

Küstenschutz Ostseeküste Schleswig-Holstein 2100



Projekt KOMMRUEBER

Dr. Kai Ahrendt, Prof. Dr. Wilfried Hoppe,
Geographisches Institut der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

zug ZUKUNFT
UMWELT
GESELLSCHAFT

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Küstenbewohner kennen das: bei Sturmfluten werden Kliffs angegriffen und Strände ausgeräumt. Einerseits führt dies zu Landverlusten, andererseits aber auch zur Beeinträchtigung der Strandnutzung. Auch wenn teilweise der abgetragene Sand im Laufe der Zeit wieder auf dem Strand landet, so ist dies jedoch immer mit Sandverlusten verbunden. Allerdings können Strände in Richtung des Sandtransportes hiervon auch in gewissem Maß profitieren. Daher sind zweifelsohne Küstenschutz- und Stranderhaltungsmaßnahmen notwendig. Aufgrund des prognostizierten Klimawandels (Meeresspiegelanstieg) werden die Anstrengungen im Küstenschutz zunehmen müssen.



Küstenentwicklung

Die nacheiszeitliche Küstenentwicklung hängt stark von der morphologischen Vorprägung des Geländes durch Schmelzwasserrinnen, Förden und Geschiebeablagerungen ab. Vor 9.000 Jahren lag der Meeresspiegel weit unter -30 Metern, je nach Autor (Abb. 1). Der Meeresspiegel stieg zuerst rasch, bis ca. 6.000 BP auf wenige Meter (-3 bis -5 m) unterhalb des heutigen Meeresspiegels an. Der Anstieg verlangsamte sich anschließend und um Christi Geburt lag der mittlere Meeresspiegel fast auf heutigem Niveau. Anschließend kam es zu positiven und negativen Meeresspiegelentwicklungen. Der sichtbare Meeresspiegelanstieg zu Ende der Eiszeit beruht dabei auf dem Abschmelzen der Inlandseismassen ebenso wie der heutige beschleunigte Meeresspiegelanstieg durch die Erderwärmung sowie durch die Ausdehnung der Wassermassen.

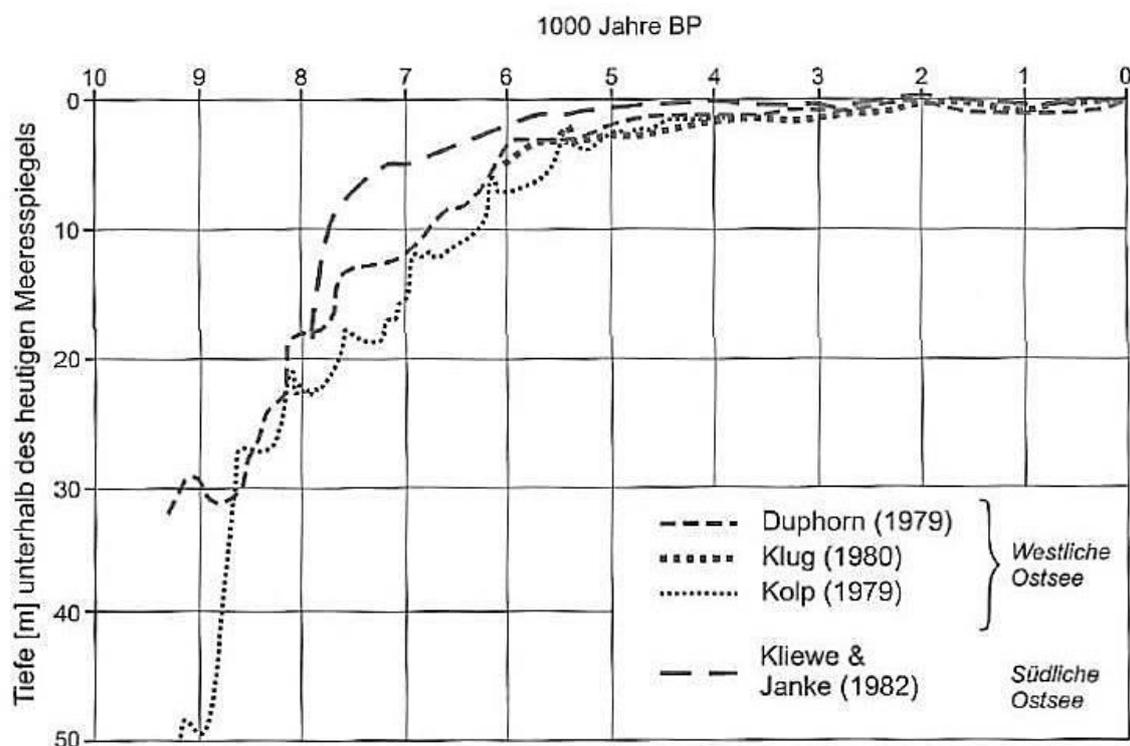


Abb. 1: Meeresspiegelanstiegskurve (aus Niedermeyer et al. 2011)

Die Küstenlinie lag vor 2.000 – 3.000 Jahren teilweise vor der heutigen und teilweise aber auch hinter der heutigen Küstenlinie (Abb. 2). Dies ist einerseits durch den Rückgang der Kliffs gegeben, andererseits durch Sedimentation von Nehrungen und Strandwällen. Die Kliffs und der Vorstrand liefern dabei das Material für den Aufbau dieser sogenannten Ausgleichsküste. Abbildung 2 zeigt schematisch diese Sedimenttransportrichtungen. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts begann der Mensch dann mit Küstenschutzbauten wie den Deich in der Probstei, Barsbeck, Wisch, Wendtorf in das Geschehen einzugreifen. Teilweise wurden die Deiche auf Strandwällen errichtet und damit der natürliche Sedimenttransport verändert. Auch kamen schon Buhnen zum Einsatz.

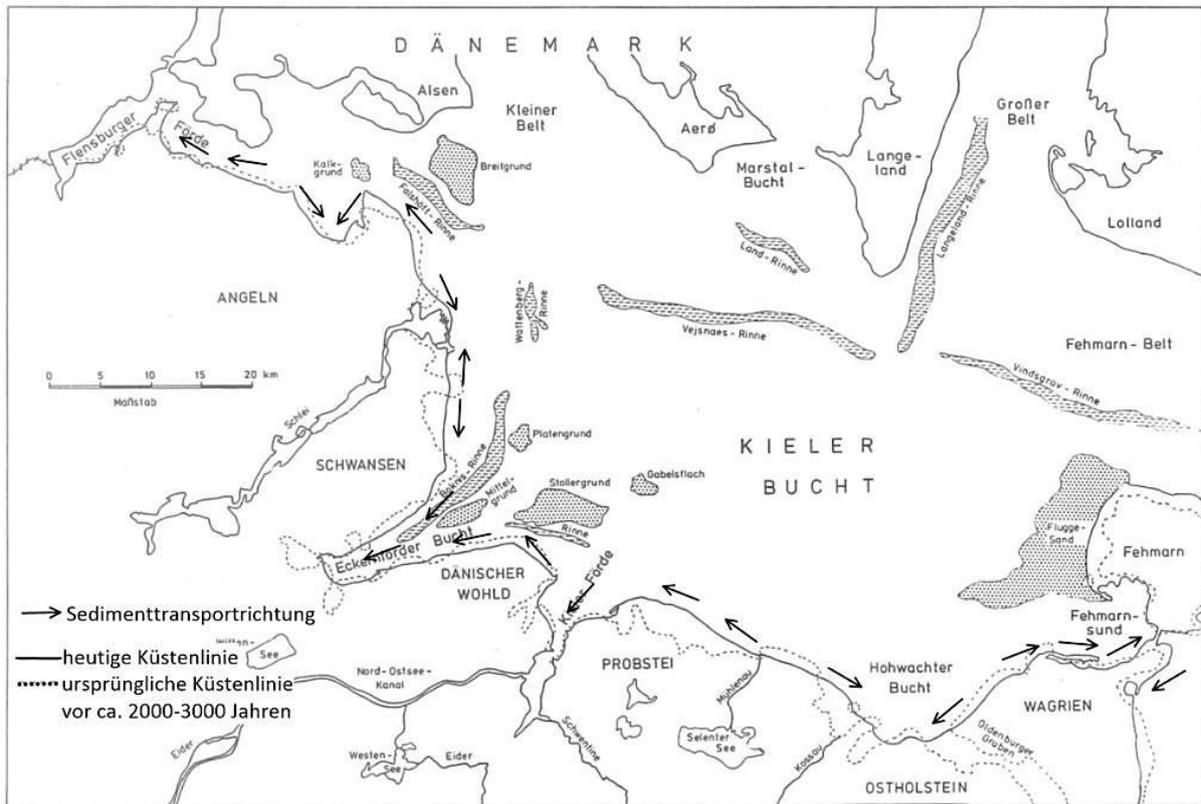
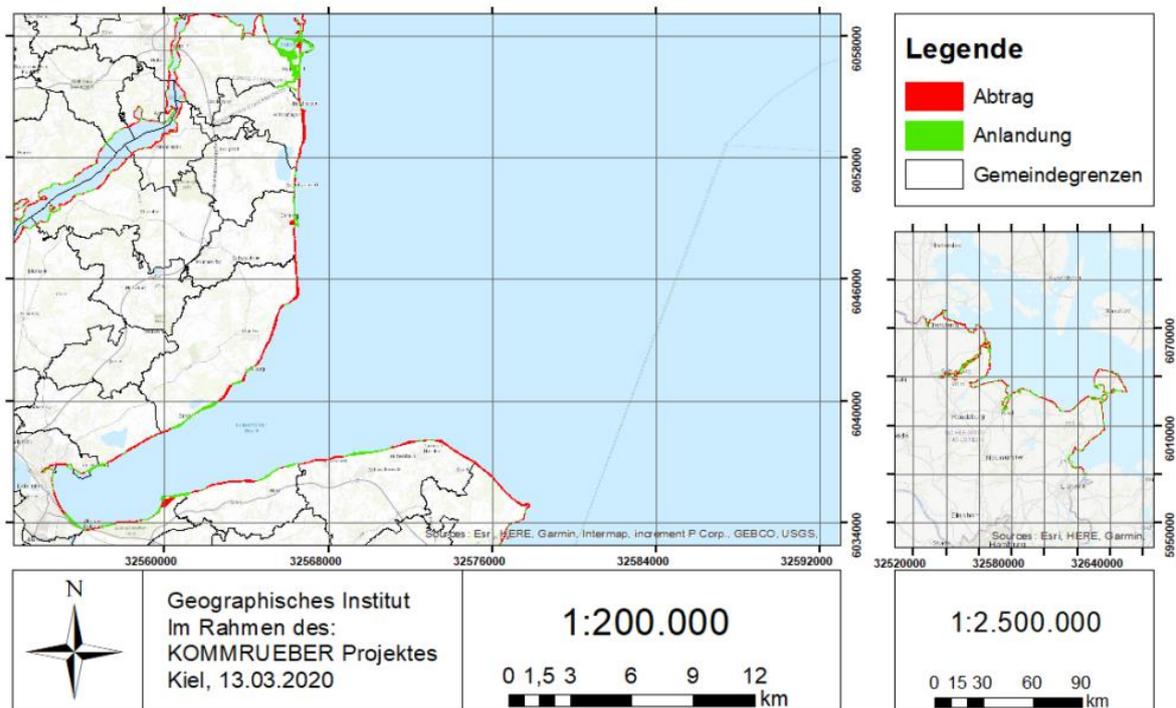


Abbildung 2: Entwicklung der Küstenlinie von vor ca. 2.000 – 3.000 Jahren bis heute sowie Angabe der Sedimenttransportrichtungen (verändert und ergänzt nach STERR 1991)

Im Jahre 1878 wurde die deutsche Ostseeküste erstmalig komplett vermessen. Auch wenn die Technologie nicht mit der modernen Aufnahme der Küstentopographie standhalten kann, so sind die Vermessungsergebnisse für eine Analyse der Küstenlinienveränderung von grundlegender Bedeutung. Die folgenden Abbildungen zeigen die Veränderung der Küstenlinie zwischen 1878 und 2010 am Beispiel Eckernförder Bucht und Ostholstein. Die gesamte Ostseeküste ist auf der Webseite kommrueber.de dargestellt. Deutlich wird, dass es mehr Erosionsbereiche als Anlandungsbereiche gibt. Besonders die Anlandungsbereiche in urbanen Gebieten sind keine echte Anlandung sondern eine seeseitige Verschiebung der Küstenlinie durch Hafenbauten und Eindeichungen und können somit nicht den natürlichen Prozessen zugerechnet werden.

