

Schleswig-Holsteins Klima-Anpassungsstrategie für das Wattenmeer 2100

Jacobus Hofstede¹, Birgit Matelski² und Martin Stock³

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

² *Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein Husum*

³ *Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein Tönning*

Zusammenfassung

Der anthropogene Klimawandel stellt für das Wattenmeer eine große Herausforderung dar. Unter anderem beschleunigter Meeresspiegelanstieg, erhöhte Temperaturen und geänderte Windverhältnisse können die heutigen Strukturen und Funktionen des Ökosystems signifikant ändern, was zu Beeinträchtigungen sowohl für den Natur- wie auch den Küstenschutz führen kann. In Anerkennung dieser Herausforderungen hat die schleswig-holsteinische Landesregierung im Jahre 2015 eine Klima-Anpassungsstrategie für das Wattenmeer verabschiedet. Ziel ist die langfristige Erhaltung der heutigen Strukturen und Funktionen sowie der ökologischen Integrität des Wattenmeeres bei geänderten Klimabedingungen. Die Strategie Wattenmeer 2100 wurde von einer Projektgruppe, bestehend aus Vertretern der Naturschutz- und Küstenschutzverwaltungen sowie der Lokalbevölkerung und Naturschutzverbände, erarbeitet.

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass in den nächsten Jahrzehnten keine zusätzlichen Anpassungsmaßnahmen erforderlich sein werden. In Abhängigkeit des zukünftigen Meeresspiegels werden jedoch früher oder später Küstenerosion und Sedimentdefizite im Wattenmeer derartig zunehmen, dass – ohne Gegenmaßnahmen – langfristig mit einer starken Abnahme von Wattflächen und Salzwiesen gerechnet werden muss. Wenn Anpassungsmaßnahmen zur Begegnung der sich daraus ergebenden Beeinträchtigungen für Natur- und Küstenschutz unabdingbar werden, wären adäquate Optionen mit minimalen ökologischen Auswirkungen möglich. Ein „Wachsen mit dem Meer“ wird als wichtigste Handlungsoption definiert. Entsprechend können die Defizite durch Einbringung von Sedimenten aus externen Quellen in Bereiche, von wo eine Verlagerung zu den Stellen mit Sandbedarf durch natürliche Prozesse erfolgen kann, nachhaltig ausgeglichen werden. Trotzdem bleiben, zur langfristigen Gewährleistung der heutigen Sicherheitsstandards, technische Anpassungen an Küstenschutzanlagen unumgänglich.

Schlagwörter

Wattenmeer, Meeresspiegelanstieg, Klima-Anpassung, integriertes Küstenmanagement, Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, Naturschutz

Summary

Anthropogenic climate change constitutes a main challenge for the Wadden Sea. Accelerated sea level rise, increasing temperatures and changing wind climate may strongly alter present structures and functions of the ecosystem with negative consequences both for nature conservation and for coastal risk management. Being aware of these challenges, Schleswig-Holstein State Government decided to establish an integrated climate change adaptation strategy for the Schleswig-Holstein sector of the Wadden Sea. The strategy was adopted in June 2015. It aims at the long-term maintenance of present functions and structures as well as the integrity of the Wadden Sea ecosystem in a changing climate. The strategy was prepared by a project group consisting of representatives from State authorities as well as from nature conservation organizations and local institutions. First outcome of the strategy is that extra adaptation measures will not be necessary in the coming decades. However, depending on the future rate of sea level rise, shoreline erosion and sediment deficits in the Wadden Sea will increase and sooner or later drowning of tidal flats and terrestrial habitats like beaches, primary dunes and salt marshes will start. At the time when management measures to counteract the negative developments become expedient from a nature conservation viewpoint as well as for coastal risk management, adequate actions with minimized ecological interferences are possible. It is assumed that balancing the sediment deficits as the main adaptation measure may be implemented most efficiently by concentrating sediment suppletion at locations where natural forces organize redistribution in the Wadden Sea. Local technical coastal risk management measures like the strengthening of sea defenses will, nevertheless, remain necessary as well.

Keywords

Wadden Sea, sea level rise, climate change adaptation, integrated coastal management, national park, nature conservation

1 Einleitung

Der Klimawandel und, in seiner Folge, ein beschleunigter Meeresspiegelanstieg stellen eine besondere Herausforderung für das Wattenmeer mit seinen vielfältigen Funktionen und Bedeutungen für Menschen, Tiere und Pflanzen dar. Church et al. (2013) projizieren zum Ende dieses Jahrhunderts globale Meeresspiegelanstiegsraten zwischen 4,5 und 11 mm pro Jahr. Bereits eine Rate von 4,5 mm bedeutet eine Verdreifachung der bisherigen Anstiegswerte (Dangendorf 2014). Mögliche langfristige Konsequenz ist, neben verstärkten Küstenabbrüchen und Erosionen, eine starke Abnahme von Wattflächen und Salzwiesen zugunsten von permanent wasserbedeckten Flächen im Wattenmeer (CPSL 2010). Dies wiederum würde, wegen der dadurch zunehmenden hydrologischen Belastungen der Küsten und Küstenschutzanlagen während Sturmfluten, zu einem höheren Aufwand zur Aufrechterhaltung der bestehenden Sicherheitsstandards führen (Arns et al. 2017). Darüber hinaus würde das Wattenmeer in ökologischer Hinsicht durch Habitatverluste (Watten und Salzwiesen) zunehmend degradieren (Philippart und Epping 2009, Colijn und Fanger 2011). Nicht zuletzt wegen seiner weltweit größten zusammenhängenden Wattflächen wurde das Wattenmeer 2009 zum Weltnaturerbe erklärt (CWSS 2008). Entsprechend hätte die Entwicklung des derzeitigen Ökosystems Wattenmeer in Richtung auf permanent mit Meerwasser bedeckten Flächen sowohl für den Naturschutz wie auch für den Küstenschutz weitreichende Konsequenzen.

In Schleswig-Holstein sind die Zuständigkeiten für den Meeresschutz und für den Küstenschutz im Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung (MELUND) und dort in der Abteilung Wasserwirtschaft, Meeres- und Küstenschutz gebündelt. In Anerkennung der gemeinsamen Herausforderung und Verantwortung wurde im Auftrag der Landesregierung Ende 2012 eine fachübergreifende Projektgruppe unter Leitung des Landesbetriebs für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz (LKN.SH) gegründet mit dem Ziel, eine gemeinsame Klima-Anpassungsstrategie für das schleswig-holsteinische Wattenmeer (Abbildung 1), kurz SW2100, zu entwickeln.

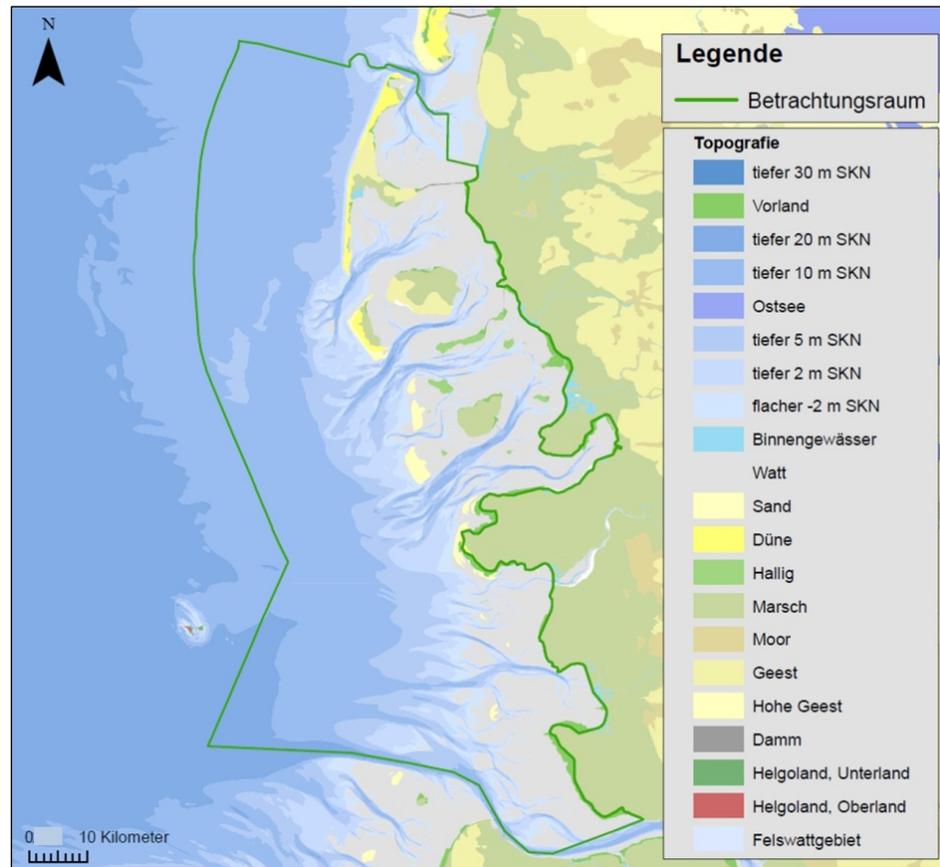


Abbildung 1: Übersichtskarte des Betrachtungsraumes (ca. 6.500 km²).

