

Morphologische Projektionen für zwei Tidesysteme im Wattenmeer von Schleswig-Holstein: SH-TREND

Jacobus Hofstede¹, Johannes Becherer² und Hans Burchard³

¹ Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein, jacobus.hofstede@melund.landsb.de

² Helmholtz-Zentrum Geesthacht

³ Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde

Zusammenfassung

Als Grundlage für die Erstellung der Klima-Anpassungsstrategie Wattenmeer 2100 des Landes Schleswig-Holstein wurde mit dem Modell GETM die morphologische Langzeitentwicklung in den schleswig-holsteinischen Tidesystemen Lister Tief und Piep für mehrere hydro-meteorologische Antriebsszenarien projiziert. Für zwei Projektionszeiträume 2010 bis 2050 und 2050 bis 2100 wurden, neben einem Null-Szenario (ohne Änderungen), zwei Szenarien mit jeweils unterschiedlichen Meeresspiegelanstiegsraten definiert. In allen Szenarien bis auf das Null-Szenario findet schließlich eine moderate Zunahme des Tidenhubes statt.

Die prozessorientierte Modellierung erlaubt die folgenden Schlussfolgerungen. Die Wattflächen sind auch beim stärkeren Meeresspiegelanstieg effektive Sedimentsenken, weshalb die Tidesysteme eine hohe morphologische Resilienz gegen einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg aufweisen. Die morphologische Resilienz der Tidesysteme ist dabei positiv korreliert mit dem mittleren Tidehub. Die tieferen Priele in den Tidebecken fungieren neben den Außenküsten und bis zu einem Kippunkt (siehe unten) als wichtige interne Sedimentquelle für Sedimentation auf den Wattflächen. Schließlich existiert in den Wattenmeer-Tidebecken ein (von der Höhe des Tidenhubes abhängiger) Kippunkt für deren morphologische Resilienz, der durch die Meeresspiegelanstiegsrate definiert wird. Überschreitet die Meeresspiegelanstiegsrate diesen Kippunkt, werden die Priele zu Sedimentsenken. Ein Systemwechsel bzw. Sukzession in Richtung Küstenlagunen mit ausgedehnten Flachwasserbereichen um Tideniedrigwasser setzt ein. Für den Meeresschutz und insbesondere für die Entwässerung der Küstenniederungen treten die negativen Konsequenzen einer solchen Entwicklung vermutlich früher ein und sind stärker als für den Küstenschutz, da auch bei einem Systemwechsel (zunächst) noch ein stark aufwachsender küstennaher Bereich als Seegangsenergie-Umwandlungszone erhalten bleibt.

Schlagwörter

Wattenmeer, Schleswig-Holstein, Tidesysteme, Tidebecken, intertidale Wattflächen, Meeresspiegelanstieg, hydro-morphodynamische Modellierung, morphologische Projektionen

Summary

As input for the establishment of a climate change adaptation strategy for the Wadden Sea by the German Federal State of Schleswig-Holstein, morphological projections for two tidal basins in the Schleswig-Holstein sector of the Wadden Sea were established with the process-oriented model GETM. For two time horizons 2010 to 2050 and 2050 to 2100, three hydro-meteorological scenarios were defined: a reference scenario with no changes in forcing, two scenarios with a moderate and a high sea level rise. In all but the first scenario, a moderate increase in tidal range occurs.

The hydro-morphological simulations allow for the following conclusions. Even if sea level rise increases substantially, the intertidal flats still function as effective sediment sinks, for which reason tidal basins show a high morphological resilience to accelerated sea level rise. This morphological resilience of tidal basins is positively correlated to mean tidal range. In addition to the outer coasts, the deeper gullies in the tidal basins function as significant sediment sources for sedimentation on the intertidal flats. This internal sediment-redistribution mechanism appears to be confined by a so called tipping point for morphological resilience, which is defined by the rate of sea level rise, and varies regionally with tidal range. If sea level rise becomes stronger than the regionally varying tipping point, the gullies turn from sediment sources into sediment sinks. A system shift (succession) towards shallow coastal lagoons with extensive permanently water covered areas begins. Marine conservation and, especially, drainage of coastal lowlands are probably earlier and more strongly impaired by this development than coastal flood defense. Even if a system shift occurs, a narrow band of strongly accreting tidal flats and salt marshes may persist in front of the coastal flood defenses that functions as wave-energy dissipation zone.

Keywords

Wadden Sea, Schleswig-Holstein, tidal systems, tidal basins, intertidal flats, sea level rise, hydro-morphodynamical modelling, morphological projections

1 Einleitung

Wie sich die Morphologie des Wattenmeeres infolge einer starken Beschleunigung des Meeresspiegelanstieges ändern könnte, ist für den Meeres- und Küstenschutz von übergeordnetem Interesse. Größere Wassertiefen im Wattenmeer führen während Sturmfluten an den Küsten und Küstenschutzanlagen zu erhöhten Belastungen durch Seegang und damit zu einem erhöhten Aufwand für den Küstenschutz (Arns et al. 2017, LAWA 2018). Aus der Sicht des Meeresschutzes würde eine großflächige und irreversible Abnahme von intertidalen Wattflächen infolge eines beschleunigten Meeresspiegelanstieges zu wesentlichen Beeinträchtigungen der heutigen ökologischen Funktionen und der Integrität des geschützten Ökosystems Wattenmeer führen (Hofstede et al. dieses Heft). Wichtiges Kriterium für die Auszeichnung des Wattenmeeres als Weltnaturerbe ist die weltweit einzigartige Ausdehnung von zusammenhängenden Wattflächen (CWSS 2008). Es stellt sich die Frage, ob bzw. inwieweit Wattflächen in der Lage sind, einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg, wie vom IPCC (2014) projiziert, durch verstärkte Sedimentation auszugleichen.

Modellstudien für das niederländische Wattenmeer (Dissanayake et al. 2012, van Goor et al. 2003, Wang et al. 2014) kommen hinsichtlich der maximalen Meeresspiegelanstiegsraten, die Wattflächen durch verstärkte Sedimentation langfristig in der Höhe noch

ausgleichen können, zu unterschiedlichen Ergebnissen. Die Werte schwanken zwischen mindestens 2 und über 8 mm/a. Mögliche regionale Unterschiede, zum Beispiel im Tidenhub, im Aufbau des Untergrundes oder in der Ausrichtung und Form der Tidesysteme, werden in diesen Studien nicht behandelt.

Im Rahmen der Erstellung der Strategie für das Wattenmeer 2100 des Landes Schleswig-Holstein (Hofstede et al. dieses Heft) wurde in einem Kooperationsvorhaben SH-TREND zwischen dem Land Schleswig-Holstein und dem Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde mit dem dort maßgeblich entwickelten prozessorientierten Modell GETM die morphologische Entwicklung in zwei stark unterschiedlichen schleswig-holsteinischen Tidesystemen Lister Tief und Piep (Abbildung 1) für verschiedene hydro-meteorologische Antriebsszenarien projiziert. Teilergebnisse der Modellstudie sind in Hofstede et al. (2016) und Becherer et al. (2017) publiziert. In Hofstede et al. (2016) werden insbesondere die Unterschiede zwischen beiden untersuchten Tidesystemen analysiert und gedeutet. In Becherer et al. (2017) werden – neben einer ausführlichen Beschreibung des Modelles einschließlich seiner Validierung – mögliche künftige morphologische Entwicklungen des Lister-Tief-Tidesystems vorgestellt. Das vorliegende Manuskript enthält eine Gesamtschau der Ergebnisse aus SH-TREND und eine erweiterte Interpretation der Ergebnisse. Auf eine kurze Beschreibung des Untersuchungsgebietes sowie der in SH-TREND angewandten Methoden und Antriebsszenarien folgt die Darstellung der Simulationsergebnisse. Nach der Diskussion der Ergebnisse schließt dieses Manuskript mit einigen Schlussfolgerungen über die morphologische Stabilität des Wattenmeeres von Schleswig-Holstein bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg ab.