Die Veränderung der Uferlinie von 1878 bis 2010



Die Veränderung der Uferlinie von 1878 bis 2010

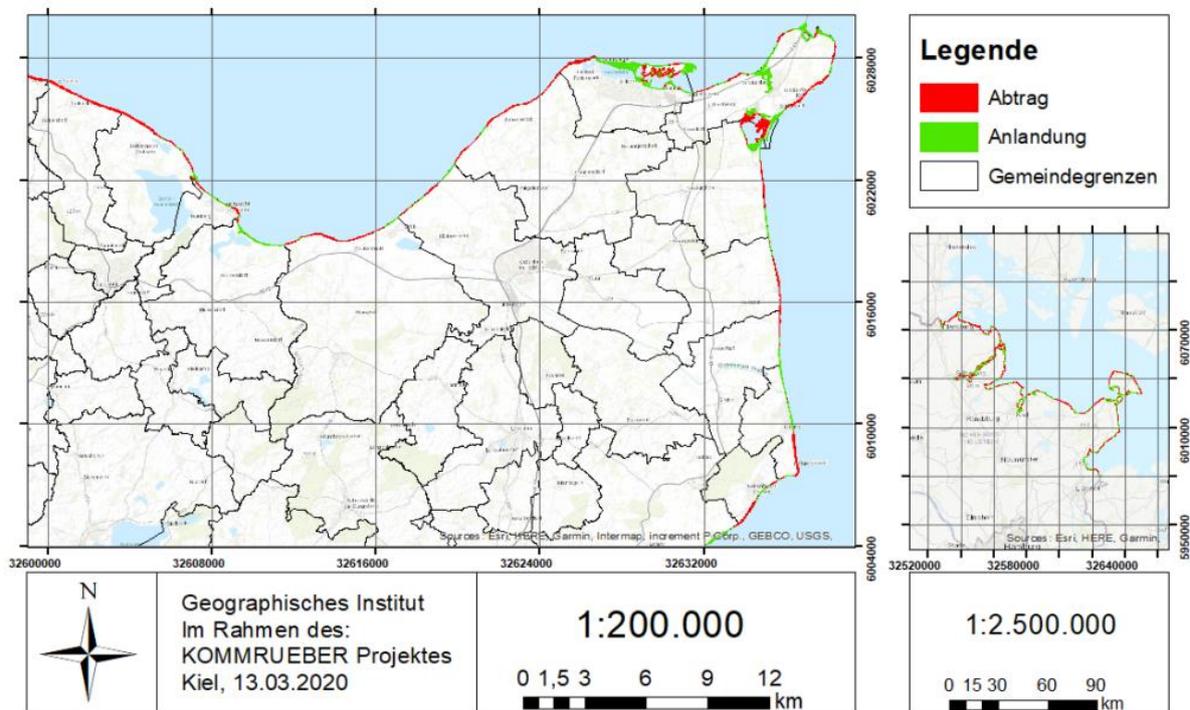


Abb. 3: Die Veränderung der Uferlinie von 1878 bis 2010 am Beispiel Eckernförder Bucht und Ostholstein (nach LKN-SH 2017)

Die folgende Abbildung 4 zeigt die Küstentopographie der Schleswig-Holsteinischen Ostseeküste am Beispiel Howacht aus den Jahren 2015-2016. Diese Topographie wurde aus Laser-Scan Daten erstellt und hat ein Raster von 1 x 1 m Land-Meer übergreifend mit einer vertikalen Auflösung von wenigen Zentimetern und liegt auf der Webseite kommrueber.de für die gesamte Ostseeküste vor. Die Daten wurden dankenswerter Weise vom LKN zur Verfügung gestellt.

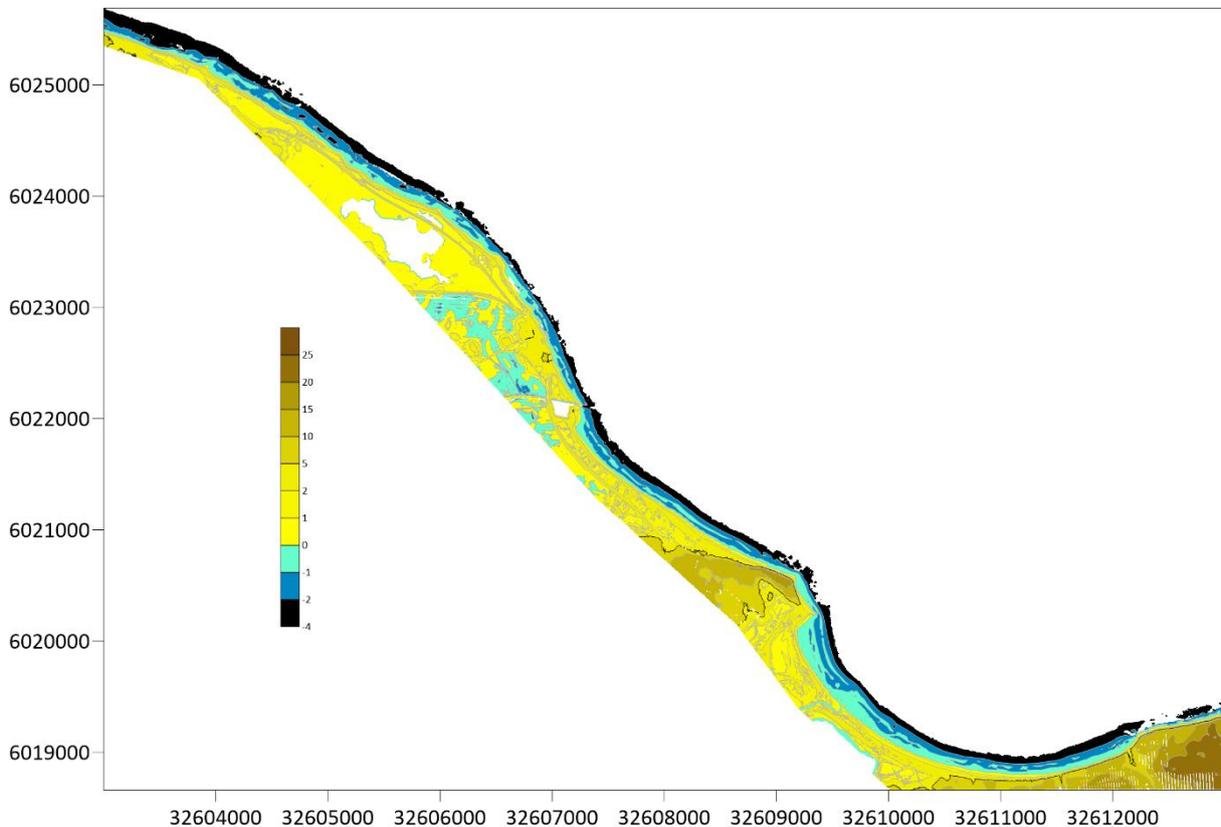


Abb. 4: Küstentopographie für die Jahre 2015/2016 am Beispiel Howacht

Klassischer Küstenschutz

Im Folgenden werden die klassischen Küstenschutzmaßnahmen beschrieben.

Uferschutzmauer

Eine Uferschutzmauer (Abb. 5) trennt den Landbereich vom Wasserbereich und soll Erosion sowie Zerstörung von Bauwerken und Infrastruktur durch Wellen und Hochwasser verhindern. Uferschutzmauern sind harte Bauwerke die aus Stein, Beton oder auch aus Gabionen (Gitterkäfige gefüllt mit Steinen) bestehen können. Größtenteils sind Uferschutzmauern senkrecht stehende Bauten, können aber auch leicht konkav sein, um einen Wellenüberschlag über das Bauwerk zu verhindern.

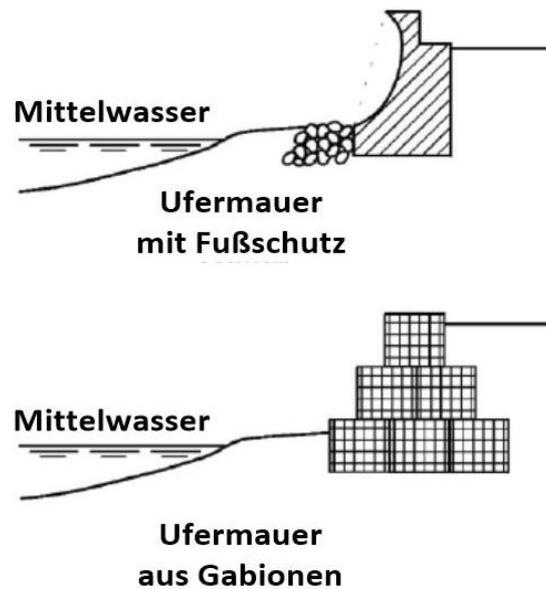


Abb. 5: Uferschutzmauer (verändert nach MANGOR et. al 2017)

Deckwerk

Ein Deckwerk ist ein schräg angeordnetes Bauwerk welches Wellenschlag auf die Uferlinie verhindern soll. Ein Deckwerk besteht üblicher Weise aus Steinen, Beton oder ähnlichen harten Substraten. Ein Deckwerk kann als raue Baumaßnahme ausgeführt werden, das heißt die Oberfläche des Bauwerkes ist nicht eben, sondern strukturiert. Hierdurch soll der Wellenauflauf gestört werden. Deckwerke kommen üblicher Weise als Schutz an Kliffs, Dünen, Deichen etc. zum Einsatz (Abb. 6).

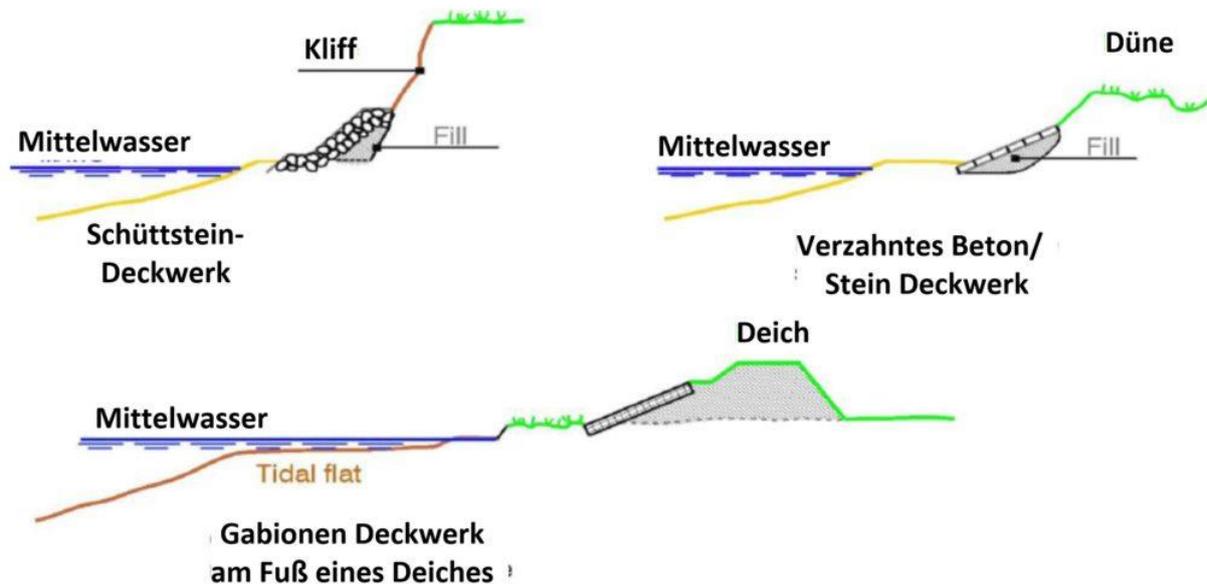


Abb. 6: Deckwerk (verändert nach MANGOR et. al 2017)

Buhnen

Buhnen sind küstennormale also senkrecht zur Küste stehende Bauwerke. Sie sollen den küstenparallelen Sedimenttransport unterbinden. Auf der Luvseite kommt es zur Sedimentablagerung und auf der Leeseite zu Erosion (Abb. 7), welches Vor- und Nachteile hat. Einzelbuhnen wirken dabei nur sehr lokal und weisen starke Leerosion auf, die dann die Nachbarbereiche trifft. Je nach Länge und Einbindung in das Unterwasserrelief sind die Auswirkungen unterschiedlich. Dies trifft auch auf Buhnenfelder zu. Zwischen den einzelnen Buhnen kommt es ebenfalls zur Luvanlandung und zur Leerosion (Abb. 8). Durch Veränderung der Buhnenlänge zum Ende eines Buhnenfeldes kann die Leerosion vermindert werden. Für den Bau von Buhnen und Buhnenfeldern ist ein vertieftes Wissen über die Strand- und Vorstranddynamik notwendig.