Zur Erhöhung der Transparenz und Akzeptanz des Prozesses und der Ergebnisse wirkten Vertreter der Bewohner der Inseln und Halligen und Naturschutzverbände von Anfang an aktiv in der Projektgruppe mit. In zwei Kooperationsvorhaben mit dem WWF Deutschland und mit dem Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) wurden parallel unterstützend für die Strategie-Erstellung internationale Beispiele für Klima-Anpassung an sandigen Küsten evaluiert (WWF Deutschland 2015) und Modelluntersuchungen zur künftigen morphologischen Entwicklung des Wattenmeeres für mehrere hydrologische Szenarien durchgeführt (Becherer et al. 2017, Hofstede et al. 2019, Abbildung 2). Im Jahre 2015 wurde der Entwurf der Projektgruppe durch die Landesregierung von Schleswig-Holstein als Strategie für das Wattenmeer 2100 verabschiedet (MELUR 2015).

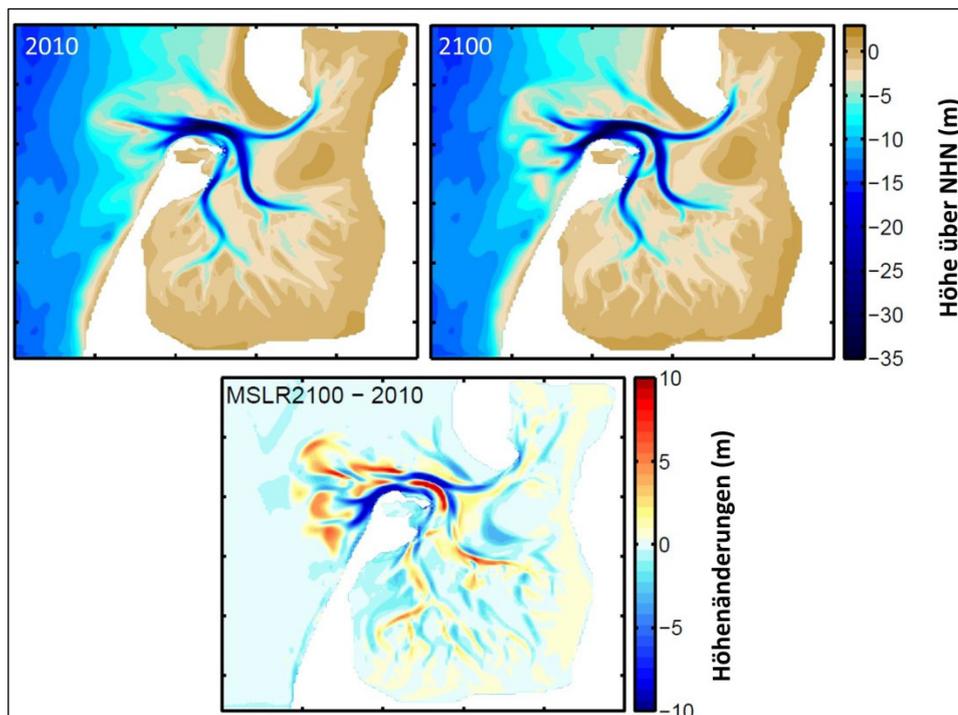


Abbildung 2: Ergebnisse SH-TREND; simulierte Topographien der Jahrgänge 2010 und 2100 für das Tidebecken Lister Tief nördlich von Sylt (oben) sowie die berechneten Höhenänderungen zwischen 2010 und 2100 für ein moderates Meeresspiegelszenario (Anstieg um insgesamt 0,45 m) (unten).

2 Die Strategie

In einem ersten Arbeitsschritt hat die Projektgruppe die vielfältigen Funktionen und Bedeutungen des Wattenmeeres von Schleswig-Holstein zusammengefasst:

- Im geologischen Sinne ist das Wattenmeer ein einmaliges Beispiel für eine junge sandige Gezeitenküste, die sich im Laufe des nacheiszeitlichen Meeresspiegelanstieges mit starkem Sedimenteintrag entwickelt hat und durch ständige Materialumlagerungen und entsprechende Verlagerung von Strukturen gekennzeichnet ist. In der Folge zeichnet sich das Wattenmeer als langfristige Sedimentsenke durch die weltweit größten zusammenhängenden intertidalen Wattgebiete aus; ein wesentlicher Grund für die Auszeichnung als UNESCO Weltnaturerbe.
- Das Leben und die Unversehrtheit der in der Region lebenden Menschen sind das höchste Gut, das nachhaltig vor den Gefahren durch Sturmfluten zu schützen ist. Das Wattenmeer mit seinen ausgedehnten Wattflächen und Sänden hat in diesem Sinne eine große Bedeutung für den Küstenschutz. In diesem Raum sowie in den Vorländern wird ein großer Teil der auf die Küste einwirkenden Energie aus Strömung und Seegang umgewandelt (Möller et al 2014). Salzwiesen bzw. Deichvorländer haben eine zusätzliche Bedeutung, indem sie die Menge des in die Niederungen einströmenden Wassers bei einem Deichbruch und damit die zu erwartenden Schäden an Leib und Gut wesentlich verringern (Thorenz und Lambrecht 2018).
- Das Wattenmeer ist ein sehr effektives Küstenfiltersystem. Große Mengen an mineralischen Sedimenten sowie organischen Stoffen und Nährstoffen werden durch

die oben genannten hydrologischen Kräfte erodiert, transportiert und bei nachlassender Strömungsgeschwindigkeit wieder abgelagert. Diese Ablagerungen bilden die Basis des Nahrungsangebotes und sind damit der „Treibstoff“ für eine außergewöhnlich hohe Primär- und Sekundärproduktion. Insgesamt wird geschätzt, dass das Wattenmeer Lebensräume für bis zu 10.000 Arten von Einzellern, Pflanzen, Pilzen und Tieren bietet. Auch zum Schutz dieser Biodiversität wurde das schleswig-holsteinische Wattenmeer bereits 1985 zum Nationalpark erklärt.

- Nicht nur für Flora und Fauna, auch für die Menschen bietet das Wattenmeer einmalige Lebensbedingungen. In Schleswig-Holstein wohnen etwa 32.000 Menschen auf den Inseln und Halligen sowie weitere 125.000 Menschen in den Küstenmarschen entlang der Festlandsküste. Der Lebensraum Wattenmeer spiegelt als gemeinsames kulturelles Erbe die Auseinandersetzungen wider, den seine an Land und Wasser angepasste Gesellschaft schon immer mit dieser reichen und fruchtbaren, wenn auch gefährvolle, vom Meer geprägte Umwelt führte und auch heute noch führt. Als weltweit einmalige Landschaft kann die Halligwelt bezeichnet werden, wo fast 300 Menschen in sehr exponierter Lage auf 32 Warften leben.
- Neben seiner Funktion als Lebensraum ist das Wattenmeer Lebensgrundlage vieler Menschen. Direkt vom Wattenmeer abhängige Arbeitsplätze wie Küstenfischer, Mitarbeiter der Fährbetriebe oder auch Küstenschutz- und Nationalparkmitarbeiter sind ebenso zu nennen wie die vielen Arbeitsplätze im Tourismussektor, die zumindest indirekt von einem intakten Ökosystem Wattenmeer abhängen.
- Das Wattenmeer hat in Anbetracht seiner Funktion als holozäne Sedimentsenke auch Bedeutung für die Entfernung von Schadstoffen aus der Umwelt. Die über die Luft und die Flüsse in das System eingetragenen Schadstoffe werden hier langfristig in die Sedimentablagerungen eingebunden.
- Die hohe Dynamik mit ständigen Formänderungen bietet umfassende Gelegenheit für die Erforschung von komplexen hydrologisch-geomorphologisch-biologischen Wechselbeziehungen und Prozessen. Die exponierten Lebensbedingungen haben zu einmaligen Entwicklungen geführt, die ein reiches Feld für soziologische, historische und kulturelle Forschungen bieten. Nicht zuletzt ist das Wattenmeer als Hotspot des Klimawandels ein Untersuchungsgebiet im Sinne der Klimaanpassung.

Aus diesen Gründen hat die schleswig-holsteinische Landesregierung in der SW2100 als übergeordnetes Ziel formuliert: „das Wattenmeer ist in seiner Einzigartigkeit mit seiner charakteristischen Dynamik entsprechend der Nationalpark-Zielsetzung, der Weltnaturerbe-Anerkennung und in seiner Funktion für den Schutz der Küste und für den Menschen zu erhalten“. Daraus ergeben sich für Naturschutz und Küstenschutz die folgenden gemeinsamen Entwicklungsziele:

- Die Schutzfunktion des Wattenmeeres als Energie-Umwandlungszone zur Gewährleistung der Sicherheit der Insel-, Hallig- und Festlandsküsten bleibt erhalten.
- Die Inseln und Halligen werden als wesentliche Strukturen des Wattenmeeres sowie als Kulturräum der Menschen erhalten.
- Die dynamischen Entwicklungsmöglichkeiten der charakteristischen Wattenmeer-Strukturen und Lebensräume mit ihren charakteristischen Arten werden zur Wiederherstellung oder Wahrung eines günstigen Erhaltungszustands gewährleistet.

- Die ökologischen Funktionen des Wattenmeeres werden erhalten.
- In der gesamten Wattenmeer-Region, die auch die an das Wattenmeer angrenzenden Festlands-, Meeres- und Ästuargebiete einschließt, wird eine nachhaltige Entwicklung erreicht, die im Einklang mit den Schutzziele des eigentlichen Wattenmeeres über das Jahr 2100 hinaus den Schutz, die Lebensqualität und die Gestaltungsmöglichkeiten der Menschen sichert.

In Anbetracht der Herausforderungen des Klimawandels und des Meeresspiegelanstiegs für die langfristige Stabilität des Wattenmeeres wurden zur Erfüllung der o. g. Ziele auf der Basis von plausiblen Szenarien nachhaltige Klima-Anpassungsoptionen entwickelt. Szenarien und Optionen werden nachfolgend dargestellt.

2.1 Die Szenarien

Strategien können nur auf der Basis von Szenarien entwickelt werden. Es handelt sich dabei um konsistente und plausible Beschreibungen von möglichen künftigen Zuständen, sog. Zukunftsbilder. Für eine aussagefähige Berücksichtigung der Bandbreite der möglichen künftigen Entwicklung wurde ein gemäßigtes (M) und ein gesteigertes (G) Szenario definiert. Grundlage für das gemäßigte Szenario ist die Annahme, dass zeitnah bedeutende globale Klimaschutzmaßnahmen zur Verringerung des Ausstoßes von Treibhausgasen umgesetzt werden (IPCC 2013). Für das gesteigerte Szenario wird angenommen, dass zeitnah keine signifikanten globalen Klimaschutzmaßnahmen zur Verringerung des Ausstoßes von Treibhausgasen umgesetzt werden. Außerdem wurden die beiden Zeithorizonte mittelfristig (50, bis Mitte dieses Jahrhunderts) und langfristig (100, bis Ende dieses Jahrhunderts) gegenüber 2000 berücksichtigt, was auch wegen des zeitlich oft nicht-linearen Verlaufes der Entwicklung sinnvoll ist.

Wesentlicher Ausgangsparameter für die Zukunftsbilder ist der zu erwartende jährliche Meeresspiegelanstieg. Ausgehend von Church et al. (2013) wurden für das moderate Szenario basierend auf globalen Projektionen Anstiegswerte von 4 mm/a bis 2050 und 6 mm/a bis 2100 festgelegt, für das gesteigerte Szenario resp. 6 und 10 mm/a. Zum Vergleich, über den Zeitraum 1935 bis 2010 betrug der Anstieg des mittleren Meeresspiegels an der Nordseeküste von Schleswig-Holstein durchschnittlich etwa 1,8 mm/a (MELUR 2013). Rein rechnerisch müssen sich jährlich auf den etwa 1.620 km² großen Wattflächen und Salzwiesen in Schleswig-Holstein fast 3,0 Mio. m³ Sediment ablagern, um diesen Anstieg höhenmäßig auszugleichen. Für die o. g. Szenarien wären die Beträge entsprechend höher. Mögliche natürliche Sedimentquellen sind die Außenküsten, die Nordsee und die Elbe. Wenn, wie von Stengel und Zielke (1994) und Arns et al. (2015) postuliert, infolge des Meeresspiegelanstieges auch der Tidenhub und damit die Tidenströmungsgeschwindigkeiten zunehmen, kommen – bei moderaten Meeresspiegelanstiegsraten – die Tiderinnen als weitere (interne) Sedimentquelle in Betracht (Hofstede et al. 2019).

In Tab. 1 sind die den zwei Szenarien jeweils für 2050 und 2100 zugrunde gelegten 22 Parameter zum Klima, zur Hydrologie, zur Morphologie und zur Biologie aufgelistet. Soweit möglich, würden die Parameter quantitativ nach Auswertung der jeweiligen Fachliteratur dargestellt. Für einige Parameter musste jedoch auf Expertenwissen zurückgegriffen bzw. qualitative Beurteilungen genutzt werden.

Tabelle 1: Änderung relevanter Klimakennwerte und abgeleiteter abiotischer und biotischer Parameter als Experteneinschätzung für die Wattenmeer-Szenarien M und G.

	Mitte des Jahrhunderts		Ende des Jahrhunderts		Quellen
	gemäßigt (M50)	gesteigert (G50)	gemäßigt (M100)	gesteigert (G100)	
Klimaprojektionen					
Zunahme Lufttemperatur (°C)	1,4	1,8	2,0	3,7	2
Zunahme Wassertemperatur (°C)	1,4	1,8	2,0	3,7	1
Änderung Sturmintensität	o	o	o	+	3
Änderung Sommerniederschläge	o	o	o	--	3
Änderung Winterniederschläge	o	o	o	++	3
Hydrologische und morphologische Projektionen und Szenarien (von den Klimaprojektionen abgeleitet)					
Anstieg mittlerer Meeresspiegel (m)	0,2	0,3	0,5	0,8	2
Anstiegsrate mittlerer Meeresspiegel (mm/a)	4	6	6	10	2
Zunahme mittlerer Tidenhub MThb (m)	0,02	0,06	0,03	0,16	4
Zunahme Sturmflutwasserstände (m)	0,2	0,3	0,5	1,2	5
Änderung Seegang	o	o	o	+	6
Vorhandensein bzw. Intensität von Eiswintern	-	--	--	---	3
Änderung Erosion der Außenküste	+	++	++	+++	7
Änderung Ebb-Deltavolumen	-	-	-	--	8
Änderung Tiderinnenvolumen	o	o	o	--	8
Änderung der Fläche des Sublitorals (%)	0	30	30	150	8
Sedimentakkumulation auf den Wattflächen (mm/a)	4	5	5	5	1
Änderung der Fläche der Watten (%)	0	-15	-15	-75	8
Sedimentakkumulation auf den Salzwiesen (mm/a)	6	8	8	10	1, 9, 10
Größe der Salzwiesenfläche	+	o	-	--	1
<i>Legende zu den Klimaprojektionen sowie zu den hydrologischen und morphologischen Projektionen und Szenarien: - = Abnahme, -- = starke Abnahme, --- = sehr starke Abnahme; o = Keine oder geringe Änderung; + = Zunahme, ++ = starke Zunahme, +++ = sehr starke Zunahme</i>					
Biologische Szenarien (von den oben genannten Projektionen und Szenarien abgeleitet)					
Pflanzen (Salzwiesen und Dünen)	o	x	x	xxx	1
Vögel (Brut- und Rastvögel)	o	x	xx	xxx	1
Unterwasserwelt (Eu- und Sublitoral)	o	x	xx	xxx	1
<i>Legende zu den biologischen Szenarien: o = keine oder geringe Veränderung, x = leichte Veränderung, xx = starke Veränderung, xxx = sehr starke Veränderung (die Veränderungen können sowohl Artenzunahmen als auch Artenabnahmen als auch Artenverschiebungen beinhalten)</i>					
Quellen: 1= Expertenschätzung; 2= IPCC 2013; 3 = www.norddeutscher-klimaatlas.de; 4 = Hein et al. (2014); 5 = Woth et al. (2006), Gasloikova et al. (2013); 6 = Grabemann et al. (2014), Groll et al. (2014); 7 = Bruun (1962); 8 = Dissanayake et al. (2012), 9 = Suchrow et al. (2012), 10 = Stock (2011).					

Das gemäßigte Szenario bis 2050 (M50): Zur Mitte des Jahrhunderts liegen die Luft- und Wassertemperaturen etwa um 1,4 °C höher als noch zu Beginn dieses Jahrhunderts, während sich die Wind- und Niederschlagsverhältnisse kaum geändert haben. Es kommt nur noch in Ausnahmen zu Eiswintern mit einem Zufrieren großer Teile des Wattenmeeres. Der mittlere Meeresspiegel (MW) ist insgesamt um etwa 0,2 m bzw. durchschnittlich um 4 mm pro Jahr angestiegen. Dies entspricht in etwa einer Verdoppelung des Meeresspiegelanstieges im letzten Jahrhundert. Infolge der höheren Wasserstände bzw. größeren Wassertiefen an der Außenküste nimmt hier die hydrologische Belastung durch Seegang zu. Der mittlere Tidenhub (MThb) hat unwesentlich um 0,02 m zugenommen, während

auch die Windstau- und Seegangverhältnisse stabil geblieben sind. Die Beschleunigung des Meeresspiegelanstieges hat zu einer verstärkten Erosion der Außenküsten (einschl. der Ebb-Deltas) geführt (Bruun 1962). Das hier freigesetzte Material hat dazu beigetragen, dass die Wattflächen den mittleren Meeresspiegelanstieg insgesamt durch Akkumulation ausgeglichen haben. Die Salzwiesen haben ihre relative Höhenlage zum Meeresspiegel durch verstärkte Akkumulation leicht vergrößert, die Fläche ist weiter angewachsen. In morphologischer Hinsicht ist der Charakter des Wattenmeeres bei leichter Flächenabnahme weitgehend unverändert. Entsprechend haben sich auch Flora und Fauna in diesem Szenario bis Mitte des Jahrhunderts – jedenfalls aus geomorphologischen Gründen – nicht wesentlich geändert. Da Luft- und Wassertemperaturen um 1,4 °C zugenommen haben, sind dadurch jedoch im obersten Bereich der Salzwiesen, im untersten Bereich der Watten sowie im Unterwasserbereich leichte Veränderungen im Artenspektrum erfolgt. Die Verringerung von Eiswintern führt ebenfalls zu einer Verschiebung von Arten. Die Abfolge der Besiedlung in der Gezeitenzone bleibt grundsätzlich gleich oder doch sehr ähnlich, ebenso wie die dominanten Arten. Im Unterwasserbereich kann es jedoch auch zu Veränderungen bei den dominanten Arten kommen.

Das gemäßigte Szenario 2050 bis 2100 (M100): Zum Ende dieses Jahrhunderts liegen die Luft- und Wassertemperaturen um etwa 1,8 °C höher als zu Beginn dieses Jahrhunderts bzw. nochmals um 0,4 °C höher als um 2050. Der Anstieg hat sich in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts verlangsamt. Die Wind- und Niederschlagsverhältnisse haben sich dagegen kaum geändert. Es kommt nicht mehr oder nur in extremen Ausnahmen zu Eiswintern mit einem Zufrieren großer Teile des Wattenmeeres. In der Folge des weiteren Temperaturanstieges verstärkt sich der jährliche mittlere Meeresspiegelanstieg (MW-Anstieg) auf etwa 6 mm, wodurch das MW um 2100 insgesamt 0,5 m höher als im Ausgangsjahr 2000 steht. Infolge der zunehmenden Wassertiefen an der Außenküste nimmt hier die hydrologische Belastung durch Seegang weiter zu. Der MThb hat insgesamt um 0,03 m zugenommen. Der leicht erhöhte Tidenhub führt entsprechend zu einem höheren Energieeintrag durch Tidenströmungen in das Wattenmeer. Die Windstau- und Seegangverhältnisse haben sich nicht signifikant geändert. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts reicht das an der Außenküste verstärkt freigesetzte Material nicht mehr aus, um die Wattflächen stabil zu halten. Die mittlere Höhenlage der trockenfallenden Wattflächen zum MW nimmt ebenso ab wie deren Flächengröße (um etwa 15 %). Die Umströmungen der Inseln und Halligen nehmen zu und die Wattbereiche im Umfeld der Inseln und Halligen werden abgetragen. Die subtidalen (ständig wasserbedeckten) Flächen nehmen entsprechend zu, weshalb – trotz leichter Tidenhubzunahme – nicht mit Erosionen bzw. Ausräumungen in den Rinnen zu rechnen ist. Obwohl die Salzwiesen den Meeresspiegelanstieg in der Höhe ausgleichen konnten und weiter angewachsen sind, hat deren Fläche auf den Inseln durch Kantenerosion leicht abgenommen. Zusammengefasst geraten die morphologischen Strukturen und Funktionen des Wattenmeeres in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zunehmend aus dem bisherigen dynamischen Gleichgewicht und zugleich verringert sich auch die Gesamtfläche des Wattenmeeres durch verstärkte Erosionen an der Außenküste. Größere Veränderungen von Flora und Fauna sind aufgrund der höheren Temperaturen vor allem im Unterwasserbereich sowie durch die geomorphologischen Veränderungen eingetreten. So kommt es im Bereich der kaum noch auftretenden Übergangsbereiche wie Quellerwiesen und Primärdünen zu einem starken Rückgang und zu einem Verschwinden von Arten. Auch der Wegfall der Eiswinter führt zu einer

stärkeren Verschiebung von Arten. Die Verringerung der Wattflächen und Salzwiesen sowie die geringere Verfügbarkeit von sicheren Brutplätzen haben zu einer Reduktion der Populationsgröße der für das Wattenmeer typischen Arten geführt. Einige Brutvogelarten wie Zwergseeschwalbe, Sand- und Seeregenpfeifer, die auf besonders betroffene Habitate angewiesen sind, sind stark reduziert.

Das gesteigerte Szenario bis 2050 (G50): Zur Mitte des Jahrhunderts liegen die Luft- und Wassertemperaturen etwa um 1,8 °C über denen des Jahres 2000, während die Niederschlags- und Windverhältnisse sich kaum geändert haben. Es kommt nicht mehr oder nur als extreme Ausnahme zu Eiswintern mit einem Zufrieren großer Teile des Wattenmeeres. Der mittlere Meeresspiegel (MW) ist insgesamt um etwa 0,3 m bzw. durchschnittlich um 6 mm pro Jahr angestiegen. Dies entspricht in etwa einer Verdreifachung des Meeresspiegelanstiegs im letzten Jahrhundert. Infolge der zunehmenden Wassertiefen an der Außenküste nimmt hier die hydrologische Belastung durch Seegang zu. Der mittlere Tidenhub (MThb) hat geringfügig um 0,03 m zugenommen, während die Windstau- und Seegangverhältnisse stabil geblieben sind. Die starke Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs hat zu einer starken Erosion der Außenküsten (einschließlich der Ebb-Deltas) geführt. Obwohl somit vermehrt Material an der Außenküste freigesetzt wird, reichen diese Mengen nicht aus, um den Meeresspiegelanstieg auf den Wattflächen auszugleichen. Die mittlere Höhenlage der trockenfallenden Wattflächen zum MW nimmt ebenso ab wie deren Flächengröße (um etwa 15 %). Die Umströmungen der Inseln und Halligen nehmen zu und die Wattbereiche im Umfeld der Inseln und Halligen werden abgetragen. Die subtidalen Flächen nehmen entsprechend zu, weshalb – trotz leichter Tidenhubzunahme – nicht mit Erosionen bzw. Ausräumungen in den Rinnen zu rechnen ist. Die Salzwiesen gleichen den Meeresspiegelanstieg durch vermehrte Sedimentation in der Höhe aus. Es kommt aber zu Kantenerosion und somit zu einer Abnahme der Vorlandflächen, besonders auf den Inseln. Zusammengefasst geraten die morphologischen Strukturen und Funktionen des Wattenmeeres aus dem bisherigen Zustand und die Gesamtfläche des Wattenmeeres verringert sich durch starke Erosionen an der Außenküste. Obwohl Luft- und Wassertemperaturen um 1,8 °C zugenommen haben, sind dadurch nur im obersten Bereich der Salzwiesen, im untersten Bereich der Watten sowie im Unterwasserbereich leichte Veränderungen im Artenspektrum erfolgt. Die Abfolge der Besiedlung in der Gezeitenzone bleibt grundsätzlich gleich oder doch sehr ähnlich, ebenso wie die dominanten Arten. Doch der Wegfall der Eiswinter führt zu einer stärkeren Verschiebung von Arten. Im Unterwasserbereich kommt es zu Veränderungen bei den dominanten Arten. Der Verlust an Wattflächen und Salzwiesen hat dagegen bereits zu Mitte des Jahrhunderts erhebliche Auswirkungen auf Flora und Fauna. Der Flächenverlust hat dabei im Bereich der Übergangszonen Quellerwiesen und Primärdünen zu einem starken Rückgang und zu einem Verschwinden von Arten sowie zu einer Reduktion der Populationsgröße der auf die betreffenden Lebensräume angewiesenen Arten geführt, zum Beispiel bei den das Wattenmeer prägenden Brut- und Rastvögeln.

Das gesteigerte Szenario 2050 bis 2100 (G100): Zum Ende dieses Jahrhunderts liegen die Luft- und Wassertemperaturen um 3,7 °C höher als zu Beginn dieses Jahrhunderts bzw. nochmals um 1,7 °C höher als um 2050. Die Niederschläge nehmen über das Jahr genommen leicht zu, wobei die Winterniederschläge signifikant um bis zu 30 % zu- und die Sommerniederschläge entsprechend abnehmen. Dies hat für die Entwässerung und landwirtschaftliche Nutzung der Küstenniederungen starke Konsequenzen. Zum

Ende des Jahrhunderts ist mit leicht zunehmenden mittleren und extremen Windgeschwindigkeiten zu rechnen. Es kommt nicht mehr zu Eiswintern mit einem Zufrieren großer Teile des Wattenmeeres. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts verstärkt sich der jährliche MW-Anstieg auf etwa 10 mm, wodurch das MW um 2100 insgesamt 0,8 m höher als im Basisjahr 2000 steht. Infolge der stark zunehmenden Wassertiefen an der Außenküste nimmt hier die hydrologische Belastung durch Seegang signifikant zu. Der MThb hat insgesamt um 0,08 m zugenommen. Der erhöhte Tidenhub führt entsprechend zu einem höheren Energieeintrag durch Tidenströmungen in das Wattenmeer. Die geänderten Windverhältnisse haben dazu geführt, dass die im Sturmseegang enthaltene Energie leicht angestiegen ist, während der Windstau um ca. 0,3 m zugenommen hat. Die maximalen Sturmflutwasserstände können somit um etwa 1,2 m höher auflaufen als zu Beginn des Jahrhunderts. Entsprechend nehmen die hydrologischen Energieeinträge in das Wattenmeer durch Triftströmungen zu. Die bereits zur Mitte des Jahrhunderts begonnene morphologische Entwicklung setzt sich deutlich verstärkt fort. Die Außenküste weicht überall und teilweise sehr stark zurück. Die Wattflächen tauchen verstärkt unter dem Meeresspiegel ab, wodurch ihre Flächengröße um etwa 75 % abnimmt, entsprechend vergrößert sich die Subtidalfläche (siehe hierzu auch Hofstede et al. 2019). Die Umströmungen der Inseln und Halligen nehmen stark zu und die Wattbereiche im Umfeld der Inseln und Halligen werden stark abgetragen. Da das Tideprisma somit mehr Strömungsraum im ständig wasserbedeckten Bereich hat, nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten in den Tiderinnen (mit Ausnahme der Seegats) ab und es kommt hier zur Sedimentation. Die Salzwiesen sind in einigen Bereichen durch zunehmende Akkumulation in der Lage, den Meeresspiegelanstieg auszugleichen, trotzdem gibt es auch hier vermehrt regelmäßige und höhere Überflutungen, während die hydrologischen Belastungen auf die Salzwiesen und damit die Kantenerosion stark zunehmen. Entsprechend verringern sich die Salzwiesenflächen zum Ende des Jahrhunderts deutlich. Zusammengefasst ist zum Ende des Jahrhunderts eine morphologische Systemänderung von wattflächen-dominierten Tidebecken zu flachwasserdominierten Bereiche bei gleichzeitiger Abnahme der Gesamtfläche des Wattenmeeres bereits weit vorangeschritten. Aufgrund der größeren Wassertiefen ist an den Küsten und Küstenschutzanlagen mit einer Zunahme der hydrologischen Belastung durch (Sturm-)Seegang zu rechnen. In biologischer Hinsicht verstärkt sich die ungünstige Entwicklung in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts erheblich. Eine sehr starke Abnahme der das Wattenmeer eigentlich prägenden Arten ist eingetreten, sowohl bei der Zahl der Arten wie bei der Größe der Bestände. Dies liegt stark an den geomorphologischen Veränderungen, aber auch an einer temperaturbedingten Verdrängung der heutigen Flora und Fauna zugunsten wärmeliebender Arten. Für Seehunde und Kegelrobben bedeutet dies, dass deren Liege-, Ruhe- und Aufzuchtplätze stark eingeschränkt sind. Das Wattenmeer wird dann nur noch in erheblich verringertem Maß die heutige Funktion eines lebenswichtigen Aufenthaltsorts für viele arktisbewohnende Arten von Watvögeln erfüllen. Auch die typischen Brutvögel sind stark betroffen und ihre Zahl reduziert. Einige Arten wie Zwergseeschwalbe, Sand- und Seeregenpfeifer sind ganz verschwunden, da sie auf besonders betroffene Habitate angewiesen sind.

Beide Szenarien beschreiben somit künftige Entwicklungen, in denen sich das Wattenmeer – ohne entsprechende Anpassungsmaßnahmen – im hydromorphologischen und biologischen Sinne stark wandeln wird. Der Unterschied zwischen beiden Szenarien ist im Wesentlichen der Zeitfaktor. Während im gemäßigten Szenario erst in der zweiten

Hälfte dieses Jahrhunderts mit stärkeren Änderungen zu rechnen ist, finden im gesteigerten Szenario schon zu Mitte des Jahrhunderts signifikante Änderungen statt. Dabei ist die Feststellung wichtig, dass die Änderungen sich in den anschließenden Jahrhunderten, die in dieser Strategie nicht berücksichtigt werden, wahrscheinlich fortsetzen werden.

2.2 Konsequenzen und Anpassungsoptionen

Die in den Szenarien aufgezeigten hydro-morphologischen Änderungen im Wattenmeer führen in unterschiedlichem Ausmaß und zeitlich versetzt zu Konsequenzen für die langfristige Gewährleistung des Schutzes der Küstenbewohner vor Sturmfluten und gegen Landabbruch. Nachfolgend werden relevante Konsequenzen für den Küstenschutz thematisch und, soweit angebracht, regional aufgelistet:

- In Abhängigkeit vom Szenario werden ab Mitte (G-Szenario) bzw. zu Ende (M-Szenario) dieses Jahrhunderts infolge größerer Wassertiefen die hydrologischen Belastungen durch Sturmseegegang auf Küstenhochwasserschutzbauwerke auf den Inseln und Halligen sowie an der Festlandsküste zunehmen. Entsprechend nimmt die Hochwassergefahr für die Küstenniederungen und Halligwarften zu.
- In Abhängigkeit vom Szenario werden die Sturmflutwasserstände an den Küstenhochwasserschutzanlagen zu Mitte des Jahrhunderts um 0,2 bis 0,3 m sowie bis Ende des Jahrhunderts um 0,5 bis 1,2 m zunehmen. Beim Versagen dieser Anlagen ist somit auch mit größeren Wassertiefen in den überfluteten Bereichen zu rechnen. Da der Durchflussquerschnitt bei Deichbrüchen limitiert ist, würden die Wassertiefen in den Kögen allerdings nicht in dem Maße wie die Sturmflutwasserstände ansteigen. Größere Wassertiefen in den Küstenniederungen erschweren die Katastrophenabwehr und führen zu einer Zunahme der Schadensereignisse im Katastrophenfall.
- Die Westküsten der Inseln werden bereits im M-Szenario ab Mitte des Jahrhunderts zunehmend erodieren, dann auch an Stellen, die heute noch stabil sind. Hierdurch erhöht sich die Gefahr von Inseldurchbrüchen auf Sylt und Amrum. Diese ungünstige Entwicklung verschärft sich entsprechend zu Ende des Jahrhunderts bzw. im G-Szenario.
- Die Ostküsten von Sylt und Amrum sowie die sandigen Küsten von Föhr und dem westlichen Eiderstedt werden einer ähnlichen erosiven Entwicklung unterliegen, was entsprechend zu zunehmenden Gefährdungen für die dort vorhandenen sozio-ökonomischen Nutzungen führen wird.
- Die Halligen werden in beiden Szenarien künftig öfter überflutet, was hier durch vermehrten Sedimenteintrag zu einem stärkeren Höhenwachstum führen wird. Allerdings wird dieses in keinem Szenario ausreichen, um den schnelleren Meeresspiegelanstieg auszugleichen. Entsprechend werden mögliche sozio-ökonomische Nutzungen auf den Halligen bereits zu Mitte (G-Szenario) bzw. zu Ende dieses Jahrhunderts (M-Szenario) eingeschränkt.
- Um die Halligen herum können die Wattsockel bereits im M-Szenario ab Mitte des Jahrhunderts lokal erodieren. Hierdurch nehmen die Höhenunterschiede zwischen Watt und Hallig und damit die hydrologischen Belastungen der Halligen zu.
- Durch die größeren Wassertiefen wie auch durch die Zunahme des Höhenunterschiedes zwischen Salzwiese und vorgelagertem Watt infolge der unterschiedlichen

Sedimentationsraten werden im G-Szenario zu Mitte des Jahrhunderts und im M-Szenario zu Ende des Jahrhunderts die hydrologischen Belastungen in der Übergangszone zwischen Watt und Salzwiese zunehmen. Die Folge ist Kantenerosion und abnehmende Tiefe (Breite) der Salzwiesen. Bei Unterschreiten einer Tiefe von etwa 200 m wird ihre Schutzwirkung (Verringerung der hydrologischen Belastungen während Sturmfluten) für die dahinterliegenden Küstenschutzbauwerke entsprechend abnehmen, wodurch diese im Sturmflutfall zunehmend belastet werden.

- Die stärkeren hydrologischen Belastungen infolge größerer Wassertiefen im Wattenmeer werden ab Mitte (G-Szenario) bzw. zu Ende (M-Szenario) dieses Jahrhunderts den Küstenschutzbauwerken (Deiche, Warften, Deckwerke, Buhnen, Lahnungen, Sandaufspülungen, usw.) verstärkt zusetzen, was zu Beeinträchtigungen ihrer Funktionalität (Unterhaltungszustand) und damit zu einer Zunahme der Versagenswahrscheinlichkeit im Belastungsfall (gemessen am aktuellen Zustand der Schutzbauwerke) führen wird.

Zusammenfassend sind – bis auf zunehmende Erosionen an den sandigen Küsten der Inseln und im direkten Umfeld der Halligen – im M-Szenario zu Mitte des Jahrhunderts noch keine signifikanten negativen Konsequenzen für den Küstenschutz zu erwarten. Beeinträchtigungen für die Sicherheit der Küstenbewohner werden im M-Szenario im Laufe der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts wahrscheinlich. Im G-Szenario muss dagegen bereits zur Mitte des Jahrhunderts von negativen Konsequenzen für den Küstenschutz bzw. von Beeinträchtigungen der Sicherheit der Küstenbewohner infolge von Sturmfluten und Landabbruch ausgegangen werden. Die Bewertung aus Sicht des Küstenschutzes zeigt auf, dass zur langfristigen Gewährleistung der heutigen Sicherheitsstandards in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts – bei gleichbleibenden Techniken und Verfahren – zusätzlicher Aufwand erforderlich wird.

Aus der Sicht des Naturschutzes soll jegliches Management des Nationalparks sich in erster Linie darauf beschränken, der Natur den nötigen Freiraum zu verschaffen, um sich nach ihren eigenen Gesetzmäßigkeiten zu entwickeln. Ein „Hands-off-Management“ ist die oberste Maxime des Naturschutzes bei der Bewertung der Szenarien. Für die Bewertung der Szenarien bedeutet dies zunächst, dass korrigierende Eingriffe nicht erforderlich sind, solange das Wattenmeer ohne substanzielle Verluste hinsichtlich seiner Funktionen und seiner Größe mit den Folgen des menschengemachten und beschleunigten Meeresspiegelanstiegs auch alleine zurechtkommt. Dies könnte für das gemäßigte Szenario (M-Szenario) noch bis zur Mitte des Jahrhunderts zutreffen. In dem Zeitraum danach sind jedoch auch im M-Szenario derart deutliche Veränderungen zu erwarten, wie sie für das gesteigerte Szenario (G-Szenario) schon vor 2050 vorherzusehen sind. Das Wattenmeer würde in seinen entscheidenden Werten geschädigt und zunehmend degradiert werden. Um langfristig den in den Szenarien aufgezeigten negativen Auswirkungen auf die Strukturen und Funktionen des Wattenmeeres entgegenzuwirken, sind entsprechend des M-Szenarios spätestens in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts, vorbeugend vermutlich aber auch schon vorher, und im Fall des G-Szenarios auch schon in der ersten Hälfte des Jahrhunderts Maßnahmen zu ergreifen, die die Strukturen und Funktionen und die Integrität des Wattenmeeres gewährleisten. Dazu wird es weiterhin gehören, dem Wattenmeer in erster Linie Raum für eine eigenständige Entwicklung zu bieten und dafür sicherzustellen, dass eventuelle Maßnahmen nicht mehr als notwendig eingreifen und möglichst naturnah ausgeführt werden.

Handlungsoptionen

Ein sogenanntes „Wachsen mit dem Meer“ wird in der SW2100 als wichtigste Handlungsoption definiert. Unter der Voraussetzung, dass das Wattenmeer in seiner Größe und in seinen Funktionen erhalten bleiben und der Schutz der Menschen gewährleistet werden soll, ist es erforderlich, das durch den Meeresspiegelanstieg entstehende Sedimentdefizit auszugleichen. Je nach Szenario kann schon zur Mitte des Jahrhunderts ein maßgebliches Sanddefizit eintreten. Daher ist der Import von natürlichen Sedimenten z. B. von Sand aus der vorgelagerten Nordsee in das Wattenmeer in Form eines Sedimentmanagements nach heutigen Erkenntnissen die wichtigste Anpassungsoption. Eine solche Anpassungsoption erhält das Wattenmeer großflächig als Naturraum so naturnah wie dies unter den Bedingungen des Klimawandels bzw. des beschleunigten Meeresspiegelanstieges möglich ist und wirkt zugleich im Sinne eines flächenhaften Küstenschutzes. Feste Strukturen zur Festlegung von Tidebecken sind grundsätzlich keine Option, da sie großflächig keinen Sedimentgewinn bringen. Auch handelt es sich beim Sedimentmanagement um eine No-Regret-Option, da der erforderliche Umfang der Maßnahmen flexibel an die Anforderungen, d. h. vor allem die Anstiegsrate des Meeresspiegels, angepasst werden kann.

Der wahrscheinlich einfachste, günstigste und am wenigsten in die natürlichen Prozesse eingreifende Weg zur Einbringung des Sedimentes ist es, dieses konzentriert an solchen Stellen einzubringen, von denen aus die dynamischen Kräfte des Wattenmeeres selbst für eine Versorgung der Gebiete mit „Sandhunger“ sorgen. Hierfür erscheint aus heutiger Sicht besonders das Einbringen in das Ebb-Delta der verschiedenen Tidebecken und/oder an die Außenküste zielführend. Nach bisherigem Kenntnisstand ist damit zu rechnen, dass dort ausgebrachtes Sediment letztlich in alle Bereiche der Tidebecken mit „Sandhunger“, also auch bis auf die Wattflächen und Salzwiesen, gelangt. Damit verursacht diese Option wahrscheinlich die geringsten ökologischen Beeinträchtigungen. Es sind hierzu jedoch noch Erkenntnisse zu gewinnen, wie sich das Sediment tatsächlich im Wattenmeer verteilt. An kritischen Stellen kann es erforderlich sein, ein lokales Sanddefizit bzw. eine lokale Erosionsstelle durch Sandaufspülungen auszugleichen. Bisherige Beispiele hierfür sind die Westküste von Sylt und die Föhrer Südküste. Die vor Sylt aufgespülten Sandmengen, bis Ende 2019 insgesamt 51 Mio. m³ (Abbildung 3), haben vermutlich bereits zur Stabilisierung des nordfriesischen Wattenmeeres beigetragen.

Untersuchungen zur Plausibilisierung dieser Annahme laufen im INTERREG-Vorhaben „Building with Nature“ (Teilvorhaben BASEWAD: Balancing Sediment Deficits in the Wadden Sea). Weiterhin kann es erforderlich sein, durch Erosion gefährdete Bauwerke auch durch Sedimentmanagement zu schützen. Alternativ zu konstruktiven Schutzmaßnahmen, wie z. B. Buhnen, kann dies also auch durch Sedimentumlagerung oder Sedimenteintrbringung erfolgen.

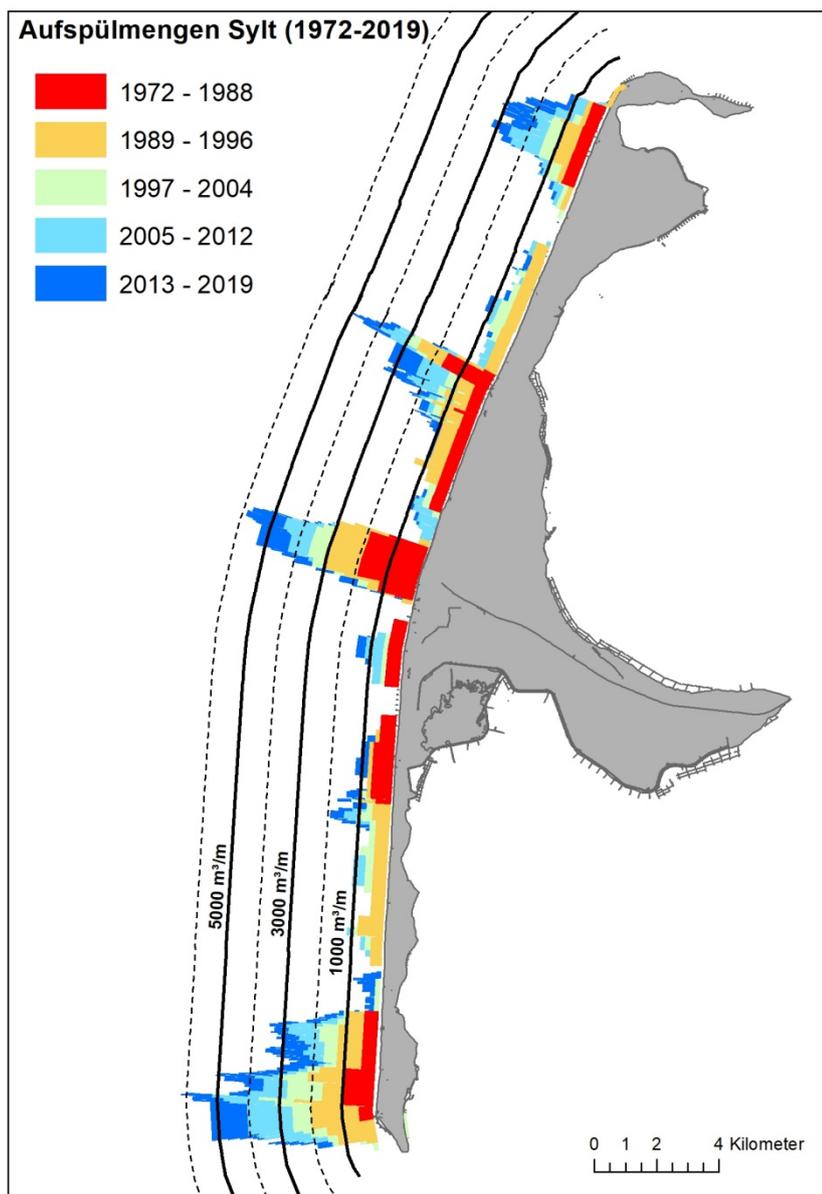


Abbildung 3: kumulierte Sandaufspülungen an der Westküste von Sylt seit 1972 (LKN.SH).

In Abhängigkeit von den örtlichen Risiken und den ökologischen Verhältnissen können ggf. Sedimenteinbringungen Alternativen zum Lahnungsbau zur Sicherung von Abbruchkanten oder zur Sicherung von Halligrändern mit geringer Abbruchtendenz sein. Sedimenteinbringungen können auch für eine Vermeidung von Umströmungen von Inseln und Halligen sowie für die Anlage von Hochwasserschutzdünen geeignet sein. Auf jeden Fall ist der Einsatz von Sediment geeignet, den ökologischen Belangen des Naturraums Wattenmeer besser gerecht zu werden als starre technische Bauweisen.

Auf den Halligen ist ein Mitwachsen der Flächen mit dem Meeresspiegel durch Maßnahmen zu fördern, die hinreichend viele Überflutungen mit hinreichender Menge an absetzbarem Sediment auf der Hallig begünstigen. Hierbei spielt die Gestaltung der Regionaldeiche und Deckwerke eine wesentliche Rolle. Weitere Anpassungsmöglichkeiten können in der Steuerung des Sielbetriebs oder in der Form der Landbewirtschaftung liegen.

Für die Erhaltung der Salzwiesen spielen eine ausreichende Sedimentzufuhr und eine natürlich ausgebildete Vegetation eine Schlüsselrolle bei der Anpassung an den steigenden Meeresspiegel. Dies sollte weiterhin überwiegend durch Maßnahmen realisiert werden, die sich in das natürliche System einfügen. Lahnungsfelder sind auch weiterhin das Mittel der Wahl, da sie Sedimentationsprozesse in den Feldern fördern. Die Ausführung und Unterhaltung sollte sich an dem natürlichen System orientieren und einen natürlichen Übergang zwischen den Lebensräumen ermöglichen.



Abbildung 4: Konzept Klimadeich mit Baureserven (MELUND).

Zur langfristigen Gewährleistung der heutigen Sicherheitsstandards bleiben technische Anpassungen der Küstenschutzanlagen unumgänglich. Deiche und konstruktive Hochwasserschutzanlagen wie z. B. Sperrwerke sind vorausschauend und flexibel hinsichtlich des steigenden Meeresspiegels anzupassen. Ein Beispiel hierfür ist das Profil eines Klimadeiches, der für Landesschutzdeiche eine Baureserve für einen stärker ansteigenden Meeresspiegel vorsieht (Abbildung 4). Zur Wahrung der Integrität des Wattenmeeres sind

Verstärkungsmaßnahmen an Küstenhochwasserschutzanlagen nach Möglichkeit so zu gestalten, dass kein zusätzlicher Flächenverbrauch im Wattenmeer erfolgt und die ökologischen Beeinträchtigungen minimiert werden. Es kann sinnvoll sein, die zweite Deichlinie zu verstärken, um die im Falle eines Bruchs der ersten Deichlinie überfluteten Flächen und damit die zu erwartenden Schäden zu begrenzen. Hierbei sind die Größe und Nutzung der Köge zu berücksichtigen.

Als weitere Handlungsoption werden in der SW2100 raumordnerische sowie städte- und bauleitplanerische Regelungen zur Schadensminimierung im Sinne eines Risikomanagements insbesondere bei neuen Planungen genannt. Neben Nutzungsbeschränkungen in besonders gefährdeten Bereichen kann dies die Anlage von Warften (Beispiel Hafencity in Hamburg), das Vorsehen von Verschottungen und Schutzräumen in besonders hochwassergefährdeten Bereichen (Beispiel Halligen) oder auch das Höherlegen von Straßen und Bahndämmen in Kögen zur Überflutungsbegrenzung und/oder als Evakuierungsrouten sein. Hierfür sind innovative und nachhaltige Konzepte zu entwickeln (Abbildung 5).



Abbildung 5: „Häuser auf Stelzen“ auf der Insel Røm (DK) als Beispiel für hochwasserangepasstes Bauen in überflutungsgefährdeten Küstenniederungen (MELUND).

2.3 Forschungsbedarf und erste Umsetzungsansätze

Die Erstellung der Klimaanpassungsstrategie für das Wattenmeer 2100 erfolgte auf der Grundlage vorhandenen Wissens sowie daraus entwickelten möglichen Projektionen in die Zukunft. Bei der flächendeckenden und fachlich übergreifenden Betrachtung wurden jedoch Kenntnislücken erkennbar, aus denen sich Bedarf an Forschung, Entwicklung und Monitoring ergibt. Grundsätzlich ist der fachübergreifende Ansatz bei zukünftiger Forschung zu berücksichtigen.

Um morphologische Veränderungen im Wattenmeer zu erkennen, werden im Wesentlichen Vermessungsdaten verschiedener Jahrgänge miteinander verglichen. Idealerweise ist ein Gebiet in allen Tiefenlagen synoptisch vermessen. Um dies mit den verschiedenen im Wattenmeer vermessenden Institutionen zu erreichen, wurde das überregionale behördenübergreifende Rahmenvermessungskonzept Nordsee zwischen Bund und Ländern erarbeitet (WSV 2017). Darauf aufbauend ist eine Harmonisierung bei der Datenhaltung und -auswertung in Arbeit. Um jedoch Projektionen auf Grundlage der beschriebenen

Szenarien zu erstellen, bedarf es eines leistungsstarken hydro-morphodynamischen Modells des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres. Zu diesem Zweck kooperiert der LKN.SH mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), die ein Modell für das gesamte Wattenmeer aufstellt und dieses anhand einer Modellregion im nordfriesischen Wattenmeer kalibriert (Abbildung 6). Bei der Modellregion handelt es sich um den Bereich der Südspitze der Insel Sylt, den Norden Amrums und den Westen der Insel Föhr, der in einigen Bereichen morphologisch sehr dynamisch ist. Zudem wurde hier im Rahmen des oben genannten Projektes BASEWAD im Sommer 2017 westlich der Ortslage Hörnum (Südspitze Sylt) im Vorstrand einmalig 400.000 m³ Sand eingebracht, deren natürliche Umlagerung mittels eines Monitorings (Vermessung und Biologie) erfasst wird. Für 2019 ist eine erneute Einbringung von 400.000 m³ Sand vorgesehen.

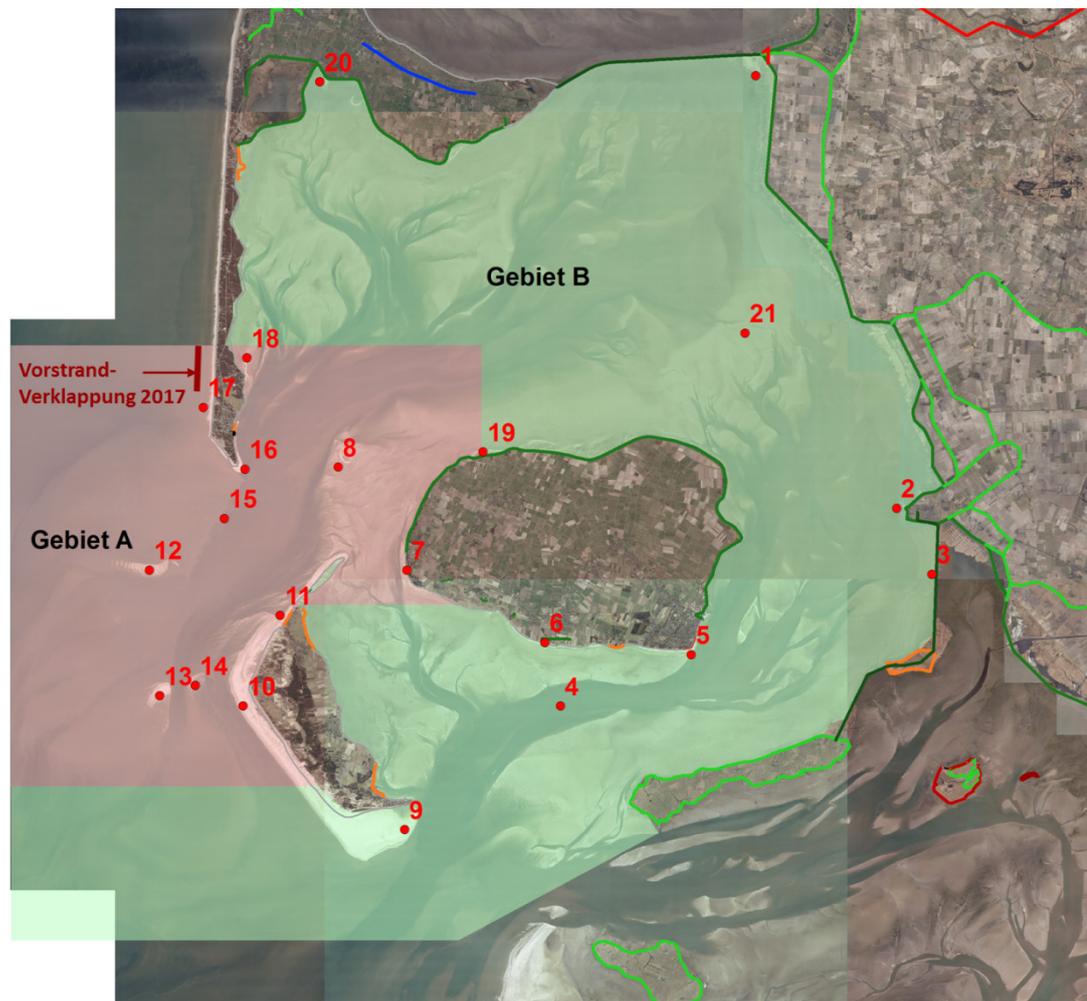


Abbildung 6: Fokusgebiet mit Kalibrierungspunkten für ein hydro-morphodynamisches Wattenmeer-Modell (LKN.SH).

Derzeit wird der Sand für Aufspülungen und Einbringung aus der Entnahmestelle Westerland III gewonnen. Mittelfristig sind jedoch Alternativen zu erkunden, insbesondere in Hinblick auf die in der SW2100 erarbeitete Hauptanpassungsoption „Einbringen von Sediment in das Wattenmeer“. Erste kartographische Recherchen ergaben, dass ein Gebiet westlich Eiderstedt außerhalb des Nationalparks und seewärtig der 15 m-Tiefenlinie geeignet sein könnte. Zu dem Zwecke der „Erforschung des geologisch/sedimentologischen Aufbaus und der Habitatverteilung im Übergangsbereich Watt – Schelf zwischen

der Amrumbank und der Eiderrinne“ sind daher der LKN.SH, das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) und die Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) und dort die Arbeitsgruppen Sedimentologie, Küsten- und Schelfgeologie sowie Marine Geophysik und Hydroakustik eine Forschungskoooperation eingegangen.

Im Rahmen eines weltweit einzigartigen Erwärmungsexperimentes untersuchen Wissenschaftler der Uni Hamburg in Kooperation mit dem Smithsonian Environmental Research Center in den USA, wie sich unter einer kombinierten oberirdischen sowie unterirdischen Erwärmung entsprechend der Klimaszenarien die Pflanzenwelt, die Bodenfauna und die Ökosystemfunktionen verändern. Salzwiesen tragen unmittelbar zum Klimaschutz bei, indem sie beispielsweise Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre aufnehmen und langfristig speichern. Die Ergebnisse der Studie sollen dazu beitragen, Strategien für ein nachhaltiges Management der Salzwiesen in Zeiten des Klimawandels zu entwickeln.

Die Ergebnisse obiger Forschungen werden in den kommenden Jahren vorliegen und dazu beitragen, das Systemverständnis für das Wattenmeer zu verbessern. Darauf aufbauend werden weitere Fragen aufkommen, die wiederum Herausforderungen an die Forschung bedeuten. Neben den genannten Projekten sind auch Aspekte der Sedimentation auf den Halligen, das hydrologische Monitoring und biologische Fragestellungen weiter zu verfolgen.

3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Wichtigste Schlussfolgerung der SW2100 ist, dass sich das Wattenmeer – wenn keine wirksamen Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen getroffen werden – spätestens in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts infolge des menschenverursachten beschleunigten Meeresspiegelanstiegs grundlegend verändern wird. Zunehmende Sedimentdefizite im Wattenmeer werden zu Beeinträchtigungen der Sicherheit der Küstenbevölkerung vor Sturmfluten führen und starke Änderungen der charakteristischen Eigenschaften, aufgrund derer das Wattenmeer zu Nationalpark und Weltnaturerbe wurde, bewirken.

Gemäß SW2100 soll das Wattenmeer mit seinen Funktionen für Natur- und Küstenschutz sowie möglichst auch in seiner Größe langfristig erhalten bleiben. Dabei hat die Sicherheit der Küstenbevölkerung oberste Priorität. Ein wirksamer globaler Klimaschutz ist hierfür die wichtigste Voraussetzung. In der Region sind jedoch zusätzlich Klimaanpassungsmaßnahmen erforderlich. Nach heutigen Kenntnissen ist ein Sedimentmanagement dafür die wichtigste Option. Daraus folgt:

- Anpassungsoptionen und Maßnahmen, die dem Naturgeschehen nicht entgegenstehen, erhöhen die dynamische Entwicklungsmöglichkeit und damit die natürliche Anpassungsfähigkeit (Resilienz) des Wattenmeeres im Klimawandel.
- Bei Küstenschutzmaßnahmen ist bereits heute darauf zu achten, dass sie einem Sedimentmangel im Wattenmeer keinen Vorschub leisten. Wünschenswert wäre es, wenn solche Maßnahmen zu einer Zunahme des Sediments führten.
- Neben den notwendigen Anpassungen des Hochwasserschutzes sind weitere Anpassungsmaßnahmen unumgänglich, vor allem durch Sedimentmanagement. Alle Maßnahmen sind ökologisch verträglich und nachhaltig unter Berücksichtigung sozio-ökonomischer und kultureller Aspekte zu gestalten.

- Obwohl noch genug Zeit für die Vorbereitung solcher Maßnahmen verbleibt, müssen die fachlichen Grundlagen durch Messprogramme, unter anderem als Frühwarnsystem, und durch Pilotprojekte verbessert werden.
- Aufwand und Kosten für die Erhaltung des Wattenmeeres werden sich unvermeidlich erhöhen.

Eine signifikante Beeinträchtigung des Wattenmeeres in seinen heutigen Strukturen und Funktionen konnte für die nächsten Jahrzehnte nicht abgeleitet werden, d. h. kurz- bis mittelfristig sind wahrscheinlich keine Anpassungsmaßnahmen erforderlich, um klimawandelbedingten Sedimentdefiziten im Wattenmeer zu begegnen. Vielmehr besteht ausreichend Zeit, sich auf fachlicher und gesellschaftlicher Ebene mit detaillierten Klimafolgeanpassungen auseinanderzusetzen, Erfahrungen zu sammeln und Erfolgsaussichten abzuschätzen. Es wurden bereits Kooperationen geschlossen und Projekte begonnen, die einen Kenntniserwerb hinsichtlich der Zielerreichung der SW2100 versprechen.

4 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.; 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*, doi: 10.1007/s10236-017-1117-5, 2017.

Bruun, P.: Sea-level rise as a cause of shore erosion. In: *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88, 117–130, 1962.

Church, J. A.; Clark, P. U.; Cazenave, A.; Gregory, J. M.; Jevrejeva, S.; Levermann, A.; Merrifield, M. A.; Milne, G. A.; Nerem, R. S.; Nunn, P. D.; Payne, A. J.; Pfeffer, W. T.; Stammer, D.; Unnikrishnan, A. S.: Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 2013.

Colijn, F.; Fanger, H. U.: Klimabedingte Änderungen in aquatischen Ökosystemen: Elbe, Wattenmeer und Nordsee. In: von Storch, H.; Claussen M (Hg.): *Klimabericht für die Metropolregion Hamburg*. Heidelberg, 177–194, 2011.

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, 1–51, 2010.

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

- Dangendorf, S.; Calafat, F. M.; Arns, A. j.; 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, doi:10.1002/2014JC009901, 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: *Climatic Change*, 113, 253–276, 2012.
- Gaslikova, L.; Grabemann, I.; Groll, N.: Changes in North Sea Storm Surge Conditions for Four Transient Future Climate Realizations. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 66 (3), 1501–1518, 2013.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change: Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers. Genf, <https://www.ipcc.ch/>.
- Hofstede, J. L. A.; Becherer, J.; Burchard, H.: Morphologische Projektionen für zwei Tidesysteme im Wattenmeer von Schleswig-Holstein: SH-TREND. In: *Die Küste*, 87, 2019.
- MELUR – Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein: Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein – Fortschreibung 2012. MELUR, Kiel, 2013.
- MELUR – Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein: Strategie für das Wattenmeer 2100. MELUR, Kiel, 2015.
- Möller, I.; Kudella, M.; Rupprecht, F.; Spencer, T.; Paul, M.; van Wesenbeeck, B. K.; Wolters, G.; Jensen, K.; Bouma, T. J.; Miranda-Lange M.; Schimmels, S.: Wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions. In: *Nature Geoscience*, 7, 727–731, 2014.
- Philippart, K.; Epping, E.: Quality status report - climate change and ecology. In: *Wadden Sea Ecosystem*, 25, 3–8, 2009.
- Stengel, T.; Zielke, W.: Der Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs auf Gezeiten und Sturmfluten in der Deutschen Bucht. In: *Die Küste*, 56, 93–118, 1994.
- Stock, M.: Patterns in surface elevation change across a temperate salt marsh platform in relation to sea-level rise. In: *Coastline Report*, 17, 33–48, 2011.
- Suchrow, S.; Pohlmann, N.; Stock, M.; Jensen, K.: Long-term surface elevation changes in German North Sea salt marshes. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 98, 71–83, 2012.
- Thorenz, F.; Lambrecht H.-J.: Untersuchungen zur Überflutungsausbreitung im Fall von Deichbrüchen. In: *Die Küste*, 85, 2018.
- Woth, K.; Weisse, R.; von Storch, H.: Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models. In: *Ocean Dynamics*, 56, 3–15. 2006.
- WSV – Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes: Überregionales behördenübergreifendes Rahmenvermessungskonzept, Version 1.0, Stand: 09.02.2017.
- WWF Deutschland: Klimaanpassung an weichen Küsten: Fallbeispiele aus Europa und den USA für das Schleswig-Holsteinische Wattenmeer. WWF Deutschland, Berlin, 2015.