2 Untersuchungsgebiet, Methoden und Antriebsszenarien

Das Lister-Tief-Tidesystem (Abbildung 1) wird seeseitig durch die sandigen Barriere-Inseln Sylt und Rømø begrenzt. Zum System gehören weiterhin das zwischen den Inseln liegende Seegat Lister Tief mit vorgelagertem Ebb-Delta und das dahinter liegende etwa 420 km² große Tidebecken. Das im Ebb-Delta gespeicherte Sedimentvolumen wurde anhand des Verfahrens von Walton und Adams (1976) in SH-TREND mit etwa 500 Mio. m³ ermittelt. Das Tidebecken setzt sich aus subtidalen Prielen, intertidalen Wattflächen und kleineren Salzwiesenarealen zusammen. Zwei Dämme verbinden die Inseln mit dem Festland, weshalb Meerwasser nur durch das Seegat ein- und ausfließen kann. Der mittlere Tidenhub beträgt am Pegel List etwa 1,8 m; das Tideprisma liegt nach Spiegel (1997) bei etwa 580 Mio. m³. Im Piep-Tidesystem (Abbildung 1) konnten sich infolge des deutlich höheren Tidenhubes von etwa 3,2 m (Pegel Büsum) keine Barriere-Inseln bilden. Die Grenzen des Tidesystems sind deshalb seeseitig nicht klar definierbar und „wasserdurchlässig“. Meerwasser kann aus verschiedenen Richtungen, auch über die Wattwasserscheiden, ein- und ausfließen. Ein klar abgrenzbares Ebb-Delta wie im Lister-Tief-Tidesystem konnte sich ebenfalls nicht ausbilden. Bei leicht von dieser Studie abweichenden Gebietsabgrenzungen errechnete Spiegel (1997) für das etwa 210 km² große Tidebecken Piep ein Tideprisma von 414 Mio. m³. Die Festlandsbegrenzungen in beiden Systemen werden durch Deiche eingenommen, weshalb eine landwärts gerichtete Migration des Gesamtsystems infolge eines Meeresspiegelanstieges, wie sie im natürlichen Zustand während der holozänen Transgression erfolgte, verhindert wird.

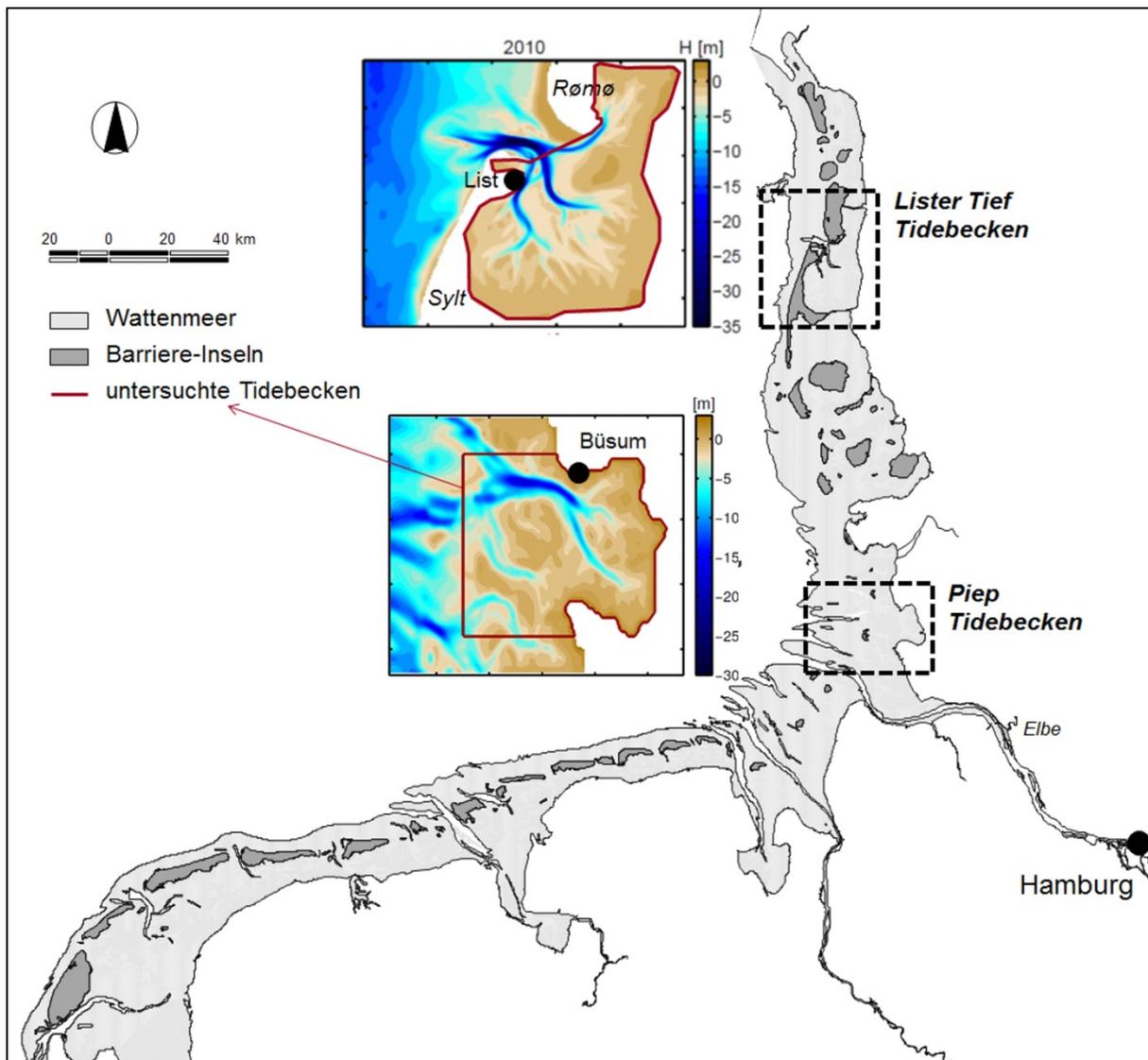


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet an der Westküste von Schleswig-Holstein (die Modelldomänen sind farblich in unterschiedlichen Maßstäben dargestellt).

2.1 Methoden

Die hydro-morphodynamischen Simulationen wurden mit dem prozessorientierten „General Estuarine Transport Model“ – GETM (www.getm.eu, Burchard und Bolding 2002) durchgeführt. GETM ist ein frei zugängliches 3D-Zirkulationsmodell mit einem integrierten Algorithmus für Trockenfallen und Überfluten, wodurch es sich besonders für die Simulation von küstennahen Tidesystemen eignet. Für das Projekt SH-TREND wurde ein auf Delft3D basierendes Sedimenttransport/Morphologie Modul integriert. Dieses Modul erlaubt die Berücksichtigung von mehreren Sedimentklassen, die jeweils durch einen Parameter für Sinkgeschwindigkeit und für kritische Schubspannung charakterisiert werden (Soulsby 1997). In SH-TREND wurden zwei Sedimentklassen benutzt: Feinsand (0,06 mm), der im Modell anfänglich nur auf den Wattflächen vorkommt, und Mittelsand (0,2 mm), der flächig im Modell in unlimitierter Menge vorkommt. Neben Schwebstofftransport wird auch Transport an der Sohle simuliert. Beide Transportmechanismen ändern den Sedimentpool in jeder Gitterzelle, die in eine entsprechende Änderung der

Wassertiefe umgerechnet wird. In GETM können auch trockenliegende Gitterzellen erodiert werden, was unabdingbar für die morphologische Langzeitsimulation von sandigen Tidesystemen ist. Damit für die morphologischen Projektionen ausreichende externe Sedimentmengen für eventuelle Akkumulationen in den jeweiligen tidalen Systemen zur Verfügung stehen, wurden die äußeren Modellgrenzen ausreichend weit außerhalb der Tidesysteme gezogen (Abbildung 1).

Hydro-morphodynamische zweidimensionale (2D) Hindcast-Simulationen wurden für beide Systeme (Lister Tief: 1966 – 2010, Piep: 1956 – 2010) durchgeführt, um die Fähigkeit von GETM zur Reproduktion der vergangenen Entwicklung zu testen. Topographische Karten aus den 1950ern und 1960ern wurden zur Erzeugung einer initialen Topographie (Gitterzellen 200*200 m) genutzt. Als Antrieb wurden die Daten aus dem CoastDAT-Projekt (www.coastdat.de) verwendet, die aus einer hydrodynamischen Simulation der Deutschen Bucht für den Zeitraum von 1948 bis 2012 entstanden sind. Die Hindcast-Simulationen zeigten generell plausible morphologische Entwicklungen in beiden Tidesystemen, die allerdings aufgrund unzureichender Naturdaten nur qualitativ mit der tatsächlichen Entwicklung verglichen werden können. Das natürliche Mäandrieren der Priele bei gleichzeitiger Vertiefung der Wattströme und Hauptrinnen in den Seegats wurde ebenso nachgebildet wie die beobachtete generelle Sedimentation auf den Watten. Die Hindcast-Simulationen für das Lister-Tief-Tidesystem bildeten die natürliche Rückverlagerung der Westküste von Sylt, der hier durch jährliche Sandaufspülungen begegnet wird, nicht ab (siehe Kapitel 4 Diskussion). Die Ergebnisse weiterer Validierungstests auf der Basis von vergleichbaren Modellstudien in den Niederlanden (Dissanayake et al. 2012, Ter Brake und Schuttelaars 2010) finden sich in Becherer et al. (2017).