Um negative Folgen der Buhnen durch Störung des natürlichen Sedimenttransports zu reduzieren, können aber entsprechende Maßnahmen getroffen werden. In Mecklenburg-Vorpommern hat man schon seit längerer Zeit halbdurchlässige Buhnen gebaut. Halbdurchlässig bedeutet hier, dass ab einer gewissen Entfernung vom Strand Lücken in den Buhnen vorhanden sind, so dass hier ein gewisser Sedimenttransport stattfinden kann. Eine weitere Möglichkeit ist, den Bereich der Buhne, der in den Strand einbindet, auf etwas über den mittleren Meeresspiegel abzusenken. Während erhöhter Wasserstände kann dann auf dem Strand Sediment transportiert werden. Eine Besonderheit sind die T-Buhnen in der Probstei. Dieses ist eine Kombination aus Wellenbrecher und Buhne.

Übliche Baumaterialien sind Holzpfähle, Betonpfähle und Steine. Buhnen aus Metall werden auf Grund des Rostens kaum noch bzw. gar nicht mehr eingesetzt. Aus Holz- und Betonpfählen lassen sich relativ einfach die halbdurchlässigen Buhnen erstellen. Anzumerken ist, dass Buhnen kein Sediment ins System einbringen, sondern nur die Verweildauer des Sandes erhöhen können. Eine künstliche Sandzufuhr ist daher ratsam.

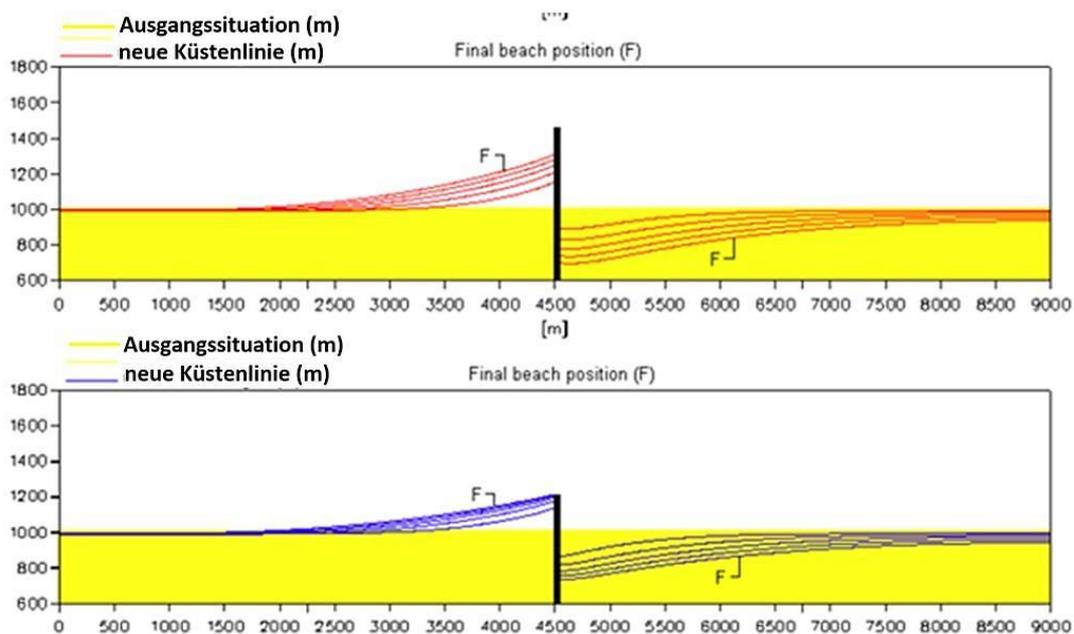


Abb. 7: Einzelbuhnen (verändert nach MANGOR et. al 2017)

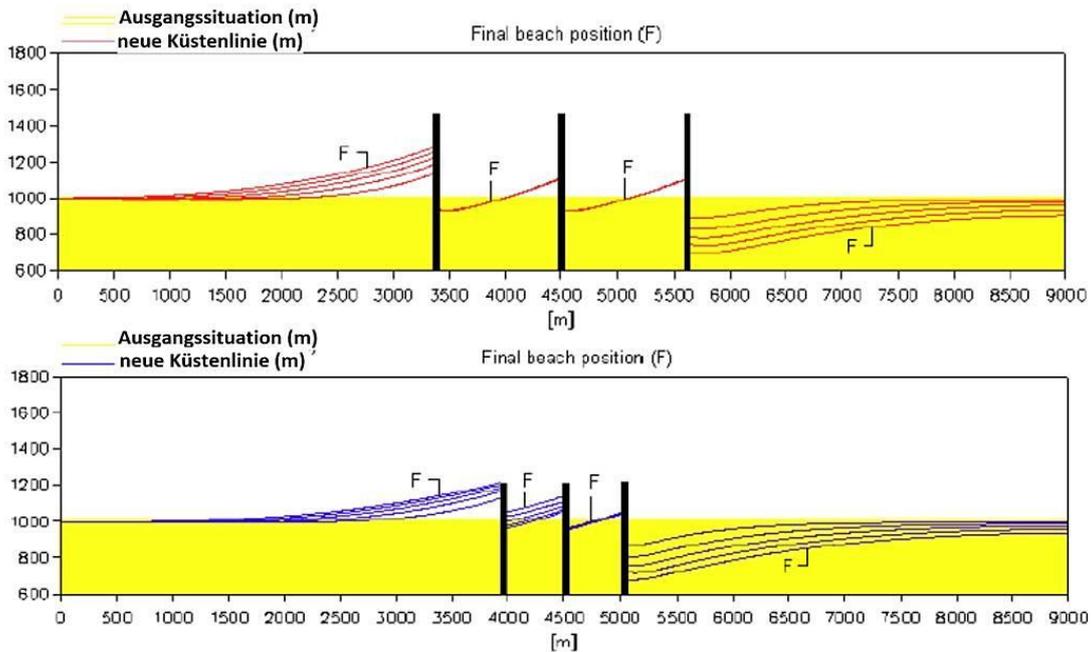


Abb. 8: Bühnenfeld (verändert nach MANGOR et. al 2017)

Wellenbrecher

Ein Wellenbrecher ist ein küstenparalleles massives Bauwerk welches dem Zweck dient, die Wellenenergie, die sonst auf dem Strand trifft, zu reduzieren. Je nach Abstand von der Küste und der Länge des Wellenbrechers kommt es zur Strandverbreiterung hinter dem Wellenbrecher. Bei langen Wellenbrechern können sich sogenannte Tombolos ausbilden. Tombolos schließen an den Wellenbrecher an wohingegen bei kurzen Wellenbrechern ein Salient entsteht, der nicht bis zum Wellenbrecher reicht (Abb. 9 und 10). Ein Tombolo hat aber auch den Effekt, dass der Sedimenttransport entlang der Küste stark eingeschränkt wird und es zu Erosion aufgrund von Sedimentmangel in Transportrichtung kommt. Je nach Entfernung und Höhe des Wellenbrechers sind die Auswirkungen auf den Strand und den Vorstrand unterschiedlich). Üblicher Weise werden Wellenbrecher aus Natursteinen errichtet oder aber auch aus Geotextilien. Eine Alternative sind sogenannte abgetauchte Wellenbrecher. Diese ragen bei Normalverhältnissen nicht aus dem Wasser heraus, wirken daher unter moderaten Bedingungen nicht so stark wellenenergiereduzierend wie Wellenbrecher die aus dem Wasser herausragen.

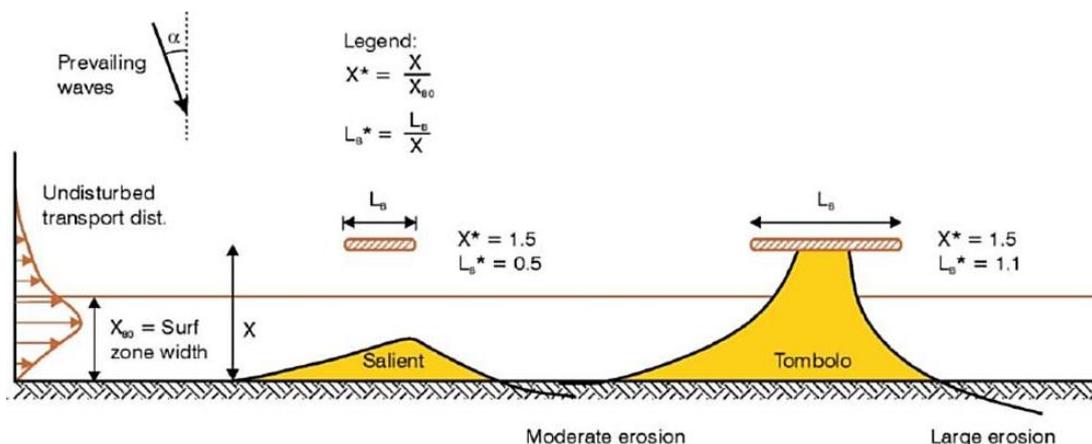


Abb. 9: Wellenbrecher Draufsicht (verändert nach MANGOR et. al 2017)

Example:

singulärer einzelner Wellenbrecher



- + natürlich aussehender Strand
- + gute Schutzfunktion, gute Wasserqualität
- stabile Tombolos Unterbrechung des Sedimenttransportes
- starke Leeerosion
- Einfangen von Treibgut
- Gefahr für Badende

Reihe einzelner Wellenbrecher

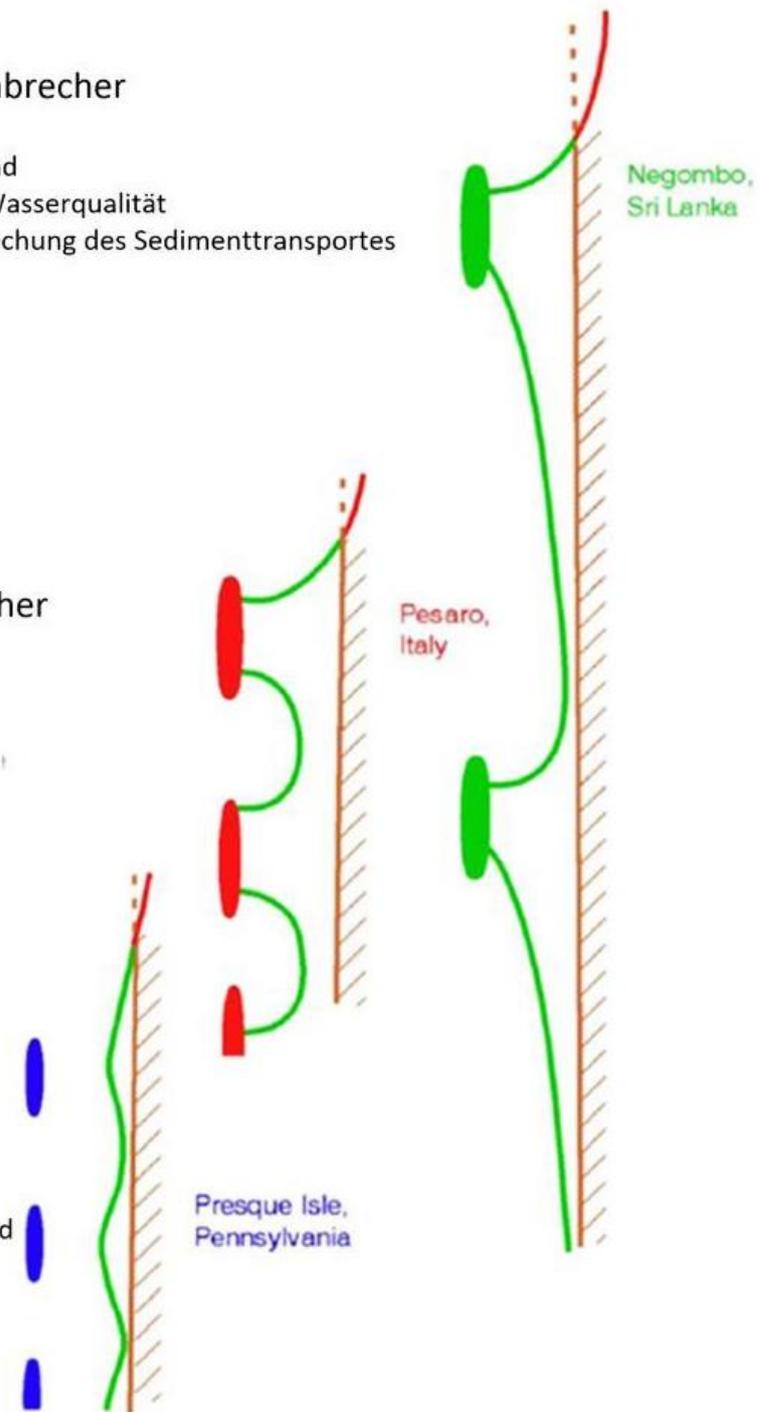


- + stabile "Pocket" Strände
- + gute Schutzfunktion
- unästhetisch
- schlechte Wasserqualität
- Einfangen von Treibgut
- starke Lee-erosion

Reihe einzelner kurzer Wellenbrecher



- + natürlich aussehender Strand mit salients
- + geringe lee-erosion
- + gute Wasserqualität
- + wenig Treibgut
- ± moderate Schutzfunktion
- Sichtbehinderung aufs Meer



Rot = ursprüngliche Küstenlinie

Grün = neue Küstenlinie

Abb. 10: Wellenbrecher (verändert nach MANGOR et. al 2017)

Aufspülungen

Alle oben genannten Maßnahmen bringen kein zusätzlich benötigtes Material ins System, sondern verändern nur den Sedimenttransport. Strände die unter Sedimentmangel leiden,

benötigen daher zusätzliches Material. Dieses Material kann an unterschiedlichen Orten eingebracht werden (Abb. 11).

Dünenverstärkung: Hierdurch wird die Widerstandsfähigkeit von Dünen gegen Überspülung und auch Sedimentabtrag gestärkt. Diese Dünenverstärkung sollte mit klassischer einheimischer Vegetation bepflanzt werden.

Aufspülung auf dem trockenen Strand: Diese Aufspülung dient der Erhöhung des Strandniveaus, weist aber einen relativ steilen Hang zum Wasser auf, so dass hier schnell Minikliffs entstehen können.

Strandaufspülung: Dieses ist die klassische Aufspülungsform. Strand und Vorstrand werden aufgefüllt und das Strand- Vorstrandprofil passt sich relativ schnell den ortsspezifischen Bedingungen an. Es wird auch Sediment für die Nachbarbereiche zur Verfügung gestellt.

Riffaufspülung: Diese Vorspülmethode wird vielfach zu Unrecht kritisiert, da das Riff nicht sichtbar ist und somit nicht wahrgenommen wird. Durch eine Riffaufspülung wird nicht nur die Wellenenergie reduziert, sondern auch Material für den Strandaufbau zur Verfügung gestellt, da an sandigen Küsten auch ein küstennormaler Sedimenttransport stattfindet.

Profilaufspülungen: Bei dieser Aufspülmethode werden der Strand und der Vorstrand mit Sediment versorgt. Dies sorgt für ein eher naturnahes Profil ohne zu steile Neigungen.

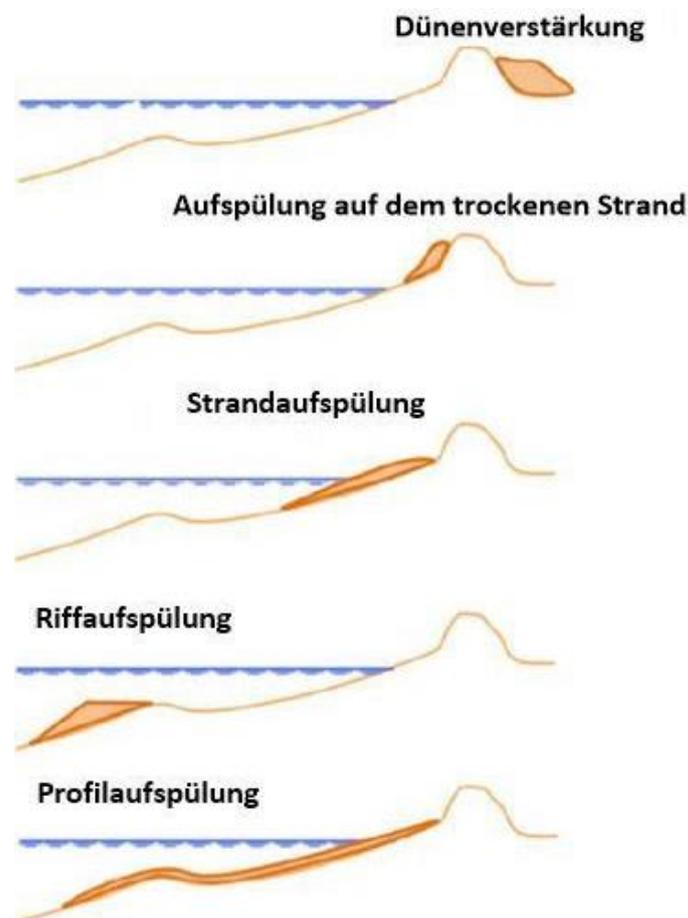


Abb. 11: Aufspülungen (verändert nach MANGOR et. al 2017)

Deiche

Deiche sind Bauwerke die das Hinterland gegen Überflutung schützen sollen. Unterschieden wird zwischen Landesschutzdeichen, wo die Unterhaltungspflicht beim Land liegt und Regionaldeichen, die von den Wasser- und Bodenverbänden unterhalten werden. Deiche, die als Regionaldeiche gewidmet sind, haben nur eine eingeschränkte Schutzwirkung, die Gebiete vor Sturmfluten zu schützen, da diese eine wesentlich geringere Höhe als die Landesschutzdeiche haben.

An der Ostseeküste von Schleswig-Holstein liegen insgesamt 68,6 km Landesschutzdeiche, davon 34,2 km auf Fehmarn vor. Die Deiche weisen eine mittlere Höhe von NHN + 4,0 m bis NHN + 4,6 m (Festland) bzw. NHN + 2,9 m bis + 6,1 m (Fehmarn) auf. An der Ostseeküste sind 52,4 km Regionaldeiche vorhanden.

Kombinierte Maßnahmen

Nahezu alle oben genannten Küstenschutzmaßnahmen lassen sich auch kombinieren, z.B. Bühnen mit Sandaufspülungen, Wellenbrecher, auf- und abgetauchte mit Sandvorspülungen und/oder Deckwerken und Uferschutzmauern, Deiche mit Deckwerken am Fuß und vorgelagerten Bühnen zum Stranderhalt etc.

Alternativer Küstenschutz

Den klassischen Küstenschutzmaßnahmen werden hier die sogenannten „naturbasierten“ Küstenschutzmaßnahmen gegenübergestellt.

Zu (naturbasiertem) alternativem Küstenschutz gehören Maßnahmen wie:

- Treibseldünen;
- Bodenverfestigung durch Bakterien am Strand aber auch im Vorstrandbereich sowie in Regionaldeichen;
- Seegrasmatten;
- Künstliche Riffe;
- Bodenschwellen;
- Palisaden;
- Muschelbänke;
- mobiler Hochwasserschutz in niedrig gelegenen städtischen Arealen;
- Verwendung von Baggergut aus Unterhaltungsmaßnahmen von Hafenzufahrten;
- Rückbauten von Bühnenhälsen;
- Überlaufdeiche;
- eine zugelassene Wiedervernässung von Hinterlandarealen.

Treibseldünen

Eine Treibseldüne ist eine sehr einfache und kostengünstige Küstenschutzmaßnahme. Mit einer Treibseldüne werden zwei Aspekte bedient: einerseits muss das Treibsel nicht teuer entsorgt werden, andererseits bietet eine Treibseldüne einen gewissen Küstenschutz in dem bei Hochwasser die Wellenenergie an einem Bauwerk oder Kliff verringert wird.

Ein Beispiel ist die Treibseldüne in Noer (Abb. 12). Hier wurde ein 50 m langer und 5 m breiter Graben ca. 1 m tief ausgehoben und mit Treibsel befüllt, verdichtet und mit dem sandigen Aushubmaterial bedeckt und anschließend mit natürlicher Küstenvegetation bepflanzt (Strandroggen). Je nach Örtlichkeit können diese Maße variieren. So eine Düne ist stabiler als eine unbewachsene natürliche Düne, bietet aber bei starkem Wellenschlag nur eine bedingte Zeit Widerstand. So eine Düne kann aber relativ schnell wieder aufgebaut werden. Wenn Geschiebemergel im Untergrund oder im Kliff ansteht, sollte dieser nicht angefasst werden.

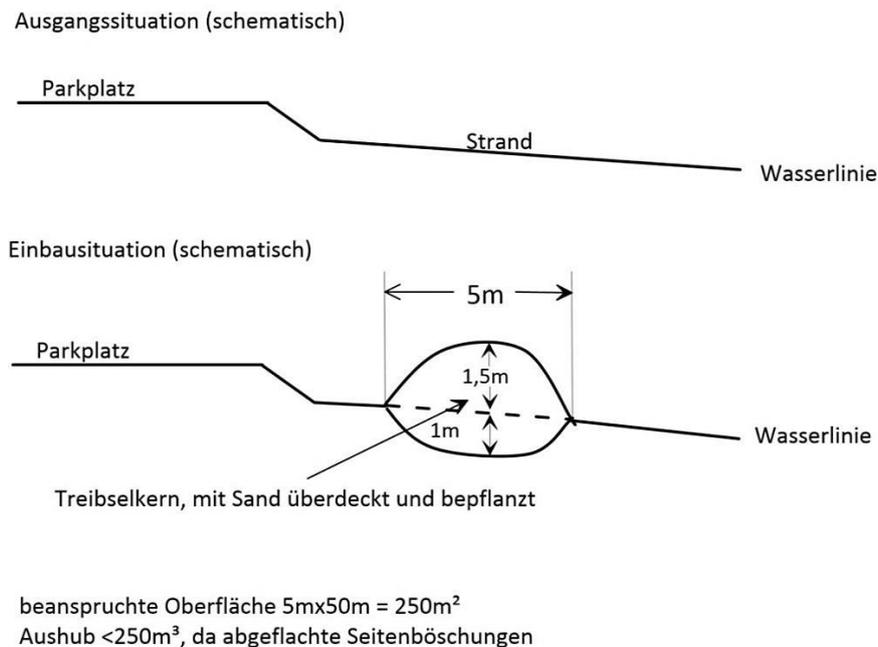


Abb. 12: Aufbau einer Treibseldüne in Noer

Bodenverfestigung durch Bakterien

Was sich auf den ersten Blick unschön anhört es aber nicht ist, ist eine Bodenverfestigung durch Bakterien. Bodenverfestigung ähnelt dem Prinzip der „Beach Rock“ Entstehung in wärmeren Regionen. Dieser natürliche Prozess dauert aber Jahrhunderte oder länger.

Die anthropogen eingesetzten Bakterien sind für die Umwelt unschädlich. Sie erhöhen den PH-Wert im Substrat, so dass Kalk ausfällt und das Substrat verbacken wird. Je nach Dosierung der Bakterien und der Menge der Zugabe einer Nährlösung lässt sich die entstehende Verfestigung des Bodens steuern. Einsetzbar wäre diese Methodik z.B. zur Stabilisierung von Abbruchkanten. Aber auch der Einsatz im Küstenvorfeld zur Riffstabilisierung wäre denkbar. Auch eine Impfung von Regionaldeichen erhöht deren Stabilität.

Seegrasmatten

Seegraswiesen reduzieren die Wellen- und Strömungsenergie und tragen somit zur Reduzierung des Sedimenttransportes während normaler hydrologischer Bedingungen bei. Breitere und höhere Strände können die Folge sein. Während Hochwasserereignissen ist somit mehr Sediment im System vorhanden, welches sich positiv auf die Erosionsraten auswirkt. Seegraswiesen sind z.Z. jedoch im Rückgang. Seegraswiesen sollten daher nicht nur geschützt, sondern auch in ihrer Entwicklung unterstützt werden. Dies kann durch vorgefertigte Seegrasmatten erfolgen. Diese sind ähnlich der an Land z.B. bei der Begrünung von

Autobahnlärmschutzwällen eingesetzten Matten, die mit Grassaat geimpft sind. Im marinen Bereich könnte hier eine Matte aus Naturstoffen (Jute, Hanf etc.), die mit Seegrassamen/Seegrassprossen geimpft ist, eingesetzt werden. Aber auch angeschwemmtes Seegrass selbst könnte zu solchen Matten verarbeitet werden. Verankert werden können die Matten mit sich selbstauflösenden Nägeln, so dass die Matten fixiert sind und keine umweltschädlichen Stoffe freigesetzt werden. Größere Areale derart zu bearbeiten ist eher unrealistisch. Diese Seegrasmatten sollten vielmehr in gewissen Abständen eingesetzt werden (sog. Step Stones), so dass auf natürliche Weise durch Ausbreitung der Pflanzen in die Freiräume ein größerer zusammenhängender Bereich entsteht.

Künstliche Riffe

Riff wird im deutschen Sprachgebrauch meist mit Korallenriff assoziiert. Gemeint sind aber an der Ostseeküste die sich in Küstennähe befindlichen Sandbarren, im englischen Sprachgebrauch „long-shore bars“. Diese befinden sich einige Zehner bis zu einigen hundert Metern vor der Küste und tauchen nur bei extremem Niedrigwasser auf. Hier findet allerdings ein intensiver Sedimenttransport statt, der für die Küstendynamik zwingend notwendig ist. Ebenso wird hier die Wellenenergie gedämpft. Diese Riffe sollten keinesfalls durch starre Baumaßnahmen beeinflusst werden.

Sandaufspülungen auf dem Strand sind sichtbar und damit psychologisch positiv. Aber auch Riffauffüllungen stellen einen wichtigen Beitrag zum Küstenschutz da. Da diese nicht sichtbar sind, werden diese oft unterschätzt oder gar missachtet. Von hier aus wird der Sand küstennormal und küstenparallel transportiert.

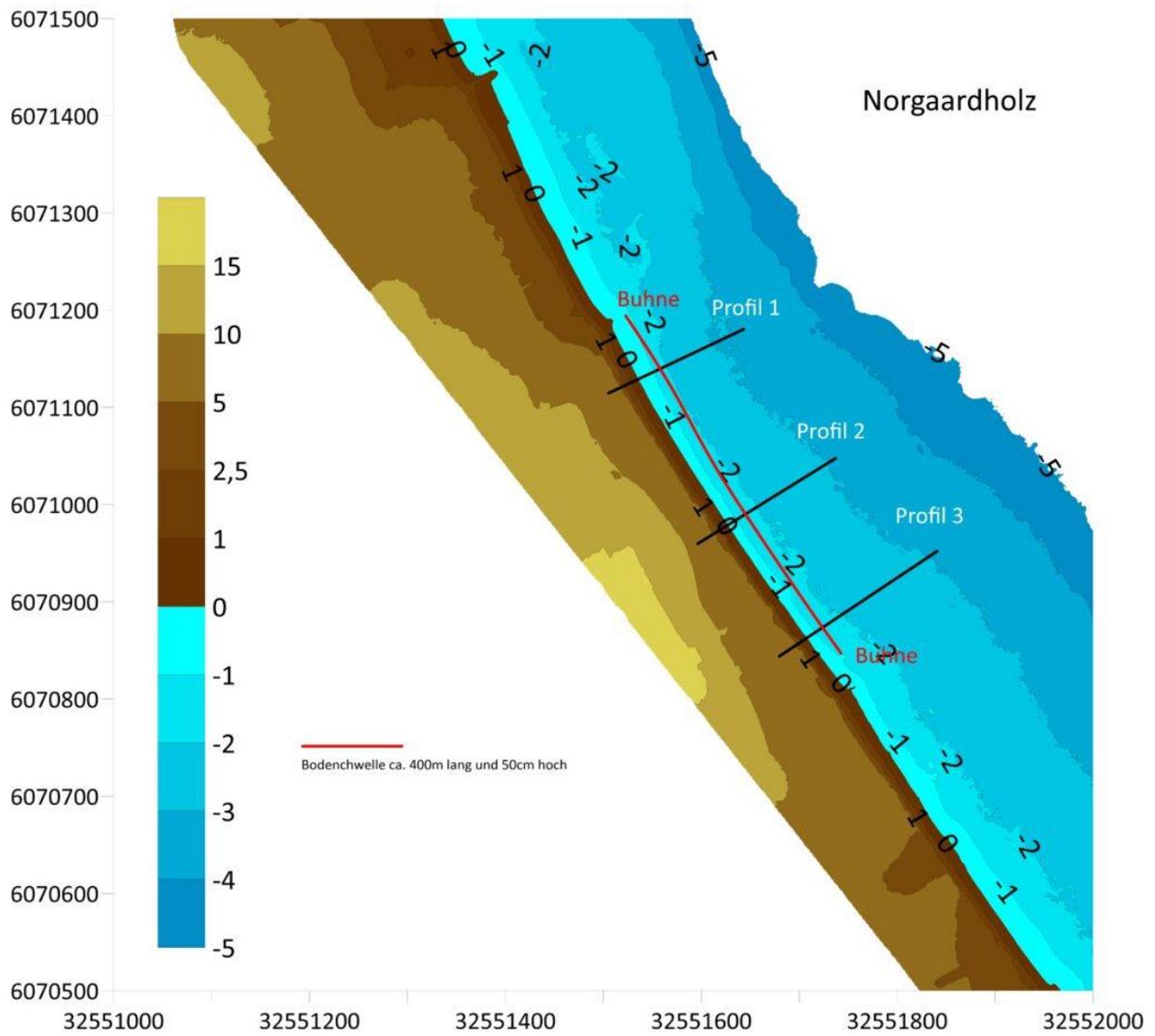
Eine andere Möglichkeit ist die Errichtung von künstlichen Riffen. Hierbei handelt es sich nicht um Sandriffe sondern um Steinschüttungen im Küstenvorfeld. Je nach Design können diese künstlichen Riffe nicht nur die Wellenenergie reduzieren, sondern auch neue Habitate für Flora und Fauna bieten. Durch Hohlraumbildung in den locker geschütteten Steinen entstehen Bruthöhlen und Rückzugsgebiete für Fische und Algen etc. Diese Steine können sehr gut besiedelt werden. Diese Riffe können auch aus „Reefballs“ (Abb. 13) errichtet werden. Reefballs bieten den Vorteil, dass sie ein Habitat für Fische darstellen, da dies Öffnungen haben und im Inneren sich die Fische aufhalten oder laichen können. Durch den Einsatz von diesen Reef Balls ist die Habitatstruktur besser planbar.

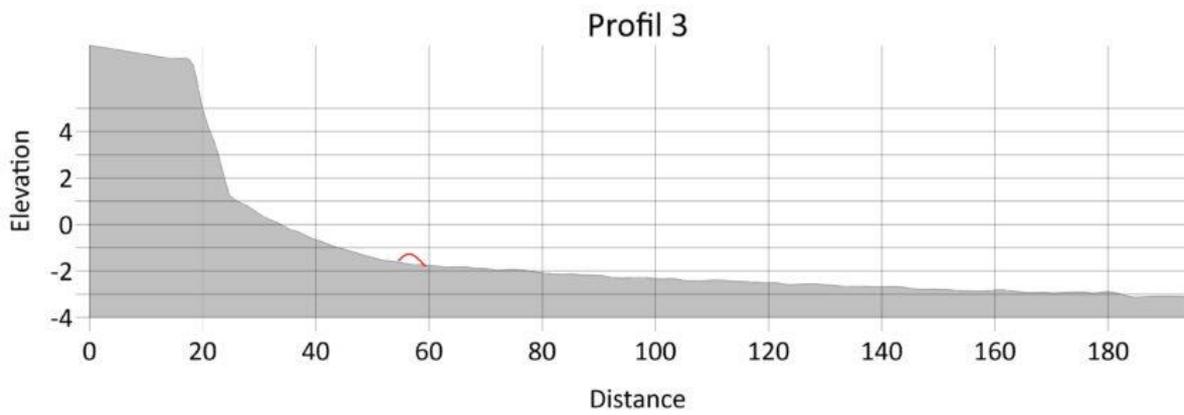
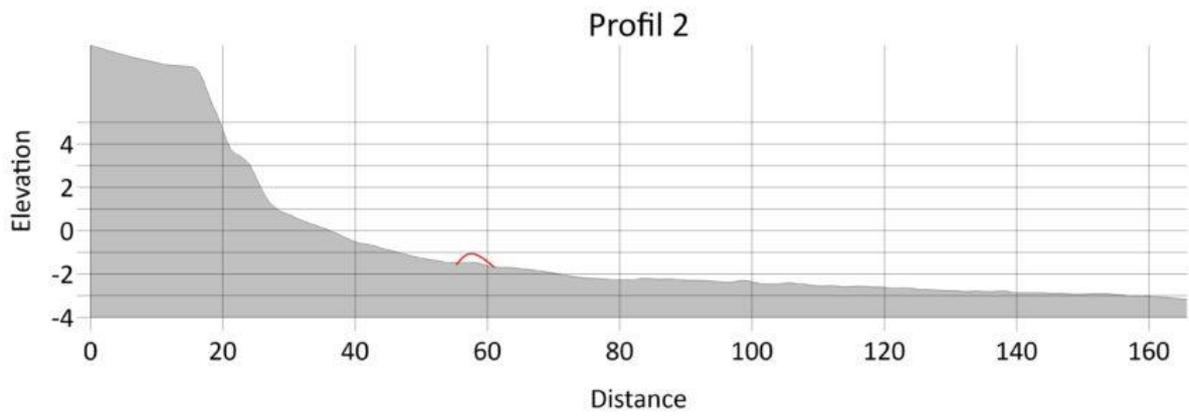
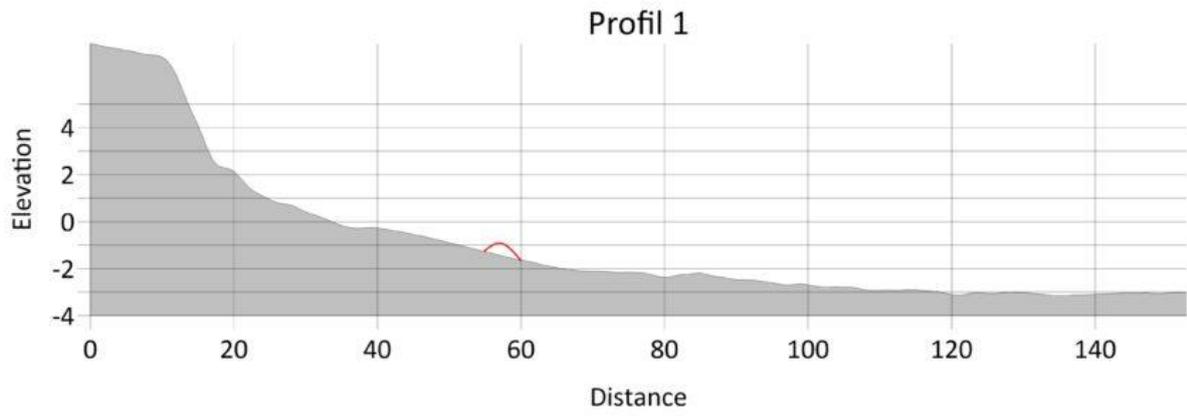


Abb. 13: Beispiel eines Reefballs (Photo T. Meyer, Marilim)

Bodenschwellen

Bodenschwellen im Küstenvorfeld sind künstliche Erhebungen (Abb. 14) auf dem Seegrund die das mit der Rückströmung am Seegrund mitgeführte Sediment auffangen sollen. Diese Bodenschwellen sind eher flach damit von der Seeseite her das durch die Welle mitgeführte Sediment Richtung Strand transportiert werden kann. Materialien könnten Geotextilien sein, aber auch mit Sand gefüllte Naturfasersäcke. Naturfasersäcke zersetzen sich nach gewisser Zeit, können aber leicht nachgelegt werden. Bodenschwellen sind in Bereichen ohne vorgelagertes Riff denkbar.





Bodenschwelle

Abb. 14: Bodenschwellen am Beispiel einer Planung in Norgaardholz

Palisaden

Palisaden sind küstenparallele Holzpflocke auf dem Strand in Reihe angeordnet mit kleinen Abständen. Bei erhöhten Wasserständen fließt das Treibsel und Sand beladene Wasser über die Palisaden und das Wasser kann durch die Lücken zurück in die See fließen. Treibsel und Sand bleiben aber hinter den Palisaden auf dem Strand zurück. So konnte in Kellenhusen in 4 Monaten eine Stranderhöhung von 40 cm erreicht werden.



Abb. 15: Palisaden (Foto: G. Heerten, maritime.geotechnical.consulting) Kellenhusen

Muschelbänke

Miesmuschelbrut ist in der westlichen Ostsee in der Wassersäule zahlreich vorhanden. Was fehlt, ist Substrat, auf welchem die Miesmuscheln siedeln können. Dieses kann künstlich angeboten werden. Hierfür werden Netze aus natürlichem Material (s. Abb. 16) senkrecht in die Wassersäule gehängt und die Muscheln können darauf siedeln. Wenn diese groß genug sind, um sich nicht mehr von dem Material lösen zu können (Abb. 17), werden diese Netze auf dem Meeresboden gelegt und mit Steinen oder sich selbstauflösenden Nägeln am Meeresboden fixiert. So kann sich hier eine neue Muschelbank etablieren, die den Seegrund stabilisiert. Die Muscheln können allerdings auch absterben.

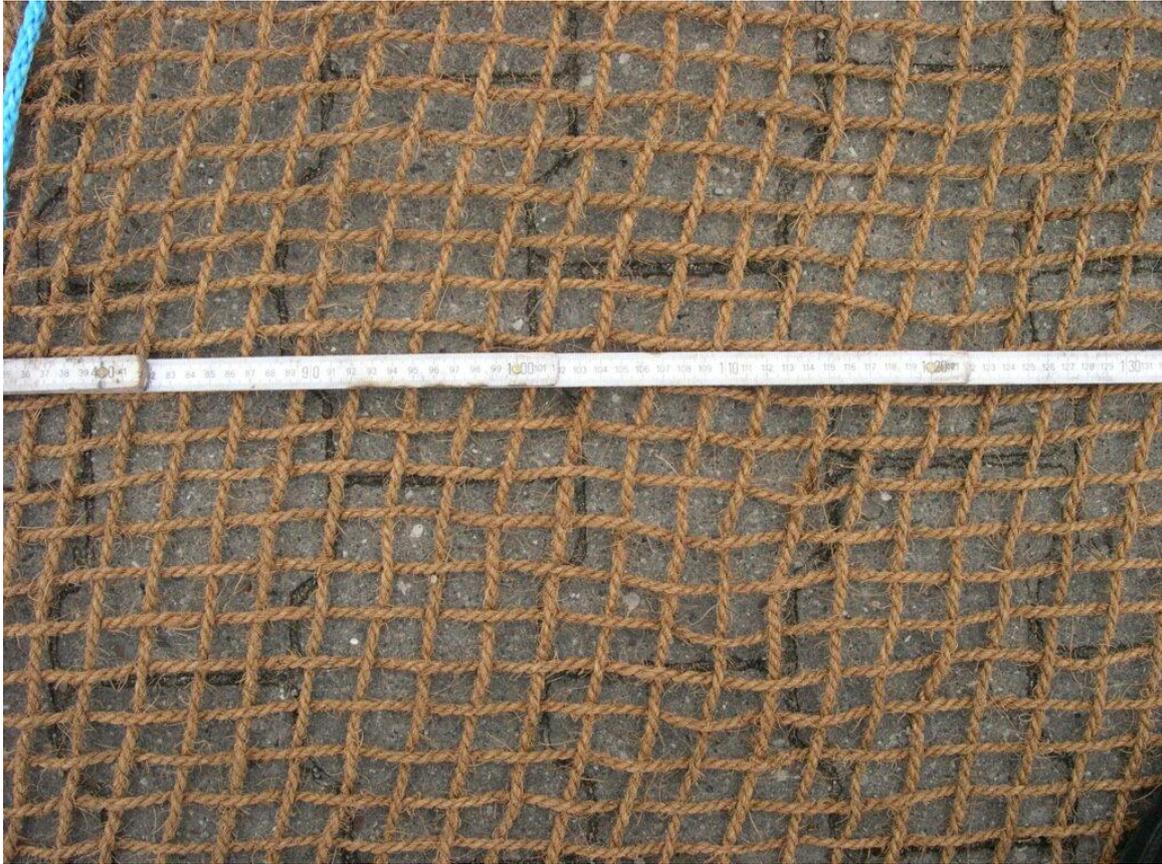


Abb. 16: Netz aus Sisal



Abb. 17: mit Muscheln besetztes Netz

Mobiler Hochwasserschutz

Das Eintreten von Hochwasserständen ist häufig bekannt und es können rechtzeitig Abwehrmaßnahmen getroffen werden. In niedrig gelegenen Gebieten, dies sind vor allem Häfen und Promenaden aber auch Campingplätze, kann das Hochwasser mit mobilen wasser- oder Sand/Kies gefüllten Schläuchen davon abgehalten werden infrastrukturelle Einrichtungen zu überfluten. Hierzu werden Schläuche vor den zu schützenden Bereich ausgelegt und anschließend mit Wasser oder Sediment gefüllt. Diese Schläuche haben eine Höhe von ca. 50 cm bis zu 3 m. Da die Schläuche flexibel sind, können diese auch gekrümmt ausgelegt werden und so in höhere Bereiche einbinden damit das Wasser nicht von hinten den zu schützenden Bereich überflutet. Diese Maßnahme fällt jedoch nicht unter die Rubrik Küstenschutz, sondern ist reiner Hochwasserschutz.

Baggergut/Sandaufspülungen

Hafeneinfahrten unterliegen häufig einer Versandung. Um die schiffbare Tiefe aufrecht zu erhalten, muss Sediment aus der Hafenzufahrt und teilweise auch aus dem Hafen selbst entfernt werden. Hier fallen größere Sedimentmengen an. Dieses Sediment stammt aus dem Küstenlängstransport, vornämlich aus einer Richtung, da die Häfen üblicherweise nicht an geomorphologische Gegebenheiten angepasst sind. Das Material kann einerseits in Sedimenttransportrichtung verbracht werden und sedimentiert dann nicht nochmals in der Hafenzufahrt oder im Hafen selbst. Andererseits kann dieses Material auch entgegengesetzt der Sedimenttransportrichtung zurückgebracht und dort direkt im Küstenschutz eingesetzt werden. Dieses Material würde sich auch für Riffverstärkungen oder Riffauffüllungen eignen. Die Vorgehensweise muss ortsspezifisch festgelegt werden.

Da es in der schleswig-holsteinischen Ostsee keine entnehmbaren sandigen Sedimente gibt, muss für eine Sandaufspülung (Abb. 18) externes Material, z.B. aus Dänemark teuer importiert werden.



Abb. 18: Sandvorspülung

Rückbauten von Bühnenhälsen

Um negative Folgen der Bühnen durch Störung des natürlichen Sedimenttransports zu reduzieren, können aber entsprechende Maßnahmen getroffen werden. In Mecklenburg-Vorpommern hat man schon seit längerer Zeit halbdurchlässige Bühnen gebaut. Halbdurchlässig bedeutet hier, dass ab einer gewissen Entfernung vom Strand Lücken in den Bühnen vorhanden sind, so dass hier ein gewisser Sedimenttransport stattfinden kann. Eine weitere Möglichkeit ist, den Bereich der Bühne der in den Strand einbindet, auf etwas über den mittleren Meeresspiegel abzusenken. Während erhöhter Wasserstände kann dann auf dem Strand Sediment transportiert werden. Hierdurch wird die Leerosion verringert. Ergänzt werden kann solch ein System durch eine Depotvorspülung.

Überlaufdeiche

Hierunter versteht man, das Meerwasser bei einer Sturmflut über einen Deich laufen kann, dieser aber unbeschädigt bleibt. Eine Landnutzung hinter dem Deich muss Meerwasser allerdings vertragen können, wie z.B. Campingplätze im Winter.

Zugelassene Wiedervernässung von Hinterlandarealen

Niedrig gelegene Areale, die nicht intensiv genutzt werden, können unter gewissen Umständen in Naturräume umgewandelt werden. Üblicher Weise sind solche Gebiete durch Regionaldeiche oder zusammengeschoben Strandwälle geschützt. Diese Schutzbauten sind aber unter dem Aspekt des Klimawandels (i.e. Meeresspiegelanstieg) nicht für die Zukunft ausgelegt. Eine Aufgabe wäre daher überlegenswert. Allerdings müssen dann die Küstenschutzmaßnahmen nach hinten, vor allem in höhere Bereiche, verlegt werden. Die dann dem Ostseewasser ausgesetzten Areale können dann naturnah genutzt werden, oder auch als Ausgleichsmaßnahme deklariert und möglicherweise einem „Ökokonto“ zugeschrieben werden.

Kumulative Wirkungen

Jede Maßnahme ist für sich wirksam. Größere Wirksamkeit wird aber durch kumulative Wirkung erreicht (Abb. 19).

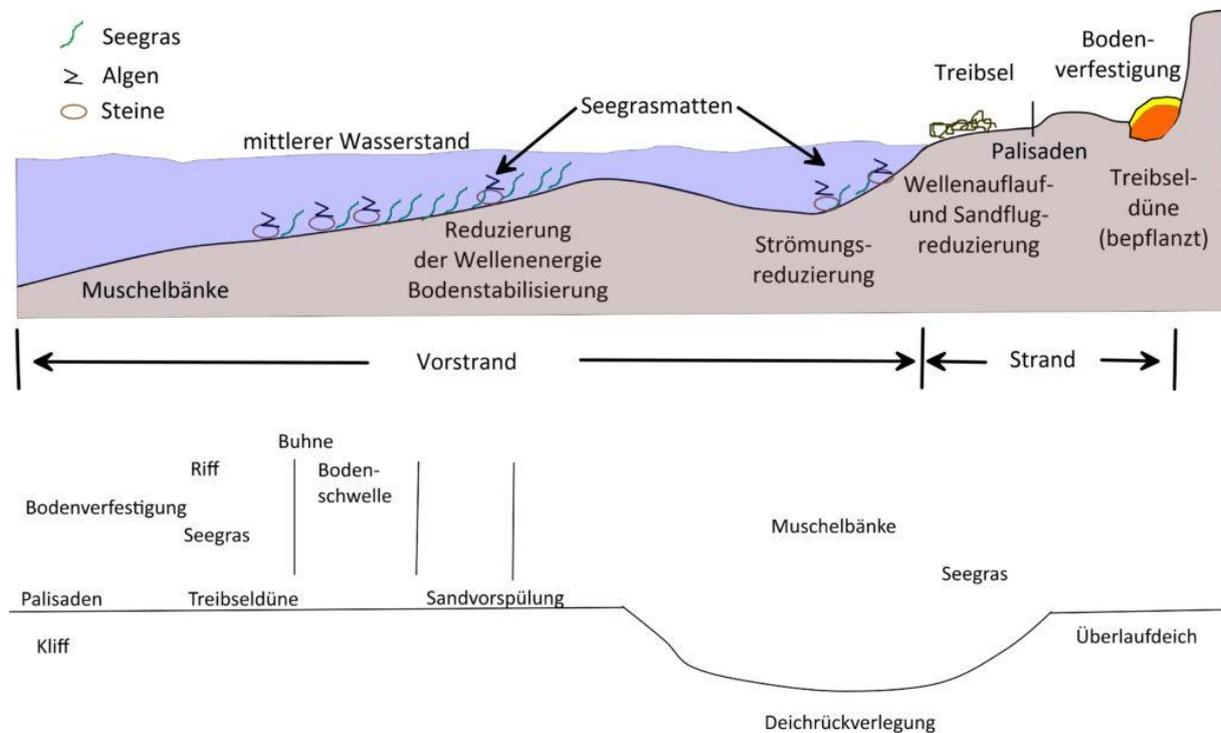


Abb. 19: Querschnitt (oben) und Draufsicht (unten) von alternativen Küstenschutzmaßnahmen

Vor- und Nachteile von alternativen Küstenschutzmaßnahmen

Maßnahme	Wirkungsweise	Vorteile	Nachteile	Bewertung (bis zum Jahre 2100)
Treibseldüne	Stabilisierung des Klifffußes, Verhinderung von Sandflug	Leicht und kostengünstig aufzubauen, ebenfalls auch nach Zerstörung, Treibselverwendung	Kein direkter Erosionsschutz bei Extremhochwasser, Platzbedarf	Eine Treibseldüne kann langfristig den Küstenrückgang nicht verhindern, diesen aber reduzieren. Diese Maßnahme wird insgesamt mit gut bewertet
Palisaden	Hält das Sediment des in Richtung See zurücklaufenden Wassers zurück, Stranderhöhung	Leicht und kostengünstig zu erstellen, auch nach Zerstörung, hält auch Teibsel und Müll zurück	Kein direkter Erosionsschutz bei Extremhochwasser	Palisaden können langfristig den Küstenrückgang nicht verhindern, diesen aber reduzieren. Diese Maßnahme wird insgesamt mit gut bewertet
Bodenschwelle	Hält das Sediment, welches bodennah im Vorstrand durch Wasser, welches Richtung See zurückläuft, strandseitig zurück, Vorstranderhöhung, indirekte Maßnahme	Leicht und kostengünstig zu erstellen, keine negativen Nebenwirkungen, bei steigendem Meeresspiegel kann nachgelegt werden	Evtl. kann Kolkung an den Enden auftreten, wenn nicht in zwei Bahnen eingebunden, sollte ein Doppel-L hergestellt werden, kein direkter Erosionsschutz bei Extremhochwasser	Bodenschwellen können langfristig den Küstenrückgang nicht verhindern, diesen aber reduzieren. Diese Maßnahme wird insgesamt mit gut bis befriedigend bewertet
Bodenverfestigung	Durch Bakterien Erhöhung des PH-Wertes und dadurch Kalkbildung und Bodenverfestigung, Stabilisierung von Strand und Vorstrand	Habitat für Algen, kann im Vorstrand und im Strandbereich eingesetzt werden, kein Einbringen von Fremdmaterial	Bakterien müssen gefüttert werden, kein direkter Erosionsschutz bei Extremhochwasser	Wenn eine Bodenverfestigung am Klifffuß oder Kliff vorgenommen wird, kann diese Maßnahme den Küstenrückgang drastisch reduzieren. Diese Maßnahme wird insgesamt mit sehr gut bis gut bewertet
Seegrasmatten	Erhöhung der Bodenrauigkeit, Strömungsreduzierung, Sedimentstabilisierung, indirekte Maßnahme	Natürlicher Bewuchs, Habitatverbesserung	Aufwendig herzustellen, Anwachs kann nicht garantiert werden, kein direkter Erosionsschutz bei Extremhochwasser, dauert bis zu 5 Jahre	Seegrasmatten können langfristig den Küstenrückgang nicht verhindern. Als Nebenwirkung ist eine Habitatverbesserung sowie eine CO ₂ und eine Nährstoffsinke anzumerken. Insgesamt wird diese Maßnahme mit sehr gut bis gut bewertet
Künstliche Riffe	Reduzierung der einlaufenden Wellenenergie	Habitatverbesserung, können als Brut- und Aufzuchtgebiete für Fische etc. entworfen werden, touristische Aktivitäten wie Tauchen und Schnorcheln möglich	Evtl. Schifffahrtshindernis	Riffe können langfristig den Küstenrückgang nicht verhindern, aber drastisch reduzieren und müssen bei einem Meeresspiegelanstieg erhöht werden. Als Nebenwirkung ist eine Habitatverbesserung anzumerken. Insgesamt wird diese Maßnahme mit gut bewertet

Muschelbänke	Erhöhung der Bodenrauigkeit, indirekte Maßnahme	Natürlicher Bewuchs, Habitatverbesserung	Keine Garantie, dass die anwachsen, kein direkter Erosionsschutz bei Extremhochwasser	Muschelbänke können längerfristig den Küstenrückgang nicht verhindern, aber reduzieren. Als Nebenwirkung ist eine Habitatverbesserung anzumerken. Insgesamt wird diese Maßnahme mit gut bis befriedigend bewertet
Rückbau von Bühnenhälsen	Wiederzulassung von Sedimenttransport auf dem Strand während erhöhter Wasserstände	Keine Leeerosion im Strandbereich, Strandnutzung wird verbessert	keine	Durch den Rückbau von Bühnenhälsen kann langfristig der Küstenrückgang nicht verhindert werden, diesen aber reduzieren. Als positive Nebenwirkung sei eine bessere Strandanutzung erwähnt. Insgesamt wird diese Maßnahme mit sehr gut bewertet
Verwendung von Baggergut/Sandvorspülungen	Ausgleich von Sedimentdefizit	Anpassung an den natürlichen Sedimenthaushalt, Depotvorspülung möglich	Wiederholungsmaßnahme	Sandzugaben auf den Strand und im Vorstrand können den Küstenrückgang drastisch reduzieren und haben keine negativen Nebenwirkungen. Diese Maßnahme wird insgesamt mit sehr gut bewertet
Überlaufdeiche	Wasser kann über den Deich laufen ohne dass dieser zerstört wird	Kostengünstiger als Deicherhöhung	Geht nur dort wo die Landnutzung hinterm Deich zulässt	Überlaufdeiche können langfristig den Küstenrückgang verhindern. Hierfür ist eine angepasste Landnutzung hinterm Deich erforderlich. Insgesamt wird diese Maßnahme mit sehr gut bewertet
Rückverlegung von Küstenlinien	Aufgabe von eingedeichten Flächen	Keine Unterhaltskosten für Küstenschutzmaßnahmen an der direkten Küstenlinie	Landverlust	Diese Maßnahme akzeptiert den Küstenrückgang mit entsprechender naturnaher Landnutzung. Diese Maßnahme wird insgesamt mit sehr gut bewertet

Hydrologie

Die heutige Ostsee hat eine Fläche von 415.266 km² (einschließlich Kattegat), eine mittlere Tiefe von circa 52 m und ein Volumen von circa 22.000 km³. Die Ostsee ist ein Nebenmeer des Atlantischen Ozeans und nur über Belte und Sund mit dem Atlantik verbunden. Im Gegensatz zur Nordsee ist kaum eine Tide vorhanden (<15 cm). Wasserstandsschwankungen werden durch atmosphärische Bedingungen im Bereich Ostsee-Nordatlantik reguliert. Bei starken Westwinden wird das Wasser nach Osten gedrückt und fließt dann als sogenannter Badewanneneffekt nach Westen zurück und es kommt zu erhöhten Wasserständen an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste. Starke Ostwinde erhöhen den Wasserstand an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste. Für den Küstenschutz ist der dann auf die Küste treffende verstärkte Wellenangriff von besonderer Bedeutung. Wenn der Badewanneneffekt und eine gleichzeitige Ostwindlage zusammenfallen, sind die Auswirkungen besonders hoch. Die Hauptwerte für die Dekade 1998 bis 2007 und das höchste jemals aufgezeichnete Hochwasser (HHW) zeigt die Tabelle 1 (LKN-SH 2017). Das Mittelwasser (MW) erreicht entlang der gesamten Küste ähnliche Werte zwischen 1 cm (LT Kiel) und 9 cm (Lübeck-Bauhof) über NHN. Die höchsten Wasserstände (HW) hingegen erreichen je nach Lage Werte zwischen 128 cm (Kappeln) und 187 cm (Marienleuchte) über NHN.

Pegel	HW (cm ü. NHN)	MW (cm ü. NHN)	HHW am 13.11.1872 (cm ü. NHN)
*) keine Angaben vorhanden			
Quelle: Wasser- und Schifffahrtsamt Lübeck			
Flensburg	172	3	308
LT Kalkgrund	165	3	*)
Langballigau	170	6	*)
Schleimünde SP	165	2	321
Eckernförde	167	3	315
LT Kiel	170	1	*)
Kiel-Holtenau	175	3	297
Heiligenhafen	184	3	*)
Marienleuchte	187	2	*)
Neustadt/Holstein	179	6	282
Travemünde	176	6	330
Lübeck-Bauhof	186	9	337
Kappeln	128	3	*)
Schleswig	144	5	325
Timmendorf	178	4	*)

Tab. 1: Wasserstände einzelner Pegel (LKN-SH 2017)

Für den Pegel Travemünde sind die Tagesmittelwasserstände von 1826 bis 2006 in der nachstehenden Graphik aufgetragen (Abb. 20) (LKN-SH 2017). Nach dieser Darstellung lag das Jahresmittelwasser zum Ende des 19. Jahrhunderts ca. 25 cm unter dem heutigen Wert. Ein Anstieg ist erst ab ca. 1900 festzustellen.

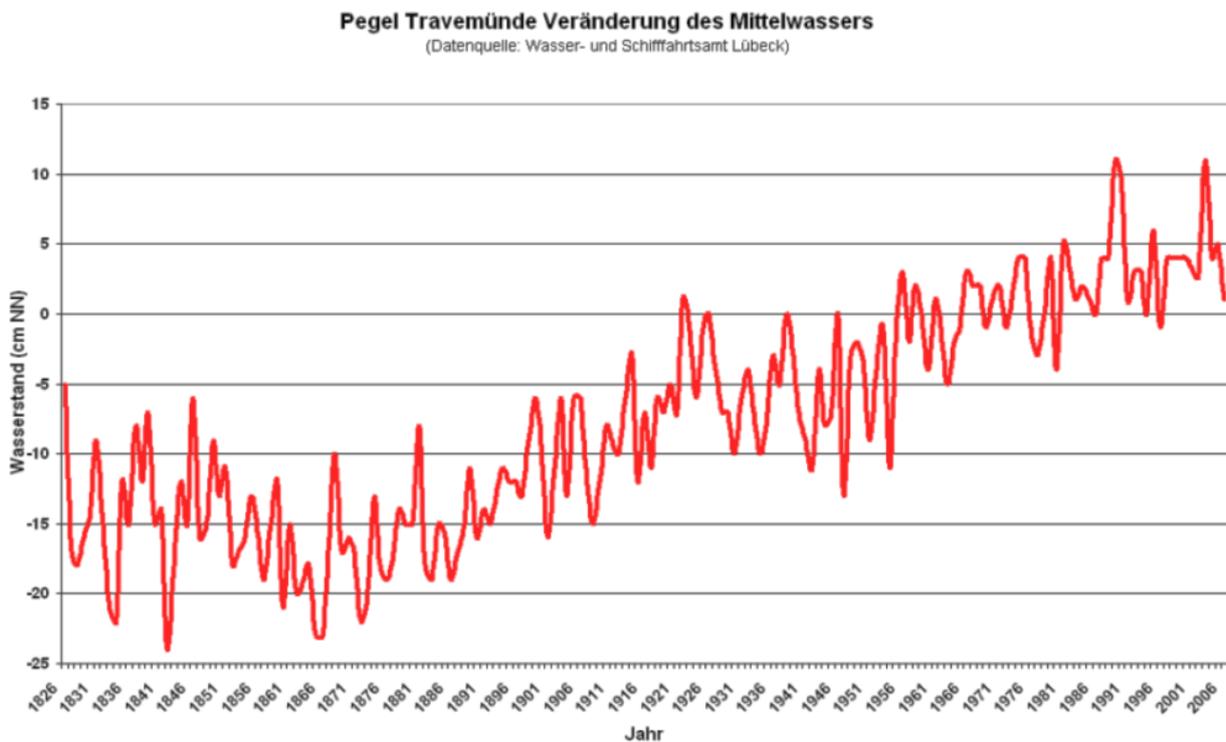


Abb. 20: Veränderung des Mittelwassers Pegel Travemünde (LKN-SH 2017)

In Abstimmung mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Hamburg/Rostock und dem Staatlichen Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg in Rostock wurde für die Deutsche Ostseeküste eine einheitliche Einteilung der Sturmflutwasserstände in Sturmflutklassen vorgenommen. In der Tabelle 2 ist zusätzlich noch das Wiederkehrintervall angegeben.

Wasserstandscheitelwert [cm ü NHN]	Sturmflutklassen	Wiederkehrintervall (ca. Jahre)
100 bis < 125	leicht	1-2
125 bis < 150	mittel	2-5
150 bis < 200	schwer	5-50
≥ 200	sehr schwer	>50

Tab. 2: Sturmflutklassen (LKN-SH 2017)

Nicht nur der absolute Wasserstand ist von Bedeutung, sondern auch die Verweilzeit eines bestimmten Wasserstandes. Verweilzeiten werden durch Wind, Gezeiten und regionalen Einflussfaktoren (Buchteneffekt) wie dem s. g. Badewanneneffekt im Ostseeraum bestimmt. Die Dauer erhöhter Wasserstände an der Ostseeküste ist hauptsächlich von den Parametern

Windgeschwindigkeit und -richtung abhängig. Die Tabelle 3 zeigt die Verweilzeiten der einzelnen Ereignisse und Pegel, sowie Minimum-, Maximum- und Mittelwerte der jeweiligen Sturmflutklasse (LKN-SH 2017).

Sturmfluten nach BSH & LKN	Ereignis	Verweilzeiten der Wasserstände > 50cm NHN [h]											Minimum _{Klasse}	Maximum _{Klasse}	Mittelwert _{Klasse}
		Flensburg	Langballigau	Schleimünde	Eckernförde	Kiel-Holtenau	Heiligenhafen	Marieleuchte	Neustadt	Travemünde	Lübeck-Bauhof				
leicht	23.12.2010	44	44	45	50	55	54	54	55	54	55	18	55	36	
	12.12.2010	18	19	18	19	20	20	20	21	21	25				
mittel	11.02.2011	17	15	15	15	16	16	15	13	15	17	11	62	26	
	02.12.2010	62	59	55	62	59	46	47	51	49	56				
	16.01.1992	11	11	12	12	13	13	13	17	16	17				
	06.12.1989	21	-	-	18	21	21	-	-	-	-				
schwer	09.01.2010	51	53	52	54	55	50	46	63	64	66	22	104	45	
	22.03.2008	28	30	31	32	33	33	33	33	33	36				
	01.11.2006	27	29	28	26	29	31	35	36	31	39				
	21.02.2002	30	33	31	30	30	31	30	32	32	34				
	04.11.1995	36	37	37	44	42	41	42	50	47	54				
	23.02.1993	28	29	30	30	31	31	31	35	38	31				
	28.08.1989	22	-	-	-	34	32	-	-	45	-				
	15.02.1979	104	-	-	-	70	63	-	-	68	-				
	31.12.1978	103	-	-	-	102	101	-	-	102	-				
	04.01.1976	34	-	-	-	38	39	-	-	50	-				
	12.01.1968	26	-	-	-	28	-	-	-	32	-				
14.01.1960	29	-	-	-	29	-	-	-	31	-					
sehr schwer	04.01.1954	-	-	-	-	-	-	-	-	32	-				

Tab. 3: Verweilzeiten der Wasserstände >50 cm NHN (LKN-SH 2017)

Die gemessenen Wasserstandsdaten eines Pegels können mit Hilfe einer Funktion beschrieben werden. Für die Ermittlung von Statistiken extremer Wasserstände, wozu auch die Ermittlung der Referenzwasserstände gehört, werden Zeitreihen verwendet, die den höchsten Wasserstand eines Jahres abbilden. Um die Verteilung dieser extremen Zeitreihen darstellen zu können, werden Wahrscheinlichkeitsfunktionen angewendet, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, da diese für den Laien nicht unbedingt verständlich sind.

Die folgenden Abbildungen 21 zeigt das 200-jährige Hochwasser aus statistischen Verfahren (LKN-SH 2017). In Kiel tritt z.B. auf dem Westufer ein Wasserstand von 2,15 alle 20 Jahre und ein Wasserstand von 2,5 m alle 100 Jahre auf. Zu betonen ist, dass die Wiederkehrintervalle reine statistische Größen sind. So kann ein 50jähriges Ereignis sehr wohl in wenigen Jahren nacheinander auftreten und dann lange Zeit nicht.

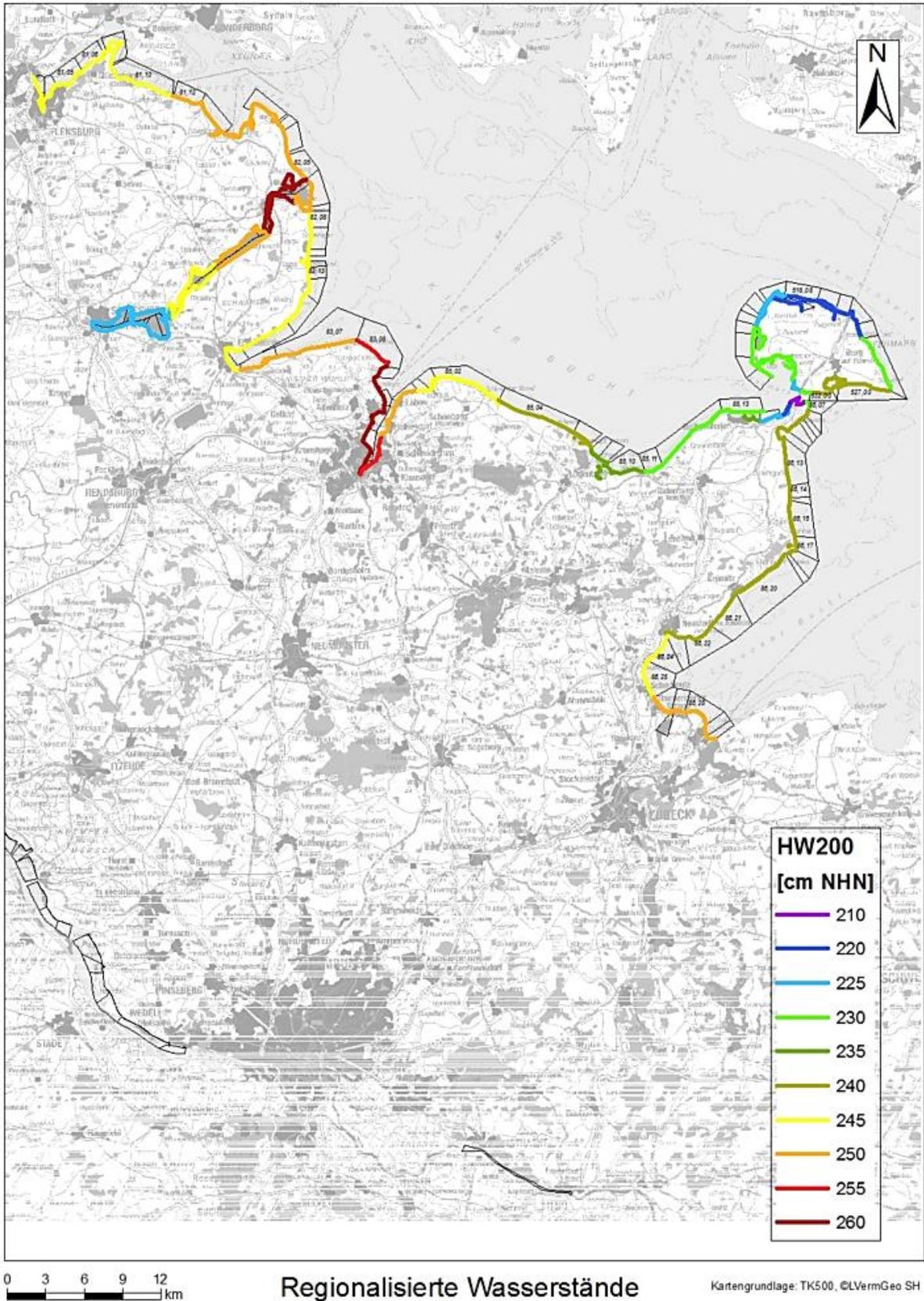


Abb. 21: 200-jähriges Hochwasserereignis (LKN-SH 2017)

Das 200-jährige Hochwasserereignis (also der Wasserstand der rein statistisch alle 200 Jahre auftritt, HW200) wird hier mit 2,5 m NHN angesetzt. Im Folgenden sind die Bereiche rot

markiert, die unterhalb von 2,5 m NHN liegen (Abb. 22). Eine höhere Auflösung findet sich auf der Webseite kommrueber.de

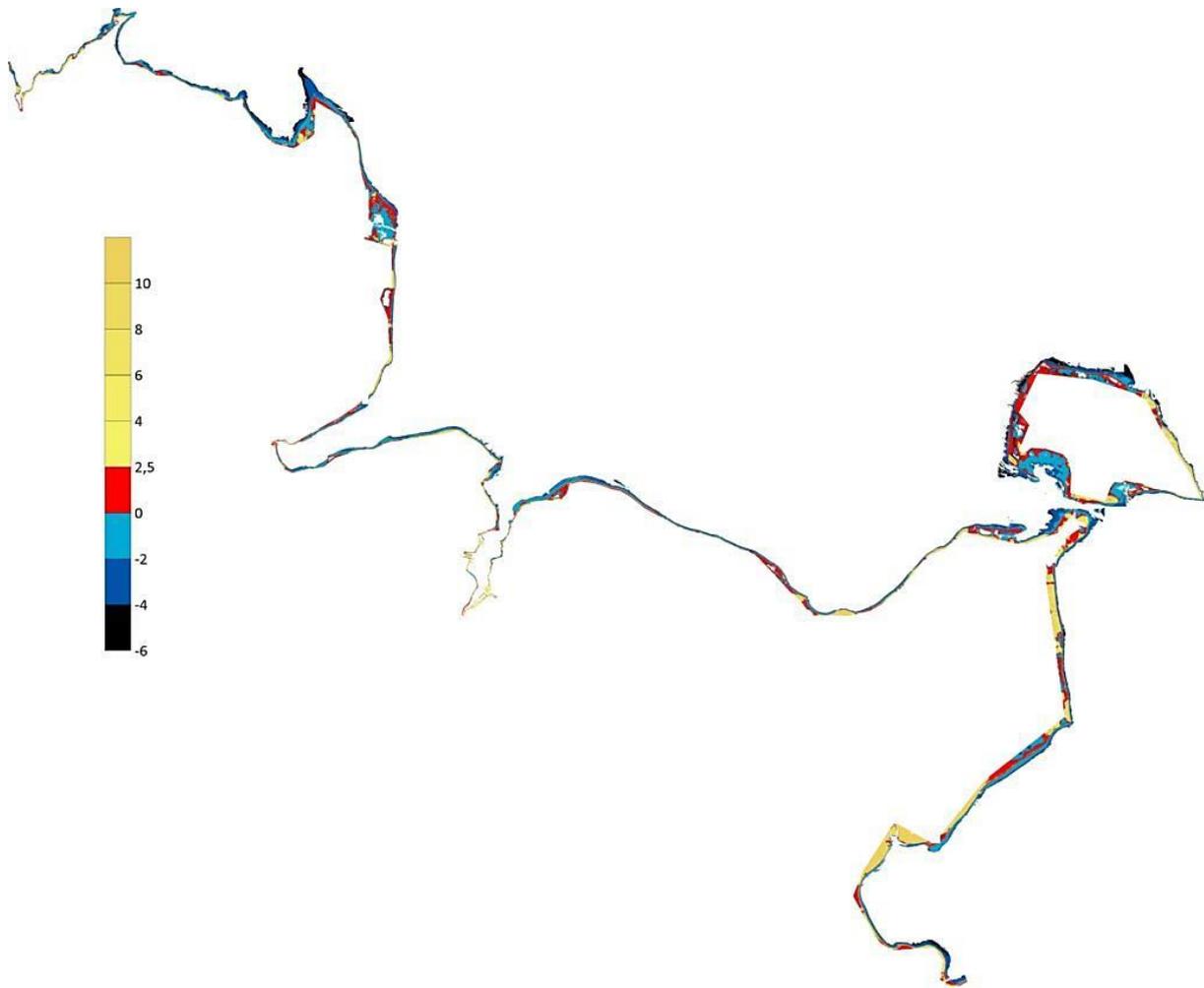


Abb. 22: Überflutungsbereiche des 200-jährigen Hochwassers

Datenbasis aller Karten: Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz des Landes Schleswig-Holstein (LKN-SH)

Literatur

Mangor, K.; Dronen, N.K., Haeregarard, K.H. & S.E. Kristensen (2017) : Shore Management Guidelines, DHI; <https://www.dhigroup.com/marine-water/ebook-shoreline-management-guidelines>

Niedermeyer, R.O.; Lampe, R.; Janke, W.; Schwarzer, K.; Duphorn, K.; Kliewe, H. & F. Werner (2011) : Sammlung Geologischer Führer, 105

Sterr, H. (1991) : Natürliche und anthropogene Prozesse der Küstengestaltung an der Ostseeküste Schleswig-Holsteins. Wasser & Boden, H.1/91

Links

LKN Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (https://www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/LKN/lkn_node.html)

Norddeutsches Küsten- und Klimabüro (<https://www.kuestenschutzbedarf.de/ostsee.html>)

Meeresspiegel-Monitor (<https://www.meeresspiegel-monitor.de/index.php.de>)



KOMMRUEBER
Geographisches Institut der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Prof. Dr. W. Hoppe & Dr. K. Ahrendt
Ludewig-Meyn Straße 8
24118 Kiel
<http://www.kommrueber.de>
email: ahrendt@kommrueber.de