

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschi Betriebsstelle Norden



ProDune B - Teilvorhaben: Analyse und Optimierung von ingenieurbiologischen Sandfangmaßnahmen an Küstenschutzdünen

Fachlicher Schlussbericht

November 2022



Niedersachsen

ProDune B

ProDune - Prozesse des äolischen Sedimenttransports zur Unterstützung eines aktiven Küstenschutzes

Vorhaben: Analyse und Optimierung von ingenieurbiologischen Sandfangmaßnahmen an Küstenschutzdünen

Förderkennzeichen: 03KIS126

Gefördert vom:



Bundesministerium für Bildung und Forschung



| Zuwendungsnehmer: | Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) Direktion Am Sportplatz 23 26506 Norden |
|---------------------|---|
| Ausführende Stelle: | Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) Betriebsstelle Norden Jahnstraße 1 26506 Norden |
| Projektleiter: | Prof. Frank Thorenz |
| Projektbearbeitung: | Wiebke Zander, M.Sc. Dr. Simone Lechthaler DiplIng. Holger Blum DiplIng. Hans-Jörg Lambrecht Simon Hillmann, M.Sc. |
| Projektzeitraum: | 01.11.2018 – 31.10.2021 kostenneutrale Verlängerung bis: 31.05.2022 |

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 03KIS126 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegen bei den jeweiligen Autoren.

ProDune. Prozesse des äolischen Sedimenttransports zur Unterstützung eines aktiven Küstenschutzes. Analyse und Optimierung von ingenieurbiologischen Sandfangmaßnahmen an Küstenschutzdünen

Zusammenfassung

Dünen bilden ein wichtiges naturbasiertes Küstenschutzelement an der deutschen Nordund Ostseeküste. In dem BMBF geförderten KFKI-Forschungsvorhaben ProDune (Prozesse des Äolischen Sedimenttransports zur Unterstützung eines aktiven Küstenschutzes), Teilvorhaben ProDune-B (03KIS126) untersucht der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) die natürliche sowie die mittels Sandfangzäunen aus Busch unterstützte Entwicklung der seeseitigen Dünenflanke auf den ostfriesischen Inseln in Abhängigkeit von den vorherrschenden morphologischen Entwicklungstendenzen der Strände.

Mittels referenzprofilbasierter Datenanalysen wird die Abhängigkeit der Entwicklung des Dünenfußes von der vorhandenen Trockenstrandbreite, der Verlagerungstendenz des mittleren Tidehochwasserniveaus und dem Einfluss von Sandfangzäune untersucht. Es werden Abhängigkeiten zwischen der Trockenstrandbreite und der Entwicklungstendenz des Dünenfußes analysiert. Weiterhin wird der Einfluss von Sandfangmaßnahmen auf die Dünenfußentwicklung in Abhängigkeit von den vorgenannten Größen aufgezeigt.

Mithilfe des numerischen Modells XBeach wird die morphologische Reaktion ausgewählter synthetischer Sandfangkörpergeometrien für verschiedene wasserstands- und seegangsabhängige Belastungssituationen verglichen, um zu präferierende Sandfangkörpergeometrien zu identifizieren.

Auf den ostfriesischen Inseln Langeoog und Norderney konzipierte und errichtete der NLWKN Versuchsfelder für Sandfangzäune, die im Teilvorhaben ProDune-A (03KIS125) durch das Institut für Wasserbau der RWTH Aachen weitergehend wissenschaftlich begleitet wurden. Ein Fokus wird dabei auf die Wirkung verschiedener Porositäten der Sandfangzäune sowie deren Geometrien gelegt.

Aus den gewonnen Erkenntnisse werden Empfehlungen für die Konzeption von Sandfangzäunen in der praktischen Anwendung abgeleitet.

Schlagwörter

Küstendünen; Dünenmorphologie, Strandmorphologie, Sandfangzaun; naturbasierte Lösungen; Küstenschutzmaßnahmen



Summary

Dunes form an important nature-based coastal protection element on the German North Sea and Baltic Sea coasts. In the BMBF-funded KFKI research project ProDune (processes of aeolian sediment transport to support active coastal protection), (sub-project ProDune-B (03KIS126), the Lower Saxony State Agency for Water Management, Coastal Protection and Nature Conservation (NLWKN) is investigating the natural and the sand trap fences-supported development of the sea-side dune flank on the East Frisian Islands depending on the prevailing morphological development tendencies of the beaches. The dependence of the development of the dune foot on the existing dry beach width, the shifting tendency of the mean high tide level and the influence of sand trap fences is examined by means of reference profile-based data analyses. Dependencies between the dry beach width and the development of the dune foot are analysed. Furthermore, the influence of sand trapping measures on the development of the dune foot is shown as a function of the aforementioned parameters. With the help of the numerical model XBeach, the morphological reaction of selected synthetic sand trap geometries for different water level and sea state-dependent load situations is compared in order to identify preferred sand trap geometries. On the East Frisian Islands of Langeoog and Norderney, the NLWKN designed and built test fields for sand trap fences, which were scientifically investigated in the sub-project ProDune-A (03KIS125) by the Institute for Hydraulic Engineering at the RWTH Aachen University. A focus is placed on the effect of different porosities of the sand trap fences and their geometries. Recommendations for the conception of sand trap fences in practical use are derived from the knowledge gained.

