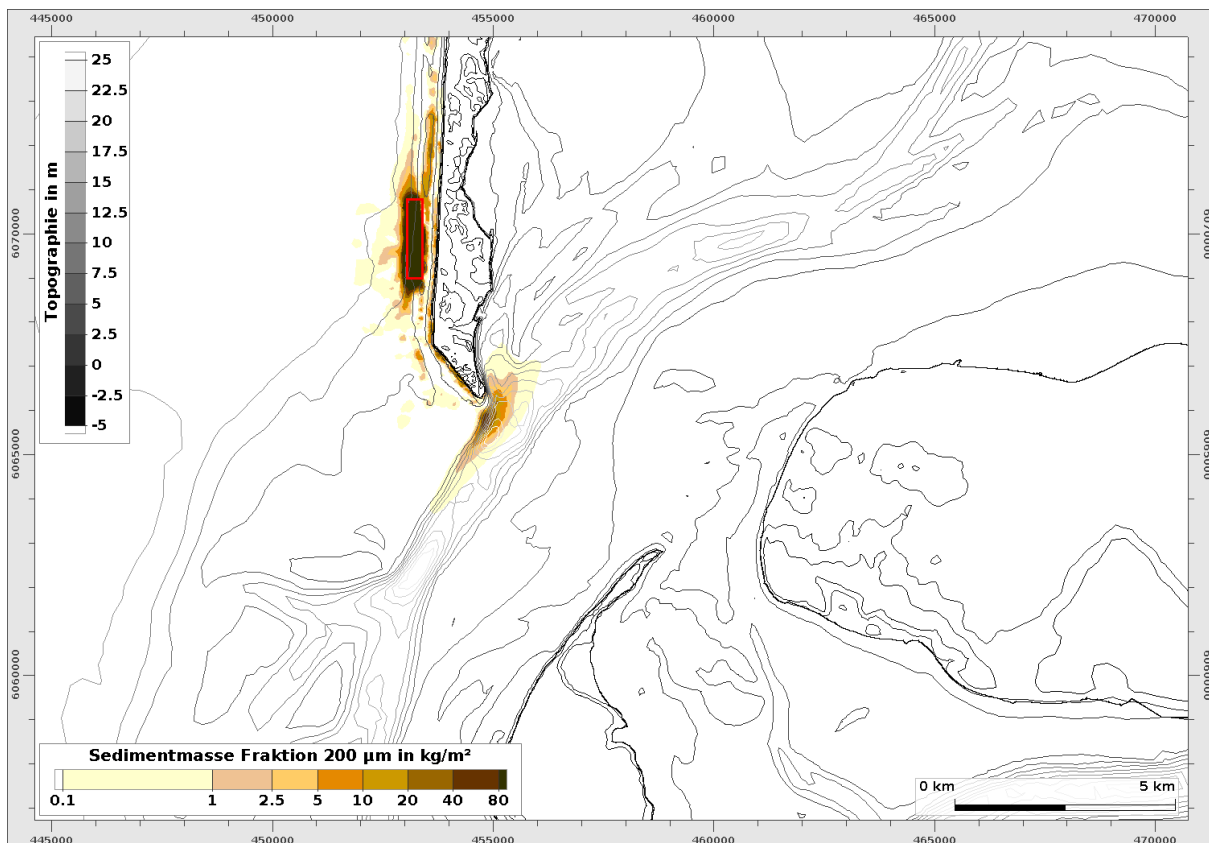


Bild 51: Verteilung der Sedimentmasse der Fraktion 200 µm am Ende des Simulationszeitraums in kg/m<sup>2</sup> (logarithmische Skalierung).

Für die gröbere Sedimentfraktion mit einem Korndurchmesser von 200 µm fällt auf, dass die Ausbreitung hier geringer ist (Bild 51). Das Sediment erfordert mehr Energie, um in Suspension zu gelangen und sinkt dann auch deutlich schneller wieder ab. Hier reicht die turbulente Energie nicht aus, um der höheren Sinkgeschwindigkeit entgegenzuwirken.

Eine wichtige Gegengröße zum Absinken des mobilisierten Sandes ist die Turbulenz in der Wassersäule. Diese wird durch starken Seegang erhöht und wirkt einem Absinken des Sediments entgegen. Diese Wechselwirkung ist noch nicht im Modell enthalten. Unter Berücksichtigung dieses Effekts ist es möglich, dass der eingebrachte Sand auch vermehrt auf die Wattflächen gelangen kann.

Ein Aspekt, der in diesem Projekt nicht berücksichtigt wurde, ist die Bedeutung von feineren Sedimenten für das Wattenmeer. So kann es sinnvoll sein, nicht nur das Einbringen sandiger Sedimente zu untersuchen, sondern auch das feinerer Schlufffraktionen. Die feinen Sedimentfraktionen sind für das Wachsen eines stabilen Bodens notwendig. Feinsedimente werden in der Deutschen Bucht entlang der Küste nach Osten und später dann nach Norden transportiert. Die Ästuarie fungieren entlang dieses Transportpfades als Sedimentsenken. Ein Defizit von Feinsedimenten wird sich langfristig negativ auf den Erhalt der Funktion des Wattenmeeres auswirken. Hier herrscht Forschungsbedarf.

### 4.3 Klimaszenarien

#### 4.3.1 Untersuchungskonzept

Zu den Auswirkungen, die der Klimawandel auf die Hydro- und Morphodynamik des Gebietes haben könnte, werden vier Szenarien gerechnet, die aus der Wattenmeerstrategie 2100 (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, 2015) entnommen sind. Berücksichtigt werden dabei ein Anstieg des Meeresspiegels und Änderungen in der Topographie. Die Annahmen für die einzelnen Szenarien sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Annahmen für den Anstieg des Meeresspiegels und das Wachstum der Wattflächen für verschiedene Klimaszenarien.

	Szenario	Meeresspiegelanstieg in cm	Wachstum der Wattflächen in cm
Mitte des Jahrhunderts	gemäßigt (M50)	20	20
	gesteigert (G50)	30	25
Ende des Jahrhunderts	gemäßigt (M100)	50	50
	gesteigert (G100)	80	50

Für die Änderungen der Topographie werden die Wattflächen in der gesamten Deutschen Bucht einheitlich um den jeweiligen Wert angehoben. Es wird die Annahme getroffen, dass das für dieses Wachstum benötigte Sediment aus der Erosion des Küstenvorfeldes und der Ebbdeltas stammt. Dafür werden den einzelnen Wattflächen bestimmte Bereiche im Küstenvorfeld zugewiesen und diese werden dann in solch einem Maße abgesenkt, dass die Volumen zu dem Anstieg der Wattflächen passen (Bild 52).

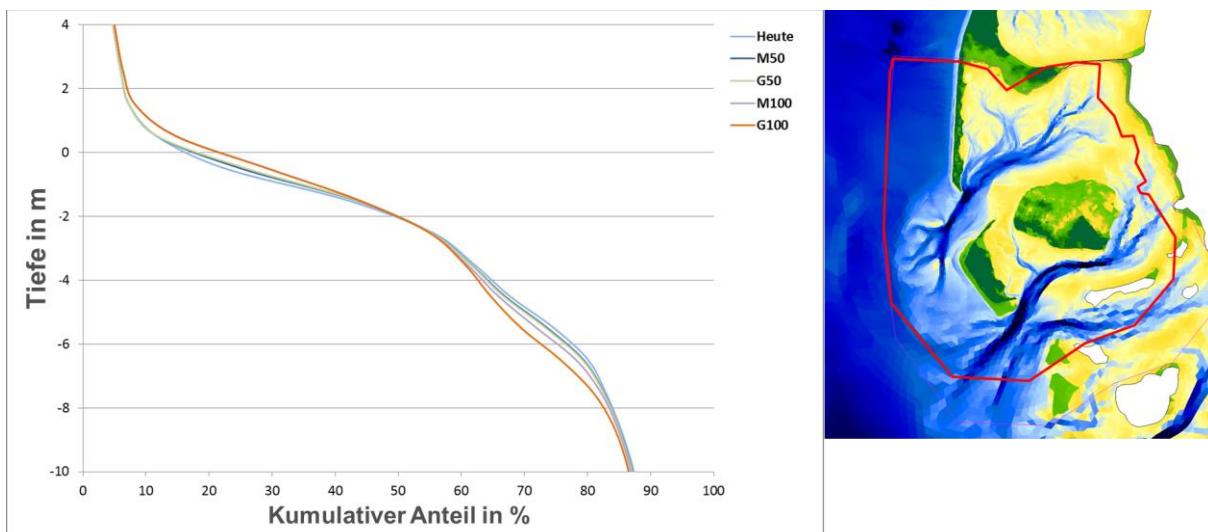


Bild 52: Hypsometrische Kurven des Hörnummer Tidebeckens und des Küstenvorfeldes für die Klimaszenarien der Wattenmeerstrategie 2100.