Morphologische Projektionen wurden mit GETM für den Zeitraum von 2010 bis 2100 erstellt. Als Randbedingung zu Anfang der 2D Simulationen wurde ein repräsentatives neunjähriges Zeitfenster aus den Hindcast-Simulationen bzw. aus dem CoastDAT-Datensatz genommen. Durch die gewählte Anwendung eines morphologischen Faktors von 10 zur Begrenzung des Rechenaufwandes korrespondieren neun Jahre hydrologischer Antrieb mit 90 Jahren morphologischer Entwicklung. Gemäß den unten definierten Szenarien wurden in den jeweiligen Simulationen die Randbedingungen Meeresspiegelniveau und mittlerer Tidenhub schrittweise leicht geändert. Die Simulationsergebnisse wurden in 10-Jahresschritten (2010, 2020, ...) analysiert. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik und des Modelles findet sich in Becherer et al. (2017).

2.2 Antriebsszenarien

Nach dem fünften Klimabericht des IPCC (2014) ist mit einer starken Beschleunigung des relativen Meeresspiegelanstieges in diesem Jahrhundert zu rechnen, der bisher an den deutschen Küsten allerdings noch nicht nachweisbar ist (Hofstede 2007). Gründe sind vermutlich inter-annuelle Schwankungen in den Windfeldern in der Deutschen Bucht sowie dekadische Schwankungen in Wassertemperatur und Salzgehalt im Nordatlantik, die das globale Signal stark überlagern (Dangendorf et al. 2014). Je nach Szenario zum menschlichen Handeln werden im IPCC (2014) globale Anstiegswerte zwischen 0,28 und 0,98 m für den Zeitraum von 2000 bis 2100 angegeben (wahrscheinliche Bandbreite). Nach IPCC könnten sich diese Werte noch um mehrere Dezimeter erhöhen, wenn die Landeiskappen auf Grönland und in der Antarktis instabil werden. An der deutschen

Nordseeküste ist darüber hinaus noch eine geringe tektonische Landsenkung zu berücksichtigen. Modellstudien (Stengel und Zielke 1994, Arns et al. 2015) deuten an, dass der Tidenhub an der deutschen Nordseeküste bei zunehmenden Wassertiefen im Wattenmeer infolge nicht-linearer und räumlich unterschiedlicher Änderungen in den Partialtiden zunimmt.

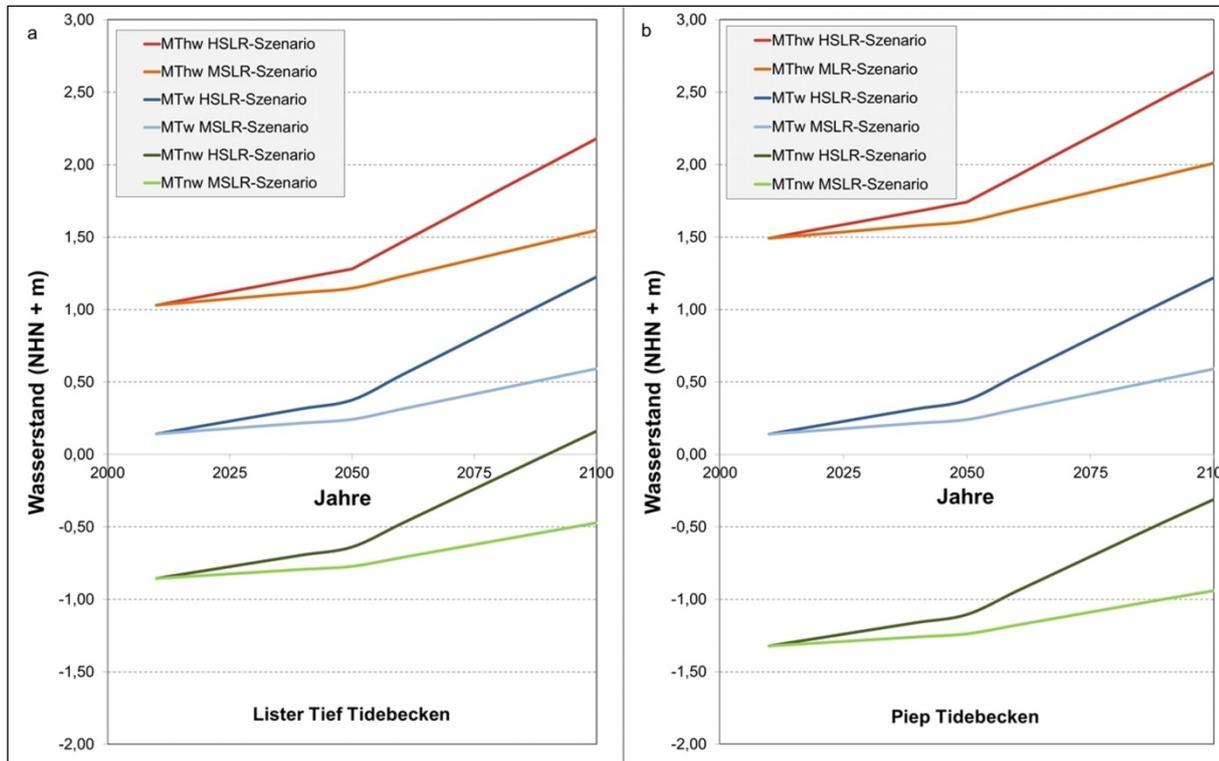


Abbildung 2: Entwicklung des mittleren Tidehochwassers (MThw), des mittleren Meeresspiegels (MTw) und des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw) für die MSLR- und HSLR-Szenarien über den Zeitraum von 2010 bis 2100 für das Lister Tief (Abbildung 2a) und das Piep-Tidebecken (Abbildung 2b).

Auf diesen Grundlagen wurden drei Antriebsszenarien für zwei Zeiträume von 2010 bis 2050 und 2050 bis 2100 definiert (Abbildung 2 zeigt die Szenarien 2 und 3):

1. Null-Szenario (REF): keine Änderungen im Antrieb.
2. Moderates Szenario (MSLR): mittlerer Meeresspiegelanstieg von 2,5 mm/a über den Zeitraum von 2010 bis 2050 und von 7 mm/a über den Zeitraum von 2050 bis 2100 (insgesamt bis 2100 0,45 m).
3. Höheres Szenario (HSLR): mittlerer Meeresspiegelanstieg von 6,0 mm/a über den Zeitraum von 2010 bis 2050 und von 17 mm/a über den Zeitraum von 2050 bis 2100 (insgesamt bis 2100 1,08 m).

Im Ergebnis wurden fünf unterschiedliche Meeresspiegelanstiegsraten (0, 2,5, 6,0, 7,0 und 17,0 mm/a) simuliert. Zur Berücksichtigung einer geänderten Tidedynamik wurde in den Szenarien 2 und 3 für den Zeitraum von 2010 bis 2050 eine mittlere Tidenhubzunahme von 1,0 mm/a und für den Zeitraum von 2050 bis 2100 eine Zunahme von 2,0 mm/a angenommen. Entsprechend nimmt das mittlere Tidehochwasser bis 2100 um 0,07 m zusätzlich zum mittleren Meeresspiegel zu, das mittlere Tideniedrigwasser um 0,07 m weniger.

3 Ergebnisse

Zur Beantwortung der in der Einleitung gestellten Frage, ob bzw. inwieweit Wattflächen in der Lage sind, einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg auszugleichen, wurde die jeweilige Entwicklung der Watten für die Antriebsszenarien analysiert. Durch Gegenüberstellung der beiden Tidesysteme können mögliche regionale Unterschiede in der morphologischen Resilienz von Tidesystemen, wie von Hofstede (2015) postuliert, analysiert werden. Morphologische Resilienz wird definiert als die Fähigkeit von Wattenmeer-Tidesystemen, ihre intertidalen Wattflächen (als das Wattenmeer typisierende Struktur) bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg mittels verstärkter Materialablagerungen auf den Watten zu erhalten.

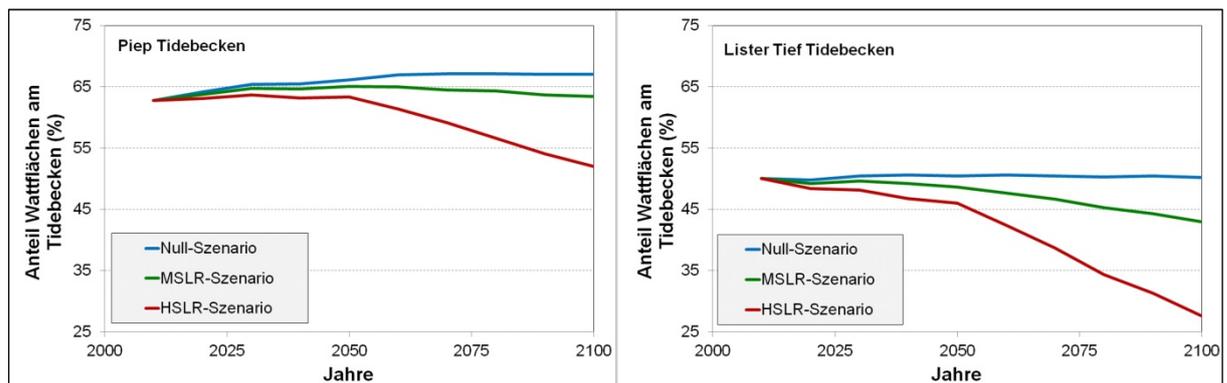


Abbildung 3: Entwicklung des Anteils der Wattflächen an der Gesamtfläche der Tidebecken (in %) für die drei Szenarien über den Zeitraum von 2010 bis 2100 für das Piep (links) und das Lister Tief (rechts) Tidebecken.

In Abbildung 3 ist für beide Tidesysteme die simulierte Entwicklung der Wattflächen zwischen 2010 und 2100 als Anteil an der Gesamt-Tidebeckenfläche unter MThw für die drei Antriebsszenarien dargestellt. Die dargestellten anteiligen Wattflächen-Entwicklungen erlauben gleichzeitig eine Aussage zur (gegenläufigen) Entwicklung der subtidalen Prielflächen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Gesamtflächen der Tidebecken bei den MSLR- und HSLR-Szenarien durch Erosion und Überflutung von anfangs supratidalen Bereichen (Strände und Salzwiesen) von 2010 bis 2100 geringfügig zunehmen. Aus der Abbildung lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

- Im Anfangsjahr 2010 ist der Anteil an Wattflächen im Piep-Tidebecken mit ca. 63 % deutlich höher als im Lister Tief mit ca. 50 %. Dieser Unterschied könnte zumindest teilweise mit den unterschiedlichen Grenzziehungen der beiden untersuchten Tidebecken in dieser Studie zusammenhängen (rotumrandeter Bereich in Abbildung 1). Allerdings kommt Spiegel (1997) bei seiner (besser mit dem Lister Tief vergleichbaren) Grenzziehung entlang der Wattwasserscheiden im Piep-Tidebecken zu ähnlich unterschiedlichen Ergebnissen (51,5 resp. 73 %).
- Im REF-Szenario nimmt der Wattflächen-Anteil im Piep-Tidebecken um wenige Prozente zu, im Lister-Tief-Tidebecken bleibt er relativ konstant.
- Im MSLR-Szenario bleibt der Wattflächenanteil im Lister-Tief-Tidebecken bis 2050 in etwa konstant und nimmt anschließend bis 2100 von 49 auf 43 % ab. Im Piep-Tidebecken nimmt der Flächenanteil dagegen bis 2050 geringfügig um wenige Prozente zu und bis 2100 wieder um den gleichen Anteil ab.

- Im HSLR-Szenario nimmt der Flächenanteil im Lister-Tief-Tidebecken bis 2050 leicht von 50 auf 46 % und danach bis 2100 stark auf nur noch 28 % ab. Dagegen bleibt der Flächenanteil im Piep-Tidebecken bis 2050 noch in etwa konstant und nimmt danach bis 2100 von 63 auf 52 % ab.

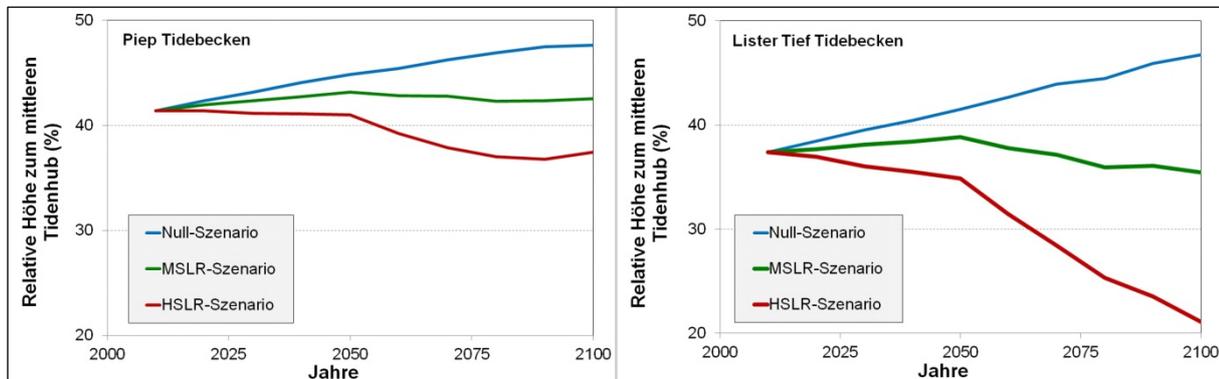


Abbildung 4: Entwicklung der mittleren Höhenlage der Wattflächen über MTnw in Relation zum MThb (in %) für drei Szenarien über den Zeitraum von 2010 bis 2100 für das Piep (links) und das Lister Tief (rechts) Tidebecken.

In Abbildung 4 ist für beide Tidesysteme die simulierte Entwicklung der mittleren Höhenlagen der intertidalen Wattflächen über MTnw in Relation zum MThb (in Prozent) für die drei Antriebsszenarien dargestellt. Dieser Parameter indiziert die relative Dauer des Trockenfallens der Watten, die zum Beispiel für foragierende Vögel von großer Bedeutung ist. Weiterhin wird angedeutet, wieviel Sediment anteilig im Intertidal vorhanden ist, unter anderem als „Puffer“ für einen Meeresspiegelanstieg sowie für interne Materialumlagerungen infolge eines Meeresspiegelanstieges (Hofstede 2015). Aus der Abbildung lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

- Im Anfangsjahr 2010 liegt die relative mittlere Watt-Höhenlage im Piep-Tidebecken bei 41,5 %, im Lister-Tief-Tidebecken geringfügig tiefer bei 37,5 %. Die absolute mittlere Höhenlage der Watten über MTnw ist jedoch im Piep-Tidebecken, infolge des hier deutlich höheren MThb, mit +1,16 m deutlich größer als im Lister-Tief-Tidebecken mit +0,70 m.
- Im REF-Szenario nehmen die relativen mittleren Watt-Höhenlagen in beiden Tidebecken relativ gleichmäßig von 37 auf 47 % (Lister Tief) bzw. von 41 auf 48 % (Piep) zu.
- Im MSLR-Szenario ändern sich die relativen mittleren Watt-Höhenlagen insgesamt nur unwesentlich, wobei sich im Lister-Tief-Tidebecken in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts eine leicht abnehmende Tendenz andeutet.
- Im HSLR-Szenario bleibt die relative mittlere Watt-Höhenlage im Piep-Tidebecken bis Mitte des Jahrhunderts relativ konstant und nimmt danach von 41 % auf 37 % ab. Im Lister-Tief-Tidebecken nimmt die relative mittlere Watt-Höhenlage bis Mitte des Jahrhunderts geringfügig von 37 auf 35 % und bis Ende des Jahrhunderts stark auf dann nur noch 21 % ab.