Keywords

Coastal dunes; dune morphology, beach morphology, sand trapping fence; nature-based solutions; coastal protection measures

Inhalt

| 1 | | Einlei | tung | 4 |
|---|-----|--|--|------|
| 2 | | Untersuchungsgebiet4 | | |
| 3 | | Analys | se des Zusammenhangs zwischen Strandbreiten- und | |
| | | Düner | nfußentwicklung und des Einflusses von Sandfangzäunen | 5 |
| | 3.1 | Metho | odik | 6 |
| | | 3.1.1 | Profilbasierte Analysen | 6 |
| | | 3.1.2 | Auswahl von morphologisch gleichartigen Analyseabschnitten | 7 |
| | | 3.1.3 | Bestandsaufnahme von Sandfangmaßnahmen am Dünenfuß | . 14 |
| | | 3.1.4 | Analysezeitraum und -abschnitte | . 16 |
| | 3.2 | Abhär | ngigkeit von Trockenstrandbreite und Dünenfußentwicklung | . 17 |
| | 3.3 | Einflu | ss von Sandfangzäunen auf die Entwicklung des Dünenfußes | . 21 |
| | | 3.3.1 | Juist | . 22 |
| | | 3.3.2 | Langeoog | . 26 |
| | 3.4 | Bewer | tung | . 29 |
| 4 | | Nume | rische Untersuchungen zum Einfluss der Geometrie des Sandfang- | |
| | | körper | rs auf die Erosion des Dünenquerschnitts im Sturmflutfall | . 32 |
| | 4.1 | Metho | odik | . 32 |
| | 4.2 | Randb | bedingungen | . 33 |
| | | 4.2.1 | Generalisierte Strand- und Dünenprofile | . 33 |
| | | 4.2.2 | Wasserstand und Seegang | . 37 |
| | | 4.2.3 | Hydrodynamische Belastungsszenarien | . 40 |
| | 4.3 | Ergeb | nisse der numerischen Simulationen | . 41 |
| | | 4.3.1 | Simulationen mit konstanter hydrodynamischer Belastung | . 42 |
| | | 4.3.2 | Belastung durch Seegangsparameter der Sturmtide vom 9.11.2007. | . 62 |
| | | 4.3.3 | Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse | . 67 |
| 5 | | Konze | eption von Versuchsfeldern für Sandfangmaßnahmen und örtliche | |
| | | Beoba | chtungen | . 68 |
| | 5.1 | Konze | eption der Versuchsfelder | . 68 |
| | 5.2 | Beoba | chtungen der Versuchsfelder | . 71 |
| | | 5.2.1 | Auswirkungen verschiedener Bauweisen | . 71 |
| | | 5.2.2 | Zeitlicher Ablauf der Akkumulation und Endzustand der Felder | 73 |
| 6 | | Empfehlungen zum Einsatz von Sandfangmaßnahmen75 | | . 75 |
| 7 | | Danks | agung | . 77 |
| 8 | | Schrif | tenverzeichnis | . 77 |
| | | Verze | ichnisse der Abbildungen und Tabellen | |

1 Einleitung

An der deutschen Nord- und Ostseeküste besitzen Dünenbaumaßnahmen als ingenieurbiologische Maßnahmen eine erhebliche Bedeutung für den Küstenschutz an sandigen Küsten (ALW 1997; Thorenz 2006, 2008; StAUN 2009; NLWKN 2010). Eine traditionelle, aber im Grundsatz noch immer, auch international, angewandte Methode ist der Bau von Sandfangzäunen (Krause 1850; Gerhardt 1900; Eichmanns et al. 2021). Diese werden für verschiedene Zwecke genutzt: Durch das gezielte Initiieren von Sandakkumulation vor dem seewärtigen Dünenhang mithilfe von Sandfangzäunen können dort Sandfangkörper geschaffen werden, um gezielt das Volumen und die Breite von Randdünen zu vergrößern. (Gerhardt 1900; Savage 1962; Adriani und TERWINDT 1974; Mendelssohn et al. 1991; Carter et al. 1992; Nordstrom et al. 2000; Miller et al. 2001; Gómez-Pina et al. 2002; U. S. Army Corps of Engineers 2002; Khalil 2008; Eichmanns et al. 2021). Darüber hinaus werden Sandfangzäune eingesetzt, um Sandflug zu vermindern und so das Versanden infrastruktureller Anlagen zu vermeiden (Fuglsang 1947; Hotta und Harikai 2010; Hanley et al. 2014; Lima et al. 2017). Weiterhin wird durch den Einsatz in vegetationsfreien Randdünen die äolische Erosion des Dünenkörpers verhindert und zudem werden die Zäune zur Lenkung von Besucherströmen genutzt (NLWKN 2010).