Diese Annahmen werden prinzipiell von den Ergebnissen des Referenzzustandes bestätigt. In Bild 39 ist zu erkennen, dass es zu Erosion entlang der Küstenvorfelder kommt. Die Wattflächen wachsen hier aber nicht gleichmäßig an. Der Großteil des Wachstums erfolgt auf den Wattflächen entlang der Binnenküste.

Der großräumige Sedimenteintrag in die Deutsche Bucht und wie sich diese Verfügbarkeit von zusätzlichem Sediment auf diese Änderungen auswirken kann, wird bei diesen Untersuchungen nicht berücksichtigt.

Mit diesen Änderungen wird jeweils der Zeitraum von einem Jahr simuliert. Die verwendeten Randwerte für den seeseitigen Wasserstand, den Wind und das Oberwasser entsprechen dem Jahr 2010 (s. Kapitel 2.3.3). Der Meeresspiegelanstieg ist im seeseitigen Wasserstand enthalten und wird im übergeordneten Dutch Continental Shelf Model DCSMv6FM mitgerechnet.

### 4.3.2 Auswirkungen auf die Hydrodynamik

Bei der Betrachtung der Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs in Kombination mit Änderungen der Topographie, wie sie in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschrieben sind, zeigen sich die in

Tabelle 9 gelisteten Unterschiede im Tidenhub. Sowohl die beiden Szenarien für die nahe als auch für die ferne Zukunft liefern hierbei sehr ähnliche Ergebnisse. In den Szenarien M50 und G50 kommt es zu einem Anstieg des mittleren Tidenhubs am Pegel Hörnum-Hafen von ca. 4 cm und in den Szenarien M100 und G100 steigt dieser um 10 cm an.

In Tabelle 10 ist für das Szenario G100 aufgeschlüsselt, wie sich diese Änderungen im Tidenhub zusammensetzen. Der Anstieg des Tidenhubs wird primär durch einen relativ zum Meeresspiegelanstieg stärkeren Anstieg des Tidehochwassers ausgelöst. Dieser Effekt verstärkt sich mit dem Fortschreiten der Tidewelle in das Hörnumer Tidebecken. Das Tideniedrigwasser bleibt dabei relativ konstant.

*Tabelle 9: Differenz des mittleren Tidenhub der Klimaszenarien zum Referenzzustand in m für einen Nipp-Spring Zyklus an drei verschiedenen Positionen im Fokusgebiet.*

	Vortrapptief	Hörnum-Hafen	Hörnumtief
Szenario M50	0,04	0,03	0,06
Szenario M100	0,09	0,10	0,15
Szenario G50	0,04	0,04	0,08
Szenario G100	0,08	0,10	0,14

*Tabelle 10: Differenz des mittleren Tideniedrigwassers und des mittleren Tidehochwassers zwischen dem Referenzzustand und dem Szenario G100 an drei verschiedenen Positionen im Fokusgebiet.*

	Vortrapptief	Hörnum-Hafen	Hörnumtief
Differenz TnW in m	- 0,77	- 0,77	- 0,76
Differenz ThW in m	- 0,84	- 0,87	- 0,89

In Bild 53 ist für einen Ort im Vortrapptief zu sehen, dass sich zusätzlich zu diesen Änderungen auch die Eintrittszeit des Tideniedrigwassers verändert und dieses im Szenario G100 früher eintritt. Das ist auch in den höheren Strömungsgeschwindigkeiten während der Ebbephase zu sehen, während die Strömungsgeschwindigkeiten während der Flutphase etwas abnehmen. Die Eintrittszeit des Tidehochwassers ändert sich dabei kaum. Dies führt dazu, dass die Dauer der Ebbe abnimmt und die der Flut zunimmt.