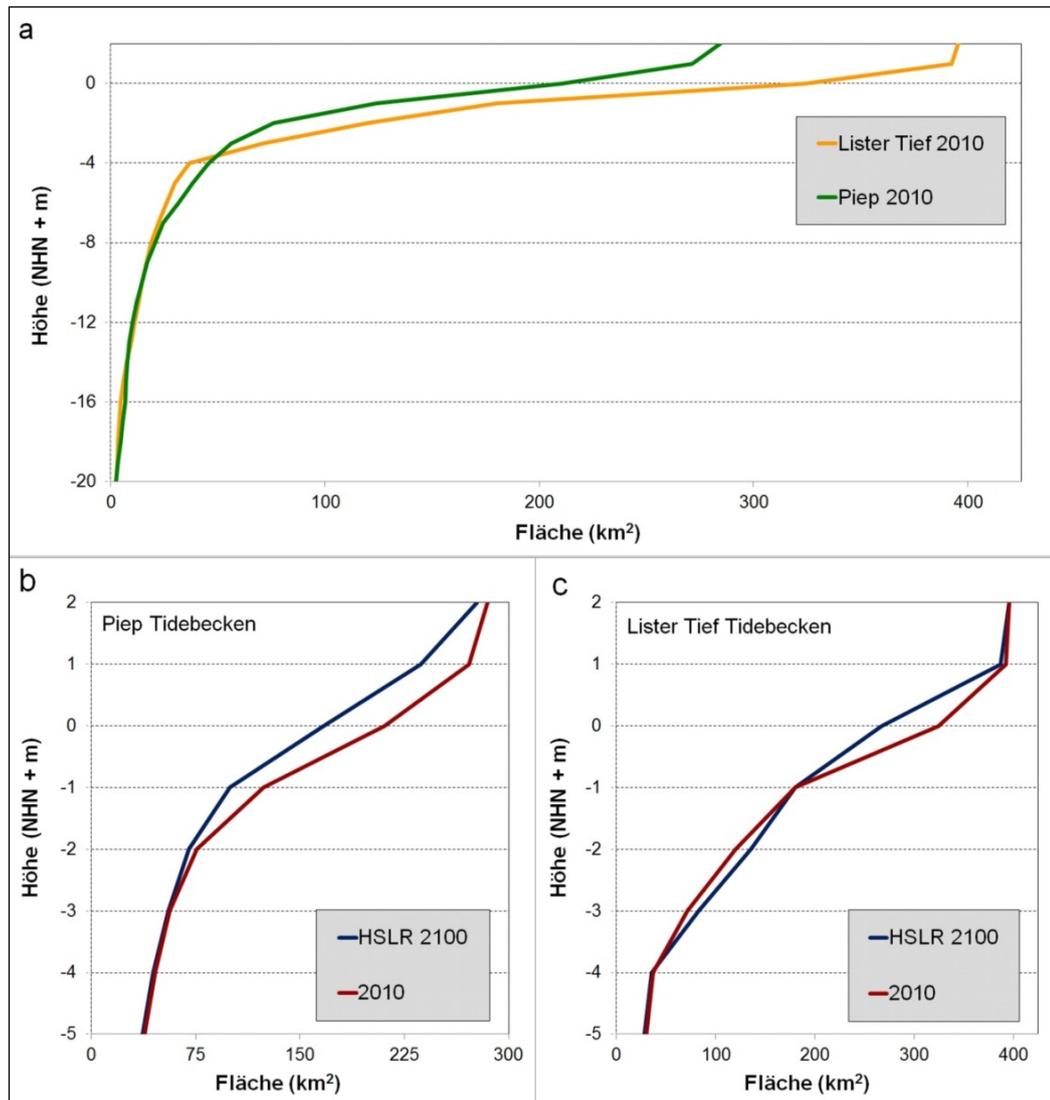


Abbildung 5: Hypsometrische Kurven der untersuchten Tidebecken. Abbildung 5a zeigt die hypsometrischen Kurven für das Ausgangsjahr 2010; Abbildung 5b (Lister Tief) und 5c (Piep) Ausschnitte oberhalb von NHN -5 m für das Ausgangsjahr 2010 und das HSLR-Szenario für das Jahr 2100.

In Abbildung 5a sind hypsometrische Kurven (Flächen-Höhenverteilungen) für beide Tide-becken für das Ausgangsjahr 2010 dargestellt. Auch hier zeigt sich die deutlich höhere Ausgangslage des Piep-Tidebeckens. Abbildung 5b zeigt einen Ausschnitt der hypsometrischen Kurven (oberhalb von NHN -5 m) für die Ausgangslage 2010 und das HSLR-Szenario in 2100 für das Piep-Tidebecken. Abbildung 5c stellt die gleichen Inhalte für das Lister-Tief-Tidebecken dar. Die Grafiken 5b und 5c zeigen die zwischen 2010 und 2100 projizierten Höhenänderungen infolge Erosion und Sedimentation in den Tidebecken für das HSLR-Szenario. Auf eine Darstellung der REF- und MSLR-Szenarien wurde wegen der im Wesentlichen gleichgerichteten (nur geringeren) morphologischen Tendenzen verzichtet.

Tabelle 1: Volumen- und Höhenänderungen für drei Szenarien zwischen 2010 und 2100 in charakteristischen Höhenschichten in den Lister-Tief- und Piep-Tidebecken.

| Lister-Tief-Tidebecken | NULL-Szenario | | MSLR-Szenario | | HSLR-Szenario | | |
|------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|
| | Höhenschicht (m zu NHN) | Bilanz (Mio. m ³) | Differenz (m) | Bilanz (Mio. m ³) | Differenz (m) | Bilanz (Mio. m ³) | Differenz (m) |
| | -30 bis -8 | -18,5 | -1,0 | -19,2 | -1,0 | -14,8 | -0,8 |
| | -8 bis -4 | 4,7 | 0,3 | 5,6 | 0,3 | 5,5 | 0,3 |
| | -4 bis -1 | -25,3 | -0,2 | -28,8 | -0,3 | -27,8 | -0,3 |
| | -1 bis 1 | 38,1 | 0,2 | 48,6 | 0,2 | 62,5 | 0,3 |
| | | | | | | | |
| Piep-Tidebecken | NULL-Szenario | | MSLR-Szenario | | HSLR-Szenario | | |
| | Höhenschicht (m zu NHN) | Bilanz (Mio. m ³) | Differenz (m) | Bilanz (Mio. m ³) | Differenz (m) | Bilanz (Mio. m ³) | Differenz (m) |
| | -20 bis -7 | -41,2 | -1,9 | -52,8 | -2,4 | -64,3 | -3,0 |
| | -7 bis -2 | 16,8 | 0,4 | 15,6 | 0,4 | 10,0 | 0,2 |
| | -2 bis 2 | 57,2 | 0,3 | 80,4 | 0,4 | 102,9 | 0,5 |

In Tabelle 1 sind für die drei Antriebsszenarien für beide Tidebecken die Volumen- und Höhenänderungen zwischen 2010 und 2100 in ausgewählten Höhenschichten aufgelistet. Wegen des unterschiedlichen Tidenhubes und der in der Höhe variierenden Erosions- und Sedimentationsschwerpunkte werden in der Tabelle unterschiedliche Höhenschichten für beide Tidebecken dargestellt. Aus den Abbildungen und der Tabelle lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

- In beiden Tidebecken finden auch beim REF-Szenario, d. h., ohne Änderungen im hydrologischen Antrieb, signifikante morphologische Änderungen statt. Die morphologischen Tendenzen sind dabei ähnlich aber schwächer als in den beiden anderen Szenarien.
- In beiden Tidebecken nehmen die mittleren Tiefen in den tieferen Prielen stark zu. Im Lister-Tief-Tidebecken vertiefen sich diese Priele zwischen 2010 und 2100 um bis zu 1,0 m, im Piep-Tidebecken sogar um bis zu 3,0 m. Die jeweiligen Erosionsmengen liegen bei 19,2 (Lister Tief) und 64,3 Mio. m³ (Piep).
- Ein weiterer Bereich mit stärkeren Vertiefungen um bis zu 0,3 m liegt im Lister-Tief-Tidebecken zwischen NHN -4 und -1 m; das Erosionsvolumen beträgt hier 27,8 Mio. m³. Dieser Erosionsbereich fehlt im Piep-Tidebecken.
- In beiden Tidebecken nehmen die Höhen in den jeweiligen Intertidalbereichen bzw. auf den Watten von 2010 bis 2100 stark zu; im Lister-Tief-Tidebecken zwischen NHN -1,0 und NHN +1,0 m um bis zu 0,3 m, im Piep-Tidebecken zwischen NHN -2,0 und NHN +2,0 m um bis zu 0,5 m. Die jeweiligen Sedimentationsvolumen liegen bei 62,5 resp. 102,9 Mio. m³.
- In beiden Tidebecken nimmt die Intensität der morphologischen Änderungen (Erosion oder Sedimentation) mit zunehmender Meeresspiegelanstiegsrate zu. Ausnahme sind die tieferen Priele im Lister-Tief-Tidebecken. Hier erreicht die

Erosion ihr Maximum beim MSLR-Szenario mit 19,2 Mio. m³ und liegt beim HSLR-Szenario mit 14,8 Mio. m³ wieder deutlich niedriger.

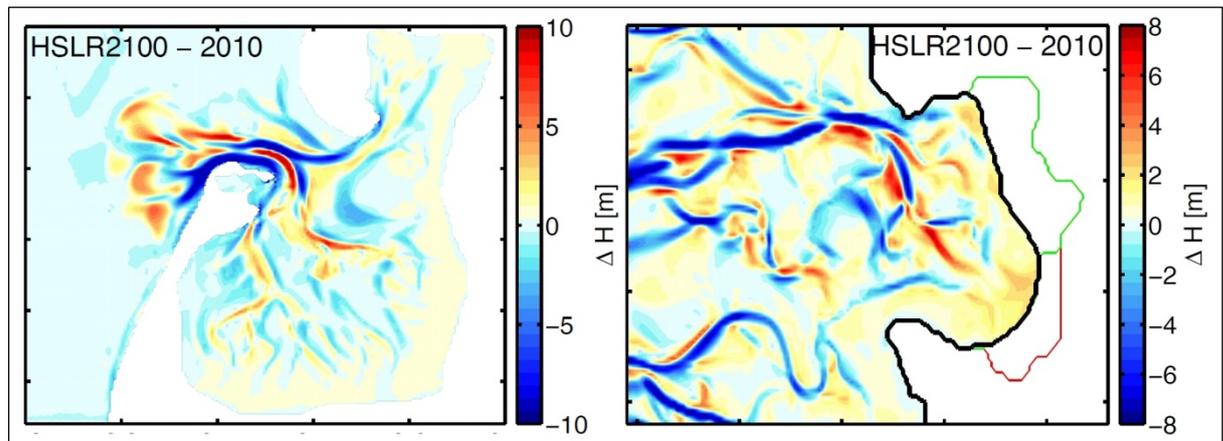


Abbildung 6: Höhenänderungen für das HSLR-Szenario zwischen 2010 und 2100 für das Lister-Tief-Tidebecken (links) und das Piep-Tidebecken (rechts; die dicke schwarze Linie entspricht der aktuellen Landesschutzdeichlinie, die braune und die grüne Linie sind ehemalige Landesschutzdeiche, die in den 1970er Jahren vorgedeicht wurden).

Eine flächige Darstellung der projizierten Höhenänderungen in den beiden Modelldomänen zwischen 2010 und 2100 für das HSLR-Szenario zeigt schließlich Abbildung 6. Auch hier wurde auf eine Darstellung der REF- und MSLR-Szenarien wegen der im Wesentlichen gleichgerichteten (nur geringeren) morphologischen Tendenzen verzichtet. Klar erkennbar ist das typische Mäandrieren der Priele, während insbesondere die küstennahen Wattbereiche durch Sedimentation gekennzeichnet werden. Im inneren Bereich des Piep-Tidebeckens (Meldorfer Bucht) treten besonders starke Sedimentationen auf, vermutlich noch in Reaktion auf die dortigen Vordeichungen in den 1970er Jahren. Unmittelbar vor den Festlandsdeichlinien liegt ein schmaler Streifen ohne signifikante Höhenänderungen (Hellblau), wobei es sich um (überflutete) Salzwiesen handelt. Auf dem Ebb-Delta im Lister-Tief-Tidesystem zeigen sich starke Sedimentationen auf den Riffbögen, während die dortigen Tiderinnen durch sehr starke Erosionen gekennzeichnet werden. Schließlich fehlen auch in dieser Simulation, wie bei den Hindcast-Simulationen, die infolge des Meeresspiegelanstiegs zu erwartenden (starken) Erosionen an der Westküste von Sylt (siehe Kapitel 4 Diskussion).

4 Diskussion

Die Simulationsergebnisse deuten darauf hin, dass die morphologische Resilienz von Wattenmeer-Tidesystemen gegen einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg hoch ist, wobei insbesondere die küstennahen Watten stark in die Höhe mitwachsen können. Auch bei einem jährlichen Meeresspiegelanstieg von 4 mm, d. h., bei einer Verdoppelung der bisherigen Anstiegsraten, zeigen die Wattflächen in den untersuchten Tidebecken eine positive Entwicklung. Erst bei Meeresspiegelanstiegsraten von 6 (HSLR) bzw. 7 mm/a (MSLR) nehmen Flächenanteil und relative mittlere Höhe der intertidalen Watten im Lister-Tief-Tidebecken moderat ab. Im Piep-Tidebecken bleiben sie auch bei diesen Meeresspiegelanstiegsraten noch relativ konstant bzw. nehmen auch infolge der Überflutung von höherliegenden Salzwiesen leicht zu. Im Piep-Tidebecken nehmen Flächenanteil und

relative mittlere Höhe der intertidalen Watten erst bei einem (extremen) Meeresspiegelanstieg von 17 mm/a von 63 auf 52 % resp. von 41 auf 37 % in 50 Jahren ab (bei 8 km² überfluteten Salzwiesen). Im Lister Tief tauchen die Wattflächen bei diesen Meeresspiegelanstiegsraten großflächig unter MT_{nw} ab, während die verbliebenen Wattflächen stark an relativer Höhe einbüßen. Im absoluten Sinne nehmen die Wattflächen im Lister-Tief-Tidebecken von 181 km² in 2050 auf 109 km² in 2100 bzw. um 40 % ab, während gleichzeitig ihre mittlere Höhenlage über MT_{nw} von +0,7 m auf +0,4 m abnimmt. In diesem Tidebecken findet entsprechend eine Sukzession in Richtung Küstenlagune statt (CPSL 2010).

Ursächlich für die relativ hohe morphologische Resilienz sind zum einen die bekannten tidebedingten asymmetrischen Transportmechanismen (u. a. van Straaten und van Kuenen 1957, Van de Kreeke und Robaczewska 1993), die zu einem Sedimentimport von der Außenküste in die Tidebecken führen, wo das Material auf den Wattflächen langfristig zur Ablagerung kommt. Dabei deuten die Modellrechnungen für die untersuchten Antriebsszenarien auf eine positive Korrelation zwischen Akkumulations- und Meeresspiegelanstiegsraten hin, d. h., je stärker der Meeresspiegelanstieg, umso effektiver wirken die o.g. Mechanismen. Die Simulationen scheinen weiterhin darauf hinzuweisen, dass die tieferen Priele eine weitere wichtige Sedimentquelle für die Akkumulationen auf den Watten darstellen können. Verursacht wird dies zum einen durch die oben genannten Transportmechanismen, die auch in den Prielen zu einem landwärts gerichteten Sediment-Resttransport führen. Da sich gleichzeitig die zu transportierenden Wassermengen infolge des Meeresspiegelanstieges und der Tidenhubzunahme erhöhen, nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten und damit die Erosionen in den Prielen zu. Das erodierte Material kann anschließend auf den Wattflächen zur Ablagerung gelangen (Hofstede 2002). Dieser Prozess funktioniert jedoch nur so lange, wie die zunehmenden Wassermengen durch die Priele transportiert werden. Im Lister-Tief-Tidebecken ist dies bei einer Anstiegsrate von 17 mm/a offensichtlich nicht mehr der Fall. Infolge der relativ geringen Höhenlage der Watten und wegen der im Vergleich zur Sedimentationsrate überproportionalen Meeresspiegelanstiegsrate, wird hier ein immer größerer Anteil der Tidewassermengen direkt über die intertidalen Wattflächen transportiert. Dies führt letztendlich zu abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten in den Prielen, wodurch die Erosion hier in Sedimentation umschlägt (Tabelle 1). Dieser von Hofstede (2015) aufgrund theoretischer Überlegungen postulierte selbstverstärkende Prozess kann als ein Kippunkt (Tipping-point) der morphologischen Resilienz von Wattenmeer-Tidesystemen bezeichnet werden, der (in Abhängigkeit vom Tidenhub, siehe unten) von Tidesystem zu Tidesystem variiert.

Die Simulationsergebnisse zeigen auf, dass die morphologische Resilienz des Piep-Tidesystems deutlich höher ist als die des Lister-Tief-Tidesystems. Eine wesentliche Ursache ist wahrscheinlich der starke Unterschied im Tidenhub zwischen beiden Tidesystemen (Hofstede et al. 2016). Entsprechend wirken die tidebedingten asymmetrischen Transportprozesse im Piep-Tidebecken stärker als im Lister-Tief-Tidebecken. Darüber hinaus zeigte Hofstede (2015) eine positive Korrelation zwischen MThb und dem Anteil des im Intertidal gespeicherten Sedimentvolumens am gesamten Intertidalvolumen für 21 Tidebecken im Wattenmeer auf (Abbildung 7). Entsprechend dauert der Prozess des Abtauchens unter MT_{nw} in Tidesystemen mit größerem MThb länger, was, wie oben dargestellt, eine höhere morphologische Resilienz impliziert. Ein weiterer Grund dafür, dass die Wirkung der asymmetrischen Transportprozesse im Lister-Tief-Tidebecken relativ

gering ist, kann die untypische Konfiguration der Insel Sylt mit einem zentralen Geestkern und einer sehr langen Nehrung in Richtung Norden sein. Während der Flutphase müssen die Tidewassermengen dadurch quasi einen Umweg um den Ellenbogen in das Tidebecken nehmen. Diese Hypothese ist durch weitere hydronumerische Modelluntersuchungen zu überprüfen. Eine negative Wirkung der Verbindungsdämme zum Festland hinsichtlich der Sedimentakkumulation im Lister-Tief-Tidebecken ist dagegen unwahrscheinlich. Naturbeobachtungen zeigen auf, dass Verbindungsdämme durch ihre strömungsberuhigende Wirkung eine stark sedimentationsfördernde Wirkung im Wattenmeer entfalten.