Im BMBF-geförderten KFKI-Forschungsvorhaben ProDune, das der NLWKN gemeinsam mit der RWTH Aachen durchgeführt hat, untersuchte der NLWKN im Teilvorhaben ProDune-B (03KIS126) die Potentiale für den gezielten Einsatz von Sandfangzäunen zur Stärkung des Dünenfußes und der seeseitigen Dünenflanke, um die Widerstandsfähigkeit der Düne gegenüber Sturmfluten zu erhöhen. Die Untersuchungen umfassen die Analyse von profilbasierten Vermessungsdaten im Strand- und Dünenbereich im Hinblick auf Interaktionen zwischen Strand- und Dünenentwicklung auf den ostfriesischen Inseln Juist und Langeoog, die numerische Modellierung von Dünenerosion während exemplarischer Sturmflutszenarien für verschiedene generalisierte, durch Sandfangmaßnahmen generierte Dünenquerschnitte sowie Feldversuche mit für das Projekt errichteten Sandfangzäunen unterschiedlicher Geometrien auf den Inseln Langeoog und Norderney.

2 Untersuchungsgebiet

Die ostfriesischen Inseln bilden eine Kette sandiger Barriereinseln im niedersächsischen Wattenmeer (Abbildung 1). Sie sind Teil eines hochdynamischen morphologischen Systems, welches von einem ostwärts gerichteten Sedimenttransport und hochmesotidalen hydrodynamischen Bedingungen bestimmt wird (Hayes 1979; Ehlers 1988; Ladage 2001; Ladage 2002; Thorenz 2006). Zwischen den Inseln erfolgt der Transport über Riffbögen, welche aus einzelnen Platen gebildet werden (Ehlers 1988). Der Ort der Platenanlandung spielt für den Sedimenthaushalt der jeweiligen Insel insbesondere in den westlichen und mittleren Inselbereichen eine wesentliche Rolle (NLWKN 2010).



Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebiets mit den Inseln Juist und Langeoog als Farbschichthöhenmodell (Sievers et al. 2020).

Auf den ostfriesischen Inseln erfolgt seit vielen Jahrzehnten ein bedarfsweiser Einsatz von Sandfangzäunen als ingenieurbiologische Küstenschutzmaßnahme, um die Dünenfüße sowie die seeseitigen Dünenflanken durch gezielte Sandakkumulation zu verstärken. Hierdurch wird die Küstenschutzfunktion der als Schutzdünen gewidmeten Randdünen als natürliches oder naturnahes Sturmflutschutzelement erhöht und der Bestand der Inseln gewährleistet (NDG 2004; NLWKN 2010). Regelmäßig erfolgende Vermessungen der Strand- und Dünentopografie stellen eine wichtige Planungsgrundlage u.a. für diese Inselschutzmaßnahmen dar.

3 Analyse des Zusammenhangs zwischen Strandbreiten- und Dünenfußentwicklung und des Einflusses von Sandfangzäunen

Das Ziel der durchgeführten Untersuchungen besteht darin, den Einfluss von Sandfangmaßnahmen auf die mittelfristige Entwicklung des Dünenfußes in Abhängigkeit von der morphologischen Entwicklung des Strandes zu ermitteln. Die laterale Entwicklung des Dünenfußes dient als Indikator für die seeseitige Entwicklung der Düne und wird direkt durch die im wesentlichen dünenfußparallel errichteten Sandfangmaßnahmen beeinflusst. Die Klärung der Frage, unter welchen morphologischen Randbedingungen durch die Nutzung von Sandfangmaßnahmen eine verbesserte Akkumulation am seeseitigen Dünenhang im Vergleich zur natürlichen Entwicklung erzielt werden kann, ist aus Sicht des praktischen Dünenbaus von hoher Bedeutung, um effektive und nachhaltige Maßnahmen umzusetzen.

Für die Analyse stehen folgende Datengrundlagen zur Verfügung: Terrestrische Profilvermessungen und Fernerkundungen, wie Airborne Laser Scanning (ALS), Luftbildbefliegungen sowie fotogrammetrische Erfassungen der Strände und Randdünen.