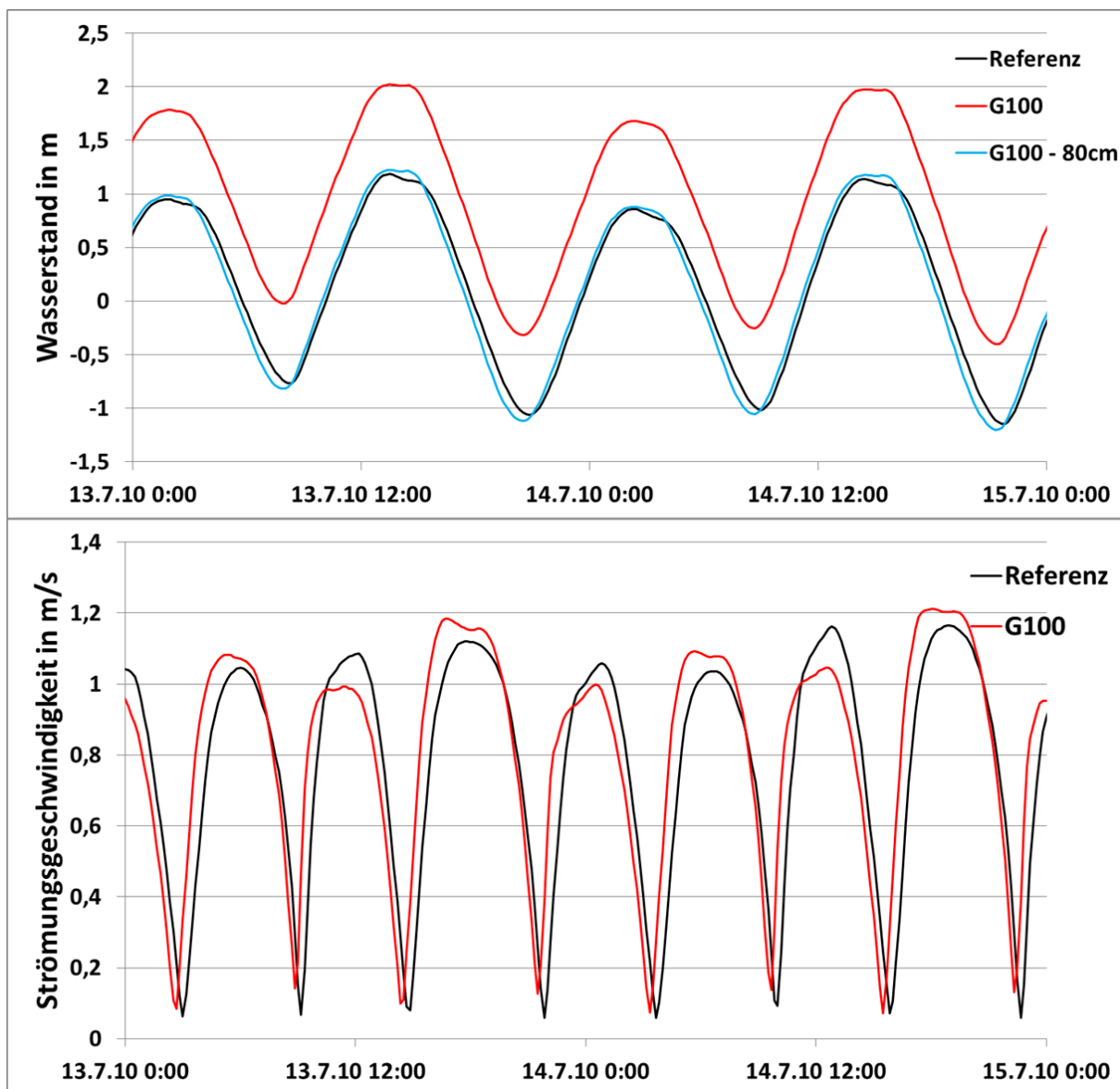


Bild 53: Oben: Vergleich des Wasserstands für zwei Tiden zwischen dem Referenzzustand (schwarz) und dem Szenario G100 (rot) an einem Punkt im Vortrapptief. Vom Szenario G100 wurden zusätzlich 80 cm subtrahiert (blau), um die Änderungen in der Tidekurve hervorzuheben. Unten: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten für zwei Tiden zwischen dem Referenzzustand (schwarz) und dem Szenario G100 (rot) an einem Punkt im Vortrapptief.

Aufgrund der größeren Wassertiefen bei einem Meeresspiegelanstieg, die durch die angenommene Erosion im Küstenvorfeld und Ebbdelta dort noch verstärkt werden, ändert sich die Energiedissipati-

on der Tidewelle. Die Dissipation der Tideenergie findet hauptsächlich über die Reibungswirkung des Bodens statt. Dieser Effekt ist während der Ebbe stärker ausgeprägt, da hier der Anstieg des Meeresspiegels relativ zur vorherrschenden Wassertiefe größer ist. Als Folge kann das Wasser während der Ebbe schneller aus dem Tidebecken auslaufen und die Ebbedauer verkürzt sich. Da sich die Dauer einer Tide aber nicht ändert, verlängert sich als Ausgleich die Dauer der Flutphase und das Wasser strömt langsamer in das Tidebecken.

Dies führt im Vortrapptief zu einer Stärkung des Ebbstroms relativ zum Flutstrom. Der tidebedingte Transport von Sedimenten in das Ebbdelta kann sich dadurch prinzipiell erhöhen. Wie die Analysen zu den Bodenschubspannungen in Kapitel 4.1.4 gezeigt haben, werden größere Umlagerungen in diesem Bereich aber maßgeblich vom Seegang geprägt.

Eine weitere wichtige Auswirkung des steigenden Meeresspiegels ist eine Zunahme der Überflutungsdauern auf den Wattflächen. Diesem Effekt würde ein Mitwachsen der Wattflächen entgegenwirken. Normalerweise würden sich die Wattflächen zusammen mit der Küstenlinie weiter landeinwärts verlagern. Durch die feste Deichlinie ist dies an der deutschen Nordseeküste aber nur begrenzt möglich. In Bild 54 und Bild 55 sind die Überflutungsdauer für den Referenzzustand und die Änderungen durch Meeresspiegelanstieg und Wachstum der Wattflächen zu sehen. Die Wattbereiche zwischen Amrum und Föhr sowie Föhr und dem Festland sind unter heutigen Bedingungen bis zu 50 % der Zeit während einer Tide überflutet. Das entspricht ca. 350 bis 400 Minuten. In den Szenarien M50, M100 und G50 liegen die Änderungen maximal bei Werten um die 30 Minuten, da hier angenommen wurde, dass die Wattflächen größtenteils mit dem Meeresspiegel mitwachsen. Beim Szenario G100 bleiben die Wattflächen jedoch teilweise deutlich länger überflutet. Hier können die Differenzen bis zu 120 Minuten pro Tide betragen.



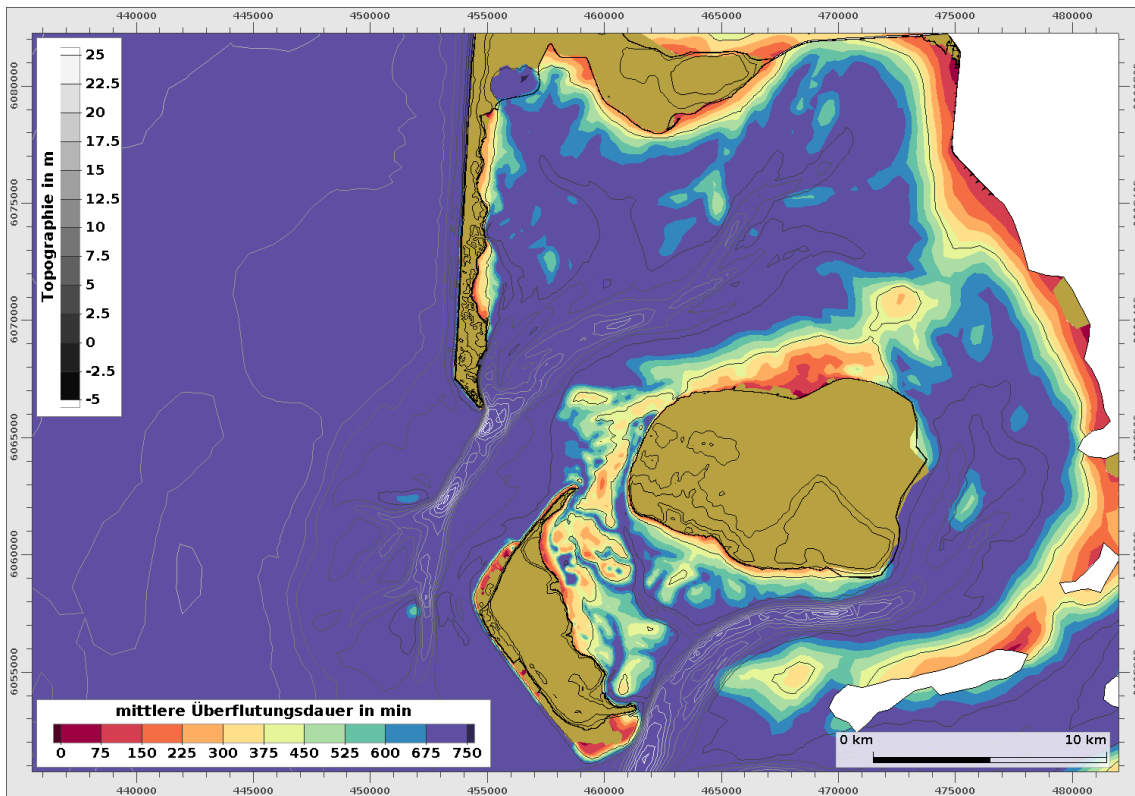


Bild 54: mittlere Überflutungsdauer in Minuten während einer Tide im Referenzzustand für das Hörner-Tidebecken.

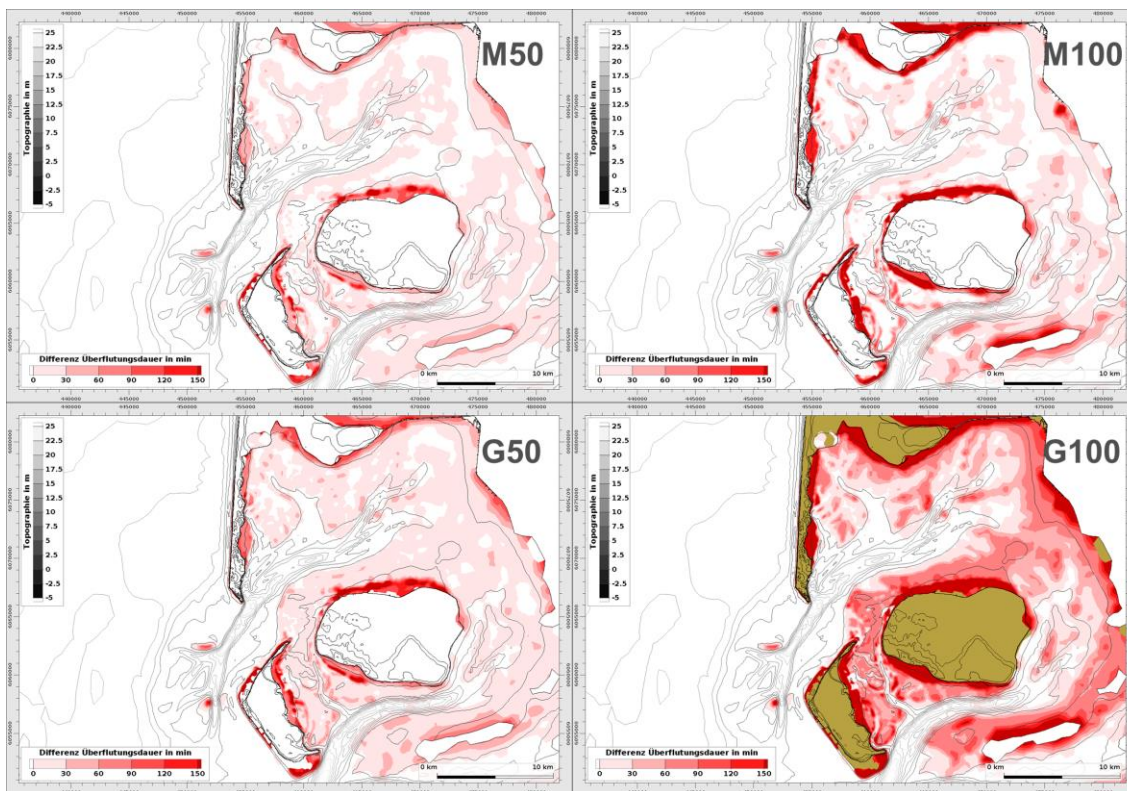


Bild 55: Differenzen der Überflutungsdauern der Klimaszenarien im Vergleich zum Referenzzustand in min. Rote Bereiche bedeuten eine längere Überflutungsdauer in den Klimaszenarien.

### 4.3.3 Auswirkungen auf den Seegang

Die Wirkung des Seegangs auf die Küsten wird selbst bei ansonsten gleichbleibenden Windbedingungen durch einen Meeresspiegelanstieg verstärkt. Durch die größeren Wassertiefen kommt der einlaufende Seegang erst später mit dem Meeresboden in Kontakt und ist so noch energiereicher, wenn er den Vorstrandbereich und die Strände erreicht. Durch die Annahme, dass die Außenküste mitsamt Vorstrandbereich erodiert und damit die Wassertiefen zunehmen, wird dieser Effekt noch verstärkt. Die Änderungen sind vor allem im Bereich des Ebbdeltas, des Vortrapptiefs und der westlichen Küsten von Sylt und Amrum zu erkennen. Im Szenario G100 treten in diesen Bereichen bis zu 10 % weniger Wellenhöhen zwischen 0 und 1 m auf (Bild 56). Dafür sieht man einen Anstieg von Wellenhöhen zwischen 1 und 2 m von bis zu 10 % (Bild 57) und ebenfalls einen leichten Anstieg von Wellenhöhen zwischen 2 und 5 m von bis zu 4 % (Bild 58). Im Tidebecken selber ist keine Zunahme von höheren signifikanten Wellenhöhen zu beobachten. Die Zunahme, die für diesen Bereich bei Wellenhöhen zwischen 0 und 1 m in Bild 56 zu sehen ist, ist darauf zurückzuführen, dass durch die längere Überflutungsdauer der Wattflächen im Modell an mehr Zeitpunkten Werte für die Wellenhöhe berechnet werden können. Durch die größeren Wassertiefen in der Deutschen Bucht verliert der Seegang auf dem Weg zu den Küsten also weniger Energie als bisher und trifft mit größeren Wellenhöhen auf die flacheren Bereiche entlang der Küsten und der Ebbdeltas, die dadurch einem größeren Energieeintrag ausgesetzt sind. Wenn, wie in den Topographieänderungen der Szenarien angenommen, über die Zeit diese Bereiche erodieren, erhöhen sich die Wassertiefen zusätzlich. Als Folge können in diesen Gebieten die Bodenschubspannungen und somit auch morphodynamische Aktivität abnehmen und die Seegangenergie wirkt verstärkt direkt an den Küsten oder tiefer in die Tidebecken hinein.

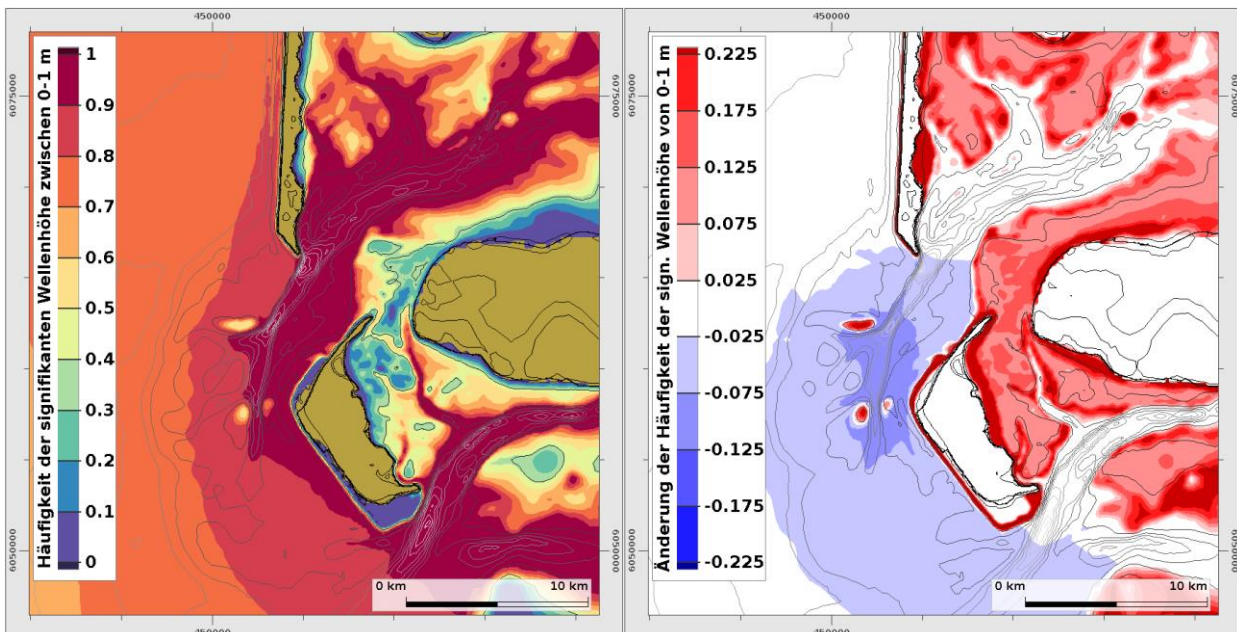


Bild 56: Häufigkeit der signifikanten Wellenhöhe für das Jahr 2010 für die Klasse 0 – 1 m für den Referenzzustand (linke Seite) und die Änderungen für das Szenario G100 (rechte Seite).

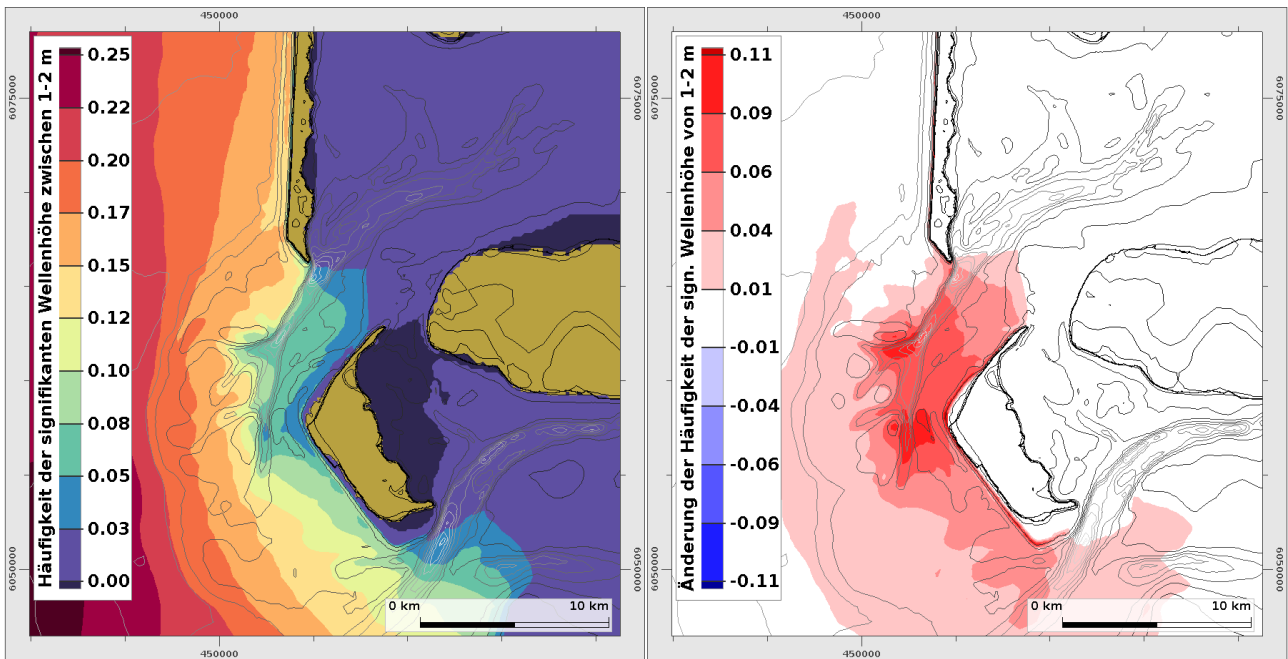


Bild 57: Häufigkeit der signifikanten Wellenhöhe für das Jahr 2010 für die Klasse 1 - 2 m für den Referenzzustand (linke Seite) und die Änderungen für das Szenario G100 (rechte Seite).

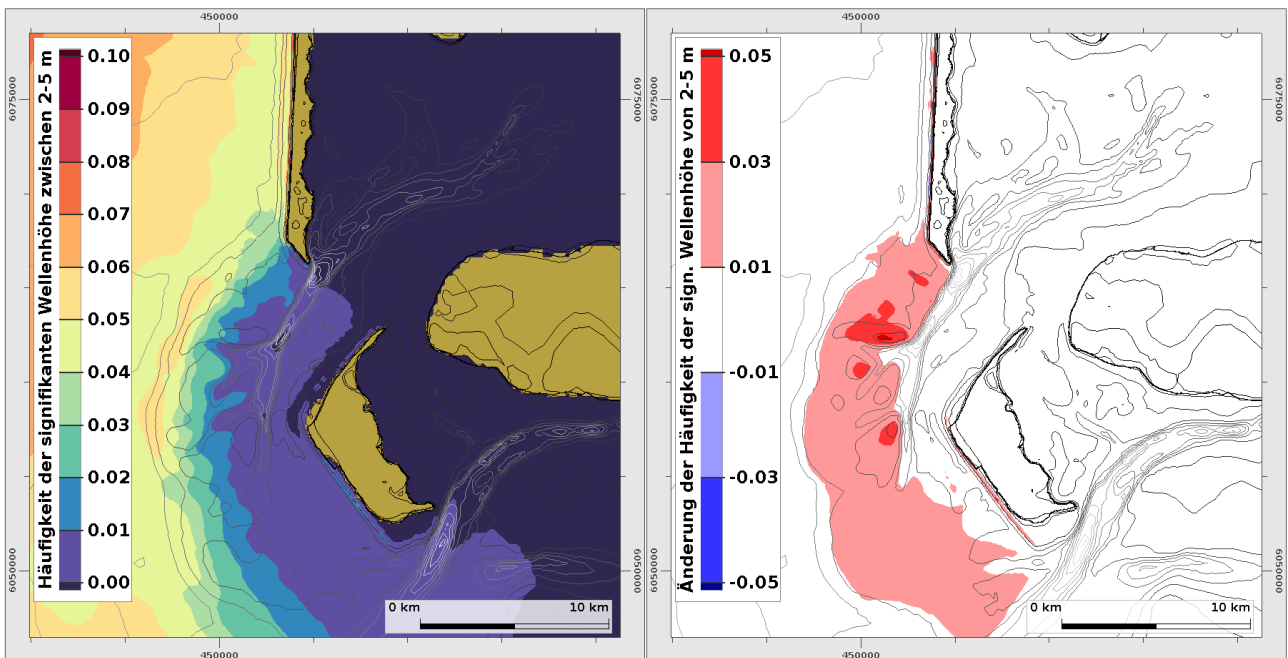


Bild 58: Häufigkeit der signifikanten Wellenhöhe für das Jahr 2010 für die Klasse 2 - 5 m für den Referenzzustand (linke Seite) und die Änderungen für das Szenario G100 (rechte Seite).

#### 4.3.4 Auswirkungen auf die Morphodynamik

Die mit dem Klimawandel angenommenen Veränderungen führen zu einem stärkeren Sedimenteintrag in das Hörnumertidebecken. Dieser Effekt tritt in erster Linie durch eine stärkere Wirkung von Ereignissen mit erhöhtem Seegang auf. Der in Kapitel 4.3.3 beschriebene Zunahme des Seegangs vor

allein im Bereich des Ebbdeltas und der Küste von Amrum führt zu einer verstärkten Mobilisierung von Sedimenten, die dann in das Tidebecken transportiert werden (Bild 59).

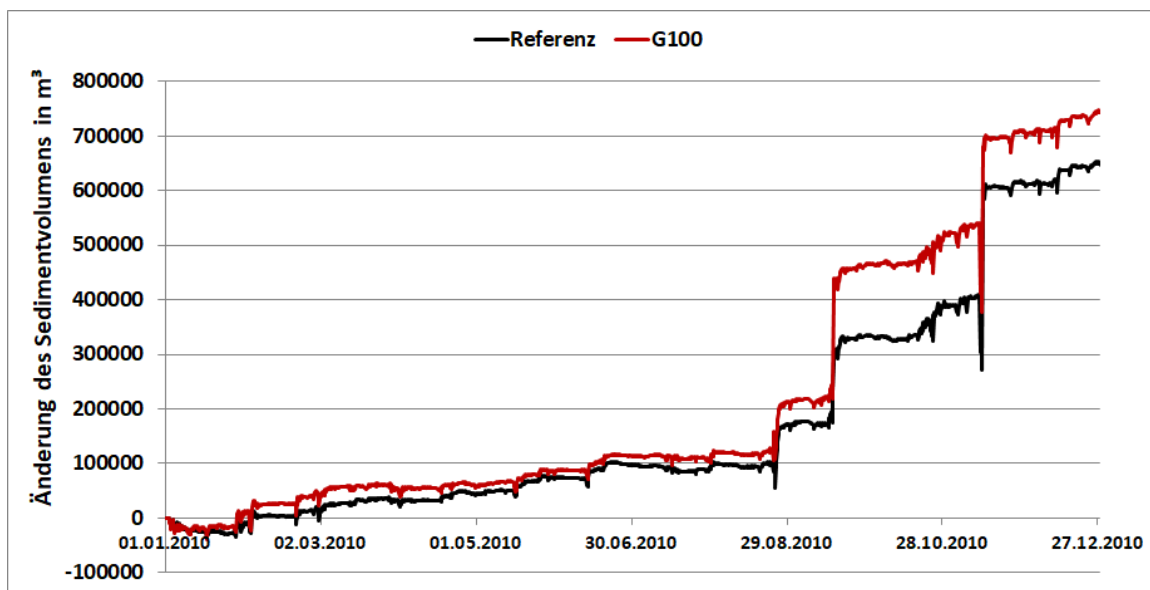


Bild 59: Entwicklung der Änderung des Sedimentvolumens für das Hörnum Tidebecken für den Referenzzustand und das Szenario G100 über den Zeitraum von einem Jahr.

Für die Änderungen in der morphologischen Entwicklung ist es vor allem von Bedeutung, wie sich die Topographie an die sich ändernden Bedingungen anpassen wird. Hier kann das Modell nur begrenzt Auskunft geben, da hierbei großräumige Sedimenttransportprozesse wie der Eintrag von Sedimenten in die Deutsche Bucht eine wichtige Rolle spielen. Für das Mitwachsen der Wattflächen sind große Mengen an Sediment erforderlich. Woher diese kommen, ist aktuell noch Stand der Forschung. Die bislang durchgeführten Studien ermöglichen keine Auskunft, ob ein Mitwachsen bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg in einem ausreichendem Maß möglich ist, um das Wattenmeer in seinem heutigen Umfang zu erhalten.

Studien der BAW, die im Rahmen des Expertennetzwerks (Nilson et al, 2019) durchgeführt werden, zeigen, dass ein Anstieg des Meeresspiegels in den Tiderinnen entlang der Deutschen Bucht meistens zu einer Stärkung des Flutstroms im Vergleich zum Ebbestrom führt. Diese Zunahme bedeutet, dass potentiell mehr Energie für einen Sedimenteintrag in die Tidebecken zur Verfügung steht und somit ein Mitwachsen der Wattflächen mit dem Meeresspiegel fördert.

Das Hörnum Tidebecken stellt jedoch eine Ausnahme dar. Hier wird durch einen Meeresspiegelanstieg vor allem im äußeren Teil des Vortrapptiefs der Ebbestrom gestärkt. Erst im Hörnumtief kommt es zu einer Zunahme der Flutstromdominanz. Der Sedimenteintrag in das Tidebecken ist stärker vom Seegang abhängig als dies in anderen Tidebecken der Fall ist.

Betrachtet man die bei den Szenarien angenommene Quelle der Küstenvorfelder und der Ebbdeltas, so ergibt sich die Frage, wann und ob sich ein neues Gleichgewicht einstellt. Ein Anstieg des Meeresspiegels in Kombination mit Erosion in diesen Bereichen führt zu einer Verringerung der Schubspannungen aufgrund der größeren Wassertiefen, sodass sich in diesen Bereichen prinzipiell wieder vermehrt Sediment ablagern kann.

#### 4.4 Daten für die biologische Habitatmodellierung

Zusätzlich zu den beschriebenen Systemstudien für den Zustand des Jahres 2010 werden für die Datenweitergabe im Rahmen des Projekts auch die Jahre 2011 bis 2016 berechnet und in der Form von verschiedenen Kennwerten aufbereitet. Diese werden an den Projektpartner Bioconsult.SH übergehen und dort als Eingangsgrößen für die biologische Habitatmodellierung verwendet. Die Modellergebnisse werden hierbei mit gemessenen Häufigkeitsverteilungen verschiedener Arten verglichen. Über eine Korrelationsanalyse wird dann bestimmt, welche Parameter für den Lebensraum der einzelnen Arten prägend sind.

In Absprache mit dem Projektpartner sind aus biologischer Sicht vor allem die monatlichen Mittelwerte von Interesse, um so auch eine saisonale Abhängigkeit des Vorkommens der verschiedenen Arten berücksichtigen zu können. Diese monatlichen Kennwerte werden dann zusätzlich über die Jahre 2011 bis 2016 gemittelt, um ein stabileres Signal zu erhalten. Da die Probenahme im Sommer erfolgt ist, liegt der Fokus bei den Daten generell auch auf den Sommermonaten.

Für die Fragestellungen der Habitatmodellierung sind verschiedene tideunabhängige Kennwerte des Wasserstands, des Seegangs und der Bodenschubspannung von Bedeutung. Die folgenden Kennwerte haben dabei die größte Aussagekraft für das Auftreten der einzelnen Arten und werden für die Habitatmodellierung genutzt:

- Wasserstandsdifferenz zwischen dem Hochwasserstand und dem Niedrigwasserstand
- maximale effektive Bodenschubspannung
- residuelle effektive Bodenschubspannung
- signifikante Wellenhöhe

Beispielhaft ist hier die residuelle Bodenschubspannung (Bild 60) und die mittlere signifikante Wellenhöhe (Bild 61) für den Monat Juli gemittelt für den Zeitraum 2011 bis 2016 dargestellt. Auch hier sind die in Kapitel 4.1.4 für die Bodenschubspannungen und Kapitel 4.1.3 für den Seegang dargestellten Tendenzen zu erkennen.

Das Residuum der Bodenschubspannungen ist durch die Wirkung des Seegangs in den flacheren Bereichen des Ebbdeltas und der an Sylt und Amrum angrenzenden Sände am größten und zeigt aufgrund des überwiegend aus Westen kommenden Seegangs in das Tidebecken. In den tieferen, tide dominierten Rinnen und den Wattflächen im Tidebecken ist kein oder nur ein sehr schwaches Signal zu erkennen.

Der Seegang hat im Küstenvorfeld sehr einheitliche Werte und verliert dann im Bereich des Ebbdeltas einen Großteil seiner Energie und die Wellenhöhen nehmen mit Eintritt in das Tidebecken dann stark ab.

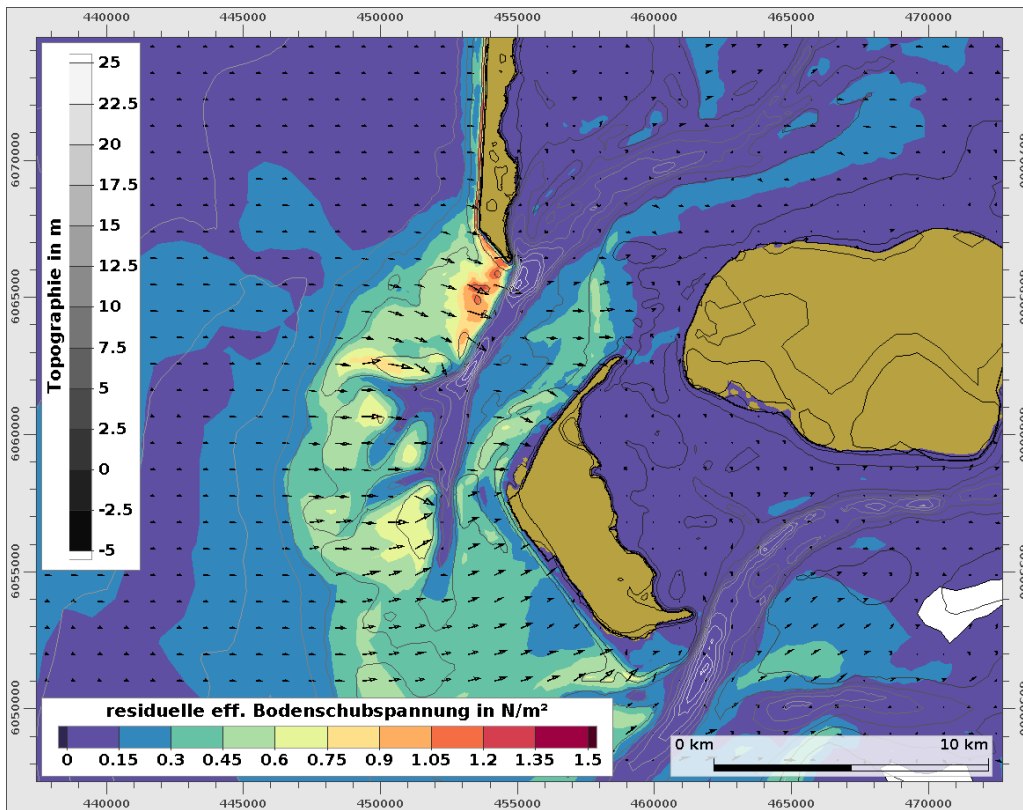


Bild 60: Residuelle Bodenschubspannung für den Monat Juli im Mittel für den Zeitraum 2011 bis 2016 in  $N/m^2$ .

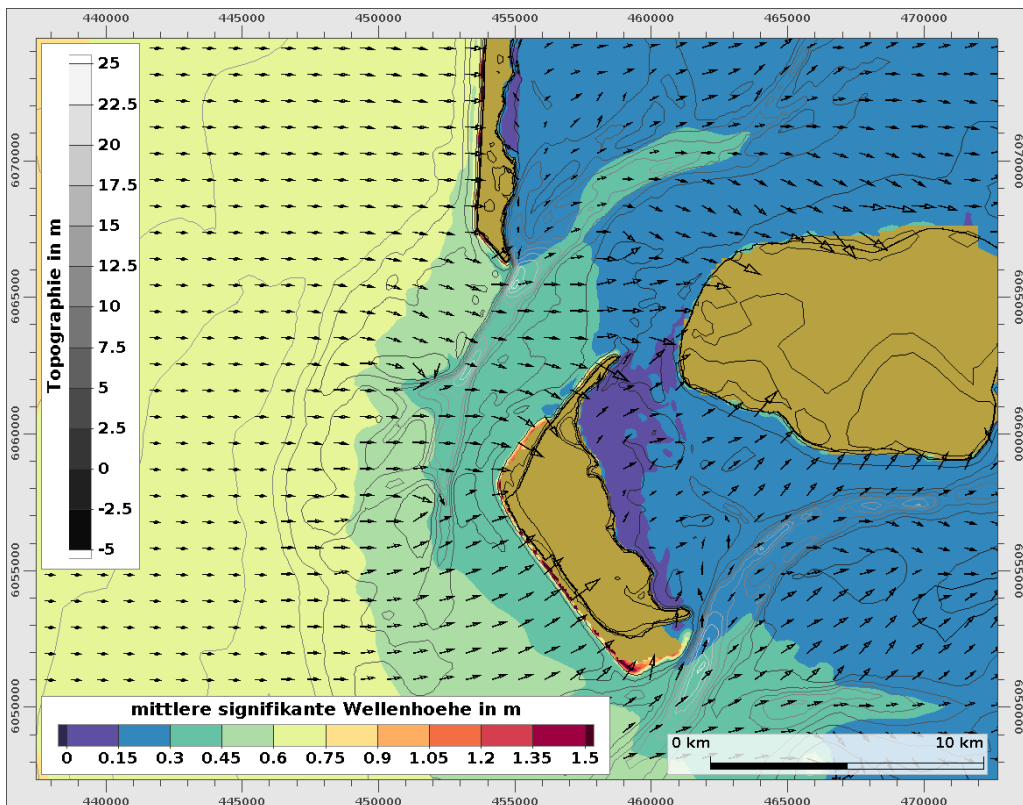


Bild 61: Signifikante Wellenhöhe für den Monat Juli im Mittel für den Zeitraum 2011 bis 2016 in m.

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts BASEWAD untersucht der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) den Einfluss und die Nachhaltigkeit von Sandeinbringungen entlang des südlichen Teils der Insel Sylt. In diesem Bereich finden seit längerer Zeit Sandaufspülungen im Rahmen des Küstenschutzes statt, die in erster Linie als Ausgleich für die Erosion der Strände entlang der Sylter Westküste dienen. Von großem Interesse ist jedoch auch die Frage, inwieweit das Wattenmeer von diesen Maßnahmen profitiert und in welchen Bereichen es zu Ablagerungen kommen kann. Aufgabe der BAW ist hierbei, mit Hilfe numerischer Simulationen die morphologischen Prozesse im Nordfriesischen Teils des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeers mit Fokus auf die nähere Umgebung des südlichen Teils von Sylt und die sie antreibenden Kräfte zu beschreiben. Gezielt sollen dann die Transportpfade von Sandaufspülungen im Küstenvorfeld von Hörnum herausgearbeitet werden und bestimmt werden, welche Auswirkungen sich von solchen Maßnahmen auf die Morphologie des Gebiets ableiten lassen.

Grundlage der Studien ist ein Modell der BAW, mit dem die Tidedynamik und der Stofftransport in der Deutschen Bucht simuliert wird. Das Berechnungsnetz ist entlang der Küste des südlichen Teils von Sylt verfeinert worden, um die küstennahen Strömungsverhältnisse präziser abbilden zu können. Zusätzlich erfolgt eine Erweiterung des Modells um die Berechnung des Seegangs, um die Wechselwirkung zwischen Seegang, Strömung und Sedimenttransport zu erfassen.

Hydrodynamik und Sedimenttransport sind durch die vorherrschenden meteorologischen und astronomischen Bedingungen geprägt. Der Simulationszeitraum 2010 liefert repräsentative Ergebnisse, die die langjährigen Bedingungen in dem Gebiet widerspiegeln. Zur Modellsteuerung dienen die realen hydrologischen und meteorologischen Bedingungen. Zur Bewertung der Ergebnisse werden verschiedene tideabhängige und tideunabhängige Kennwerte sowie die morphodynamische Entwicklung im Modell analysiert und mit Messungen und Beobachtungen aus einem vergleichbaren Zeitraum verglichen, um nachzuweisen, dass das Modell die grundlegenden Strömungs- und Transportprozesse realistisch abbildet. Dazu zählen z.B. die leichte Ebbstromdominanz entlang des westlichen Ufers des Vortrapptiefs und der Einfluss von hauptsächlich aus westlicher Richtung kommenden Starkwindereignissen auf den Seegang.

Die Ergebnisse der Modellierung zeigen einen resultierenden Küstenlängstransport in südlicher Richtung über die Theeknobsände und entlang der Küstenlinie der Hörnum Odde in das Vortrapptief. Von dort findet eine Verlagerung mit der Tideströmung sowohl in das Tidebecken als auch in Richtung Ebbdelta statt. Generell ist der Nettotransport von Sedimenten in das Hörnum Tidebecken positiv. Bei starkem Seegang wird vermehrt Sediment in das Tidebecken transportiert.

Ausgehend von diesem Modellstand werden folgende Systemstudien durchgeführt:

### **Simulation einer Sandaufspülung**

In Anlehnung an eine reale Maßnahme vor Hörnum vom Sommer 2017 erfolgt die Umsetzung im Modell in der zweiten Hälfte des Jahres 2010. Die eingebrachte Sedimentmenge wird im Modell durch

eine zusätzliche Sedimentfraktion repräsentiert, deren Ausbreitung im Untersuchungsgebiet bilanziert werden kann. Diese Sedimentfraktion kann je nach hydrodynamischer Belastung als Geschiebe, aber auch in Suspension transportiert werden. Aus modelltechnischen Gründen muss die Sinkgeschwindigkeit etwas reduziert werden, wodurch die Transportwege in Suspension größer werden. Der verwendete Ansatz ermöglicht Aussagen über grundsätzliche Transportpfade des eingebrachten Sedimentes.

Der im Küstenvorfeld eingebrachte Sand folgt dem generellen Transportmuster entlang der Küste in das Vortrapptief. Hierbei ist die Bedeutung des Seegangs zur Mobilisierung des Sediments hervorzuheben. Unter normalen hydrodynamischen Bedingungen ist die Maßnahme relativ stabil und eine Ausbreitung des vorgespülten Sandes findet nur langsam und überwiegend als Geschiebe statt. Bei stärkerem Seegang kann das Material jedoch in Suspension geraten und sich so schneller und weiter ausbreiten.

Im betrachteten Simulationszeitraum sind fünf Monate nach Ende der Sandaufspülung noch ca. 80 % des eingebrachten Materials mit einem Korndurchmesser von 100 µm am Ort der Vorspülung. Etwa die Hälfte des mobilisierten Materials landet im Hörnummer Tidebecken. Der Großteil davon verbleibt nahe der östlichen Küste von Sylt, während ein kleiner Teil weiter in das Tidebecken hinein transportiert wird und auch bis auf die Wattflächen gelangen kann. Weitere 25 % sedimentieren am Schütthang, im Vortrapptief und im Ebbdelta.

Die feineren Sandfraktionen mit ihren niedrigeren Sinkgeschwindigkeiten werden im Modell teilweise bis auf die Wattflächen transportiert, während die gröberen Fraktionen in den tieferen Bereichen der Rinnen verbleiben.

Inwieweit sich eine Akkumulation in den Rinnen auf ein Wachstum der Wattflächen auswirkt, lässt sich aus den Modellergebnissen nicht ableiten.

Maßnahmen in der durchgeführten Größenordnung sind alleine nicht ausreichend, um nennenswert zu einem Wachstum der Wattflächen im Hörnummer Tidebecken beizutragen. Lokal stattfindende Prozesse können durch sie aber unterstützt und gestärkt werden.

### **Simulation und Analyse von vier Klimaszenarien**

In diesen Szenarien wird sowohl der Meeresspiegel als auch die Topographie variiert. Zugrunde liegen die Varianten der Strategie für das Wattenmeer 2100. Diese basieren auf der Annahme, dass durch den steigenden Meeresspiegel die Küstenvorfelder erodieren und so zum Wachstum der Wattflächen beigetragen haben. Diese Tendenzen sind auch in den Modellergebnissen des Jahreslaufs 2010 zu erkennen, wobei hier hauptsächlich die tiefer in den Tidebecken gelegenen Wattflächen anwachsen. Eine quantitative Vorhersage zum langfristigen Anwachsen der Wattflächen ist nicht möglich.

Die mit dem morphodynamischen Modell durchgeführten Systemstudien zeigen, dass in diesen Szenarien die Küsten der vorgelagerten Inseln einer stärkeren Wirkung des Seegangs ausgesetzt sind, da dieser durch die größeren Wassertiefen erst näher an der Küste anfängt, Energie zu dissipieren. Hier können Sandaufspülungen im Küstenvorfeld eine wichtige Rolle spielen, um das natürlich vorkommende Riffsystem und seine dämpfende Wirkung auf den Seegang zu stärken.



Weiterhin kommt es in allen Szenarien zu einem Anstieg des Tidenhubs von bis zu 10 cm am Pegel Hörnum Hafen, der in erster Linie durch einen relativ zum Meeresspiegelanstieg verstärkten Anstiegs des Tidehochwassers ausgelöst wird. Zudem nehmen die Überflutungsdauern der Wattflächen vor allem in den gesteigerten Szenarien teils deutlich zu. Dies kann dazu führen, dass bestimmte Wattflächen bis zu 100 Minuten pro Tide länger überflutet bleiben.

### **Bereitstellung von Daten an den Projektpartner Bioconsult.SH**

Für die biologische Habitatmodellierung wurden zusätzlich die Jahre 2011 bis 2016 gerechnet. Verschiedene Kennwerte der Hydrodynamik, des Seegangs und des Sedimenttransports wurden für die Monate Januar bis Dezember berechnet und über die Jahre gemittelt.

Bundesanstalt für Wasserbau  
Hamburg, Juli 2020

Im Auftrag

Bearbeiter

Dr. rer. nat. Norbert Winkel

Dipl.-Geoök. Benjamin Fricke

## 6 Literaturverzeichnis

Bollmeyer, C., and Coauthors, 2015: Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. In: *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 141, 1–15, doi:10.1002/qj.2486.

Booß, A., et al, 2011: Die Witterung in Deutschland 2010. In: *Klimastatusbericht 2010*, 7-36.

Casulli, V. (1999): A Semi-Implicit Finite Difference Method for Non-Hydrostatic, Free-Surface Flows. In: *International Journal of Numerical Methods in Fluids* (30), S. 425–440.

Casulli, V. and Walters, Roy A. (2000): An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 32 (3), S. 331–348.

Casulli, V. and Zanolli, P. (2002): Semi-implicit numerical modeling of nonhydrostatic free-surface flows for environmental problems. In: *Mathematical and Computer Modelling* 36 (9-10), S. 1131–1149. DOI: 10.1016/S0895-7177(02)00264-9.

Casulli, V. and Zanolli, P. (2005): High resolution methods for multidimensional advection–diffusion problems in free-surface hydrodynamics. In: *Ocean Modelling* 10 (1-2), S. 137–151. DOI: 10.1016/j.ocemod.2004.06.007.

Casulli, V. and Zanolli, P. (1998): A Three-Dimensional Semi-Implicit Algorithm for Environmental Flows on Unstructured Grids. In: *Proc. of Conf. on Num. Methods for Fluid Dynamics*, University of Oxford.

Eppel, D. P., Kapitza, H., Onken, R., Pleskachevsky, A., Puls, W., Riethmüller, R. u. Vaessen, B. (2006): *Wathydrodynamik: Die hydrodynamische Belastung von Wattgebieten*. GKSS-Report 2006/8, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht.

Grabemann, I., Gaslikova, L., Brodhagen, T., and Rudolph, E. (2019): Very severe storm tides in the German Bight (North Sea) and their potential for enhancement. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/nhess-2019-351>, in review.

Heyer, H. und Schrottke, K. (2012): *AufMod (03KIS082-03KIS088) Gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten, 2013*. doi: 10.2314/GBV:780783271.

Kernkamp, H.W.J., Van Dam, A., Stelling, G.S. et al. 2011: Efficient scheme for the shallow water equations on unstructured grids with application to the Continental Shelf. In: *Ocean Dynamics* 61: 1175. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0423-6>.

Ministerium für Energiewende, Land-wirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (2015): *Strategie für das Wattenmeer 2100*. Kiel: Schmidt & Klaunig.

Nilson E., Astor B., Bergmann L., Fischer H., Fleischer C., Haunert G., Helms M., Hillebrand G., Höpp S., Kikillus A., Labadz M., Mannfeld M., Razafimaharo C., Patzwahl R., Rasquin C., Rauthe M., Riedel A.,

Schröder M., Schulz D., Seiffert R., Stachel H., Wachler B. und Winkel N. (2019): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP - 106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks.

Ray, R. D.: A global ocean tide model from Topex/Poseidon altimetry: GOT99, NASA Tech. Memo 209478, Goddard Space Flight Center, 55 pp., 1999.

Ross, Jan (1998): Die Strömungsverhältnisse zwischen Sylt und Amrum. In: Die Küste 60. Heide, Holstein: Boyens. S. 117-139.

Schneggenburger, C. (1998) : Spectral Wave Modelling with Nonlinear Dissipation, Dissertation, 117 Seiten, Bericht Nr. GKSS 98/E/42, Geesthacht

Zijl et al., Improved water-level forecasting for the Northwest European Shelf and North Sea through direct modelling of tide, surge and non-linear interaction. In: Ocean Dynamics, Volume 63, Number 7, July 2013.