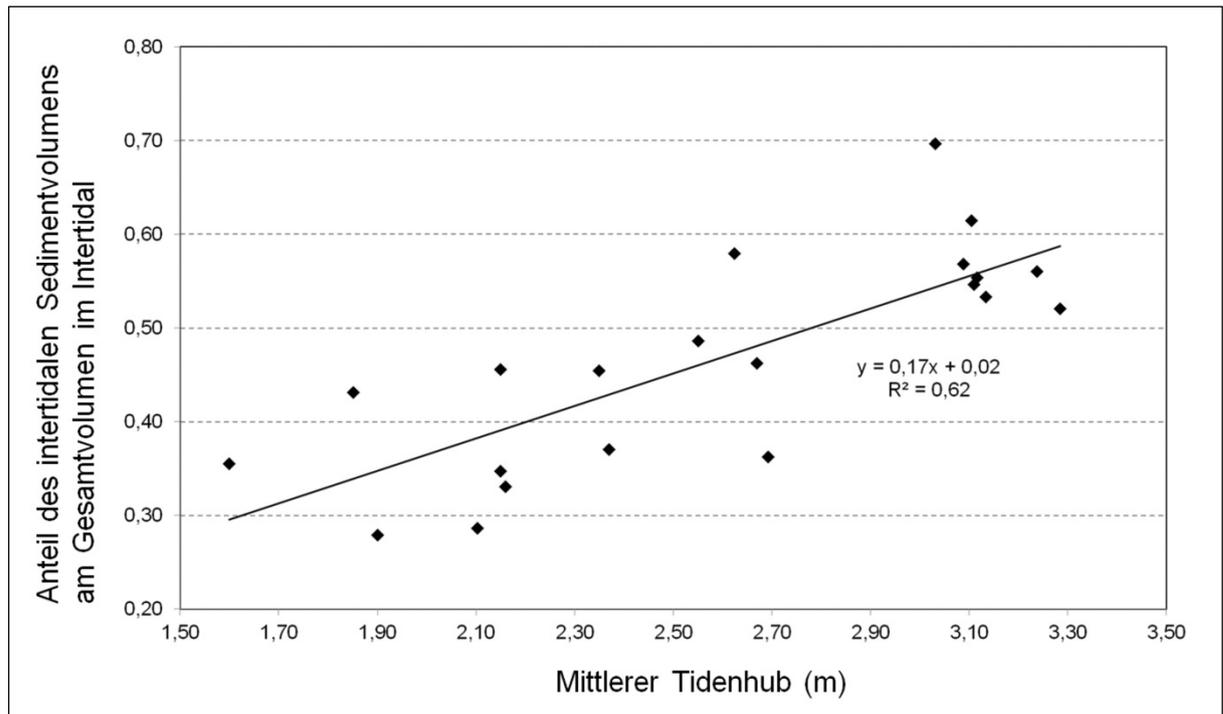


Abbildung 7: Anteil des intertidalen Sedimentvolumens am gesamten im intertidalen Bereich vorhandenen Volumen in Relation zum mittleren Tidenhub für 21 Tidebecken im Wattenmeer (nach Hofstede 2015, Daten von Biegel 1992 und Spiegel 1997).

Sowohl beim Hindcast wie auch bei den Projektionen wurden der beobachtete und der zu erwartende natürliche Küstenrückgang an der Westküste von Sylt nicht nachgebildet. Wegen der komplexen Dünensysteme und der Sandaufspülungen wäre hier ein erheblich komplexeres Modellsystem notwendig (Dissanayake et al. 2014), weshalb hier im Modell keine Erosion von Landzellen erlaubt wurde. Weiterhin wurden keine zu erwartenden Sedimentationen auf den Salzwiesen simuliert (Abbildung 6), was vermutlich auf eine noch fehlende Berücksichtigung der strömungsberuhigenden und wellendämpfenden Wirkung von Salzwiesen im numerischen Modell zurückzuführen ist. Auch scheinen die sehr starken Sedimentationen auf den Riffbögen im Ebb-Delta (Abbildung 6) morphologisch nicht plausibel. In diesem Bereich wird die morphologische Dynamik und Entwicklung stark vom Sturmflutgeschehen mitgeprägt. Die Riffbögen auf dem Ebb-Delta werden (wie die Westküste von Sylt) während Sturmfluten durch den dann vorherrschende Sturmseegang stark erodiert. Dies deutet daraufhin, dass Sturmfluten und Sturmseegang bzw. der Wind als Antriebskraft im Modell – im Gegensatz zum Tidegeschehen – noch nicht ausreichend berücksichtigt werden bzw. dass das Wellenmodell nicht alle Prozesse

berücksichtigt. Zu dieser Thematik wurden in dieser zeitlich begrenzten Studie keine Optimierungsversuche durchgeführt, auch da sie sich in erster Linie auf die Projektion morphologischer Änderungen der intertidalen Wattflächen fokussierte. Diesbezüglich wird auf die bereits von Göhren (1968) postulierte Abhängigkeit der mittleren Wathöhenlage vom Verhältnis zwischen tidebedingter Sedimentation während ruhiger Wetterlagen und sturmflutbedingter Erosion bei stürmischem Wetter hingewiesen (Hofstede 2002). Eine möglicherweise nicht ausreichend berücksichtigte sturmflutbedingte Erosion auf den Watten kann ein Grund dafür sein, dass auch beim REF-Szenario, trotz fehlender Änderungen im Antrieb, signifikante Sedimentationen auf den Watten simuliert wurden (Tabelle 1). Nach verbesserter Berücksichtigung dieser Prozesse werden sich die projizierten Höhenzuwächse auf den Watten wahrscheinlich reduzieren. Allerdings konnten in dieser 2D-Studie auch eine Reihe barokliner Prozesse nicht berücksichtigt werden, die zu einer stärkeren ästuarinen Zirkulation und vermutlich zu einem größeren Sedimentimport in die Tidebecken führen würden (Burchard et al. 2008, Becherer et al. 2017). Weiterhin wird durch das hier verwendete 2D-Modell eine Abnahme oder Umkehr der ästuarinen Zirkulation durch landwärtige Stürme (Becherer et al. 2016, Purkiani et al. 2016), die zu einer Verringerung des Sedimenttransportes führen könnte, nicht berücksichtigt. Auch hierzu besteht dringender Forschungsbedarf, der im DFG-Projekt MOREWACC (www.spp-sealevel.de) bereits teilweise angegangen wird.

Arns et al. (2017) untersuchten die möglichen Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstieges für die Bemessung von Landesschutzdeichverstärkungen an der Westküste von Schleswig-Holstein. Für drei Meeresspiegelszenarien wurden Änderungen in den für die Bemessung relevanten Parametern Sturmflut, Windstau und Sturmseeegang mit dem Modell MIKE21 simuliert und anschließend in erforderliche Deichhöhen umgerechnet. Im Ergebnis wurde u. a. festgehalten, dass die zur Gewährleistung der heutigen Schutzstandards erforderlichen Deichhöhen regional zwar unterschiedlich aber immer überproportional zum Meeresspiegelanstieg zunehmen. Diese Hypothese ergibt sich maßgeblich aus der dieser Modellstudie zugrundeliegenden Annahme einer unbeweglichen Sohle, die automatisch zu größeren Wassertiefen infolge des Meeresspiegelanstieges führt. Dadurch nehmen die Sturmwellenhöhen infolge geringerer Bodenreibung zu. Bei den Sturmflutwasserständen wird nach Arns et al. (2017) eine geringe Abnahme des Windstaus infolge größerer Wassertiefen überproportional durch höhere Sturmflutwasserstände infolge geringerer Bodenreibung und nicht-linearer Verschiebungen der Tidekomponenten im Flachwasserbereich ausgeglichen. Die Ergebnisse von SH-TREND belegen jedoch, dass sich die Topographie des Wattenmeeres infolge eines Meeresspiegelanstieges stark ändern wird. Insbesondere in den küstennahen Bereichen ist mit einem starken Mitwachsen der Watten zu rechnen. Nach Hofstede (2015) werden auch die Salzwiesen bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg infolge erhöhter Inundation verstärkt in die Höhe wachsen, wobei sie an der Festlandküste von Schleswig-Holstein seit 1996 bereits durchschnittlich um etwa 9 mm/a in die Höhe wachsen. Entsprechend sind die Ergebnisse von Arns et al. (2017) als oberste Grenzwerte zu betrachten, die durch Kopplung der hydronumerischen und morphodynamischen Modellierungen zu optimieren sind.

5 Schlussfolgerungen

Auf der Grundlage der oben dargestellten Ergebnisse und Diskussion lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Wattflächen sind sehr effektive Sedimentsenken, weshalb die Tidesysteme generell eine hohe morphologische Resilienz gegen einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg aufweisen.
- Die tieferen Priele in den Tidebecken fungieren bis zu einem Kippunkt (siehe unten) als wichtige interne Sedimentquelle für Sedimentation auf den Wattflächen. Die Außenküste stellt eine weitere Sedimentquelle dar.
- In den Wattenmeer-Tidesystemen existiert ein Kippunkt für deren morphologischen Resilienz, der durch die Meeresspiegelanstiegsrate definiert wird. Überschreitet die Meeresspiegelanstiegsrate diesen Kippunkt, werden die Priele zu Sedimentsenken und stehen den Wattflächen nicht mehr als Sedimentquelle zur Verfügung. Eine Sukzession in Richtung Küstenlagunen mit ausgedehnten Flachwasserbereichen bei MT_{nw} setzt ein.
- Die morphologische Resilienz der Tidesysteme ist positiv korreliert mit dem mittleren Tidehub, weshalb sich eine einheitliche kritische Meeresspiegelanstiegsrate, oberhalb deren die Wattflächen im Wattenmeer strukturell bzw. irreversibel unter MT_{nw} abtauchen, nicht ableiten lässt.

Für den Küstenschutz deuten die Ergebnisse von SH-TREND darauf hin, dass die Wirkung des (ufernahen) Wattenmeeres als eine den Küsten und Küstenschutzanlagen vorgelegte Seegangenergie-Umwandungszone auch bei wesentlich stärkeren Meeresspiegelanstiegsraten als bisher noch weitgehend erhalten bleibt. Die Herausforderung aus dem Klimawandel liegt hier somit in erster Linie in der Anpassung an stark zunehmende Sturmflutwasserstände und Küstenabbrüche. Für den Meeresschutz ist wahrscheinlich schon bei – relativ – geringeren Zunahmen des Meeresspiegelanstieges infolge der Abnahme von Ausdehnung und relativer Höhenlage der Watten mit negativen Konsequenzen zu rechnen, zum Beispiel für furagierende Vögel. Eine wesentliche Herausforderung wird schließlich die Entwässerung der Küstenniederungen darstellen, da sie sowohl vom Meeresspiegelanstieg als auch vom starken Anwachsen der küstennahen Watt- und Salzwiesenbereiche beeinträchtigt bzw. erschwert wird.

6 Literaturverzeichnis

Arns, A.; Wahl, T.; Dangendorf, S.; Jensen, J.: The impact of sea level rise on storm surge water levels in the northern part of the German Bight. In: *Coastal Engineering*, 81, 51–66, 2015.

Arns, A.; Dangendorf, S.; Jensen, J.; Talke, S.; Bender, J.; Pattiaratchi, P.: Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. In: *Nature Scientific Reports*, 7, 40171, doi: 10.1038/srep40171, 2017.

Becherer, J.; Floeser, G.; Umlauf, L.; Burchard H.: Estuarine circulation versus tidal pumping: Sediment transport in a well-mixed tidal inlet. In: *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 6251–6270, doi:10.1002/2016JC011640, 2016.

Becherer, J.; Hofstede, J. L. A.; Gräwe, U.; Purkiani, K.; Schulz, E.; Burchard, H.: The Wadden Sea in transition – consequences of sea level rise. In: *Ocean Dynamics*, 68, 1, 131–151, doi: 10.1007/s10236-017-1117-5, 2018.

Biegel, E. J.: Impact of sea-level rise on the morphology of the Wadden Sea within the scope of its ecological functioning. Investigations on empirical morphological relations. Annex Data report ISOS*2. Rijkswaterstaat Dienst Getijde-wateren, ISOS*2 project, phase 2, 1992.

Burchard, H.; Bolding, K.: GETM – a general estuarine transport model. Scientific documentation. Technical Report EUR 20253, EN, European Commission, 2002.

Burchard, H.; Flöser, G.; Staneva, J. V.; Riethmüller, R.; Badewien T.: Impact of density gradients on net sediment transport into the Wadden Sea. In: *Journal of Physical Oceanography*, 38, 566–587, 2008.

CPSL – trilateral working group on coastal protection and sea level rise: CPSL Third Report – the role of spatial planning and sediment in coastal risk management In: *Wadden Sea Ecosystem*, 28, Common Wadden Sea Secretariat, 2010.

CWSS and World Heritage Nomination Project Group: Nomination of the Dutch-German Wadden Sea as world heritage site. In: *Wadden Sea Ecosystem*, 24, 1–200, 2008.

Dangendorf, S.; Calafat, F.M.; Arns, A.; Wahl, T.; Haigh, I. D.; Jensen, J.: Mean sea level variability in the North Sea: Processes and implications. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119, 6820–6841, 2014.

Dissanayake, D. M. P. K.; Ranasinghe, R.; Roelvink, J. A.: The morphological response of large tidal inlet/basin systems to relative sea level rise. In: *Climate Change*, 113(2), 253–276, doi: 10.1007/s10584-012-0402-z, 2012.

Dissanayake, D. M. P. K.; Brown, J.; Karunaratna, H.: Modelling storm-induced beach/dune evolution: Sefton coast, Liverpool Bay, UK. In: *Marine Geology*, 357, 2 25–242, 2014.

Göhren, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. In: *Mitteilungen des Franzius-Instituts der TU Hannover*, 30, 142–270, 1968.

Hofstede, J. L. A.: Morphologic responses of Wadden Sea tidal basins to a rise in tidal water levels and tidal range. In: *Zeitschrift für Geomorphologie*, 46/1, 93–108, 2002.

Hofstede, J. L. A.: Entwicklung des Meeresspiegels und der Sturmfluten: ist der anthropogene Klimawandel bereits sichtbar? In: Gönnert, G.; Pflüger, B. und Bremer, J.-A. (Hrsg.): *Von der Geoarchäologie über die Küstendynamik zum Küstenzonenmanagement*. In: *Coastline Reports*, 9, 139–148, 2007.

Hofstede, J. L. A.: Theoretical considerations on how Wadden Sea tidal basins may react to accelerated sea level rise. In: *Zeitschrift für Geomorphologie*, 59/3, 377–391, 2015.

Hofstede, J. L. A.; Becherer, J.; Burchard, H.: Are Wadden Sea tidal systems with a higher tidal range more resilient against sea level rise. In: *Journal of Coastal Conservation*, doi: 10.1007/s11852-016-0469-1, 2016.

Hofstede, J. L. A., Matelski, B.; Stock, M.: Schleswig-Holsteins Klimaanpassungsstrategie für das Wattenmeer 2100. In: *Die Küste*, 87, 2019.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team: Pachauri, R. K.; Meyer, L. A. (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland. ISBN: 978-92-9169-143-2, 2014.

LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser: Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft – Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder 2017. LAWA, Erfurt, 2018.

Purkiani, K.; Becherer, J.; Klingbeil, K.; Burchard, H.: Wind-induced variability of estuarine circulation in a tidally energetic inlet with curvature. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(5), 3261–3277, 2016.

Soulsby, R.: Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. Thomas Telford, London, 1997.

Spiegel, F.: Zur Morphologie der Tidebecken im schleswig-holsteinischen Wattenmeer. In: *Die Küste*, 59, 115–142, 1997.

Stengel, T.; Zielke, W.: Der Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs auf Gezeiten und Sturmfluten in der Deutschen Bucht. In: *Die Küste*, 56, 93–118, 1994.

Ter Brake, M. C.; Schuttelaars, H. M.: Modeling equilibrium bed profiles of short tidal embayments: on the effect of the vertical distribution of suspended sediment and the influence of the boundary conditions. In: *Ocean Dynamics*, 60(2), 183–204, 2010.

Van de Kreeke, J.; Robaczewska, K.: Tide-induced residual transport of coarse sediment; application to the EMS estuary. In: *Netherlands Journal of Sea Research*, 31, 209–220, 1993.

van Goor, M. A.; Zitma, T. J.; Stive, M. J. F.: Impact of sea level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets. In: *Marine Geology*, 201, 211–227, 2003.

van Straaten, L. M. J. U.; van Kuenen, P.H.H.: Accumulation of fine grained sediments in the Dutch Wadden Sea. In: *Geologie en Mijnbouw*, 19, 329–354, 1957.

Walton, T. L.; Adams, W. D.: Capacity of inlet outer bars to store sand. In: *Proceedings of the 15th Coastal Engineering Conference, ASCE*, 1, 1919–1937, 1976.

Wang, Z. B.; Townend, I. H.; Stive, M. J. F.: Modelling of morphological response of tidal basins to sea-level rise revisited. In: *Proceedings of the 17th Physics of Estuaries and Coastal Seas Conference, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brazil*, 2014.