Die Auswahl von geeigneten Inseln für diese Analyse erfolgt anhand von drei Kriterien, die erfüllt sein müssen: a) weitgehend natürliche, d.h. nicht durch Bauwerke beeinflusste Strandentwicklung, zeit- und abschnittsweise erfolgte Sandfangmaßnahmen am Dünenfuß;



b) zeitlich konsistente Datenreihen der Strand- und Dünentopografie; c) Informationen zu Sandfangmaßnahmen am Dünenfuß.

Für die weiteren Untersuchungen zur Bestandsaufnahme der Dünenbaumaßnahmen sowie die Analyse der Dünenfußentwicklung wurden die Inseln Juist und Langeoog ausgewählt. Bei diesen ist die natürliche Strandentwicklung an deren Nord- und Westseite unbeeinflusst von Buhnen oder Deckwerken. Die durchgehende Datenverfügbarkeit zur Strand- und Dünentopografie ist seit Beginn der 1980er Jahren durch mindestens jährliche Erfassungen von definierten Strandprofilen gegeben. Zudem liegen Fernerkundungsdaten mit Informationen zum Einsatz von Sandfangzäunen ab etwa Ende der 1980er Jahren in ausreichender Anzahl und Güte vor.

3.1 Methodik

3.1.1 Profilbasierte Analysen

Als Grundlage für ein längerfristiges Monitoring sowie für die kurzfristige Einschätzung von Gefährdungslagen werden auf den ostfriesischen Inseln die Strände und Dünen seit mehreren Jahrzehnten regelmäßig in definierten Referenzprofilen vermessen. Der Abstand der Profile zueinander und die Häufigkeit der Vermessungen sind dabei in der Vergangenheit situationsabhängig festgelegt worden. In der Regel erfolgten in der jüngeren Vergangenheit Vermessungen der Profile mindestens einmal pro Jahr und in erosionsgeprägten Strandabschnitten häufig zweimal oder bedarfsweise auch mehrmals pro Jahr.

Die für die Vermessung eingesetzten Vermessungsverfahren entsprechen jeweils dem zum Zeitpunkt der Erfassung geltenden Stand der Technik. So wurden von Beginn bis in die Mitte des letzten Jahrhunderts Nivellements durchgeführt, die später durch tachymetrische Vermessungen abgelöst wurden, bevor in den 1990er Jahren satellitengestützte terrestrische Verfahren zum Einsatz kamen. Seit dem Jahr 1999 erfolgen regelmäßig flächige Erfassungen der Strände und Dünen mittels Airborne-Laserscan (ALS), die erforderlichenfalls durch terrestrische Vermessungen oder weitere Fernerkundungsverfahren ergänzt werden. Für beide Inseln liegen durchgehende Datensätze für Referenzprofile im wesentlichen aus dem Zeitraum von 1981 bis 2021 vor.

Aus den mit Fernerkundungsverfahren gewonnenen flächigen Erfassungen werden digitale Geländemodelle erstellt, aus denen definierte Profile abgeleitet werden, so dass die profilgestützten Datenreihen fortgeführt und analysiert werden können.

Die Analyse der lateralen Dünenfußentwicklung erfolgt auf Basis der Strand- und Dünenprofile, indem die horizontale Verschiebung definierter Höhenniveaus, bezogen auf einen festen Nullpunkt abgeleitet und über Zeit-Weg-Datendiagramme dargestellt werden. Die Steigung einer in einem Zeit-Weg-Diagramm dargestellten Zeitreihe entspricht der horizontalen Entwicklung einer Höhenlinie in Metern pro Jahr. Als exemplarisch für die Dünenentwicklung wird die NHN + 3 m-Höhenlinien betrachtet, welche den Dünenfuß markiert (Ladage 2002). Ein weiteres charakteristisches Höheniveau bildet das mittlere Tidehochwassers (MThw). Die horizontale Distanz dieser zwei Höhenlinien ist als Trockenstrandbreite definiert (DIN 1994). Die Höhenniveaus für das MThw bzw. das MTnw wurden für Juist konstant mit NHN + 1,20 m bzw. NHN - 1,30 m und für Langeoog mit NHN + 1,34 m bzw. NHN - 1,3 m angesetzt. Hierbei wurde ein Mittelwert für den gesamten Untersuchungszeitraum zugrunde gelegt, der die jährlichen Schwankungen sowie die in der Tendenz ansteigende MThw-Entwicklung ausgleicht.

Bei der Ermittlung der Position des MThw- bzw. NHN + 3 m-Höhenniveaus in einem Profil zeigen sich häufig Mehrfachschnittpunkten des MThw-Niveaus mit dem gemessenen Profil, da dieses in der Höhe z. B. durch Vorkommen von Strandriffen oder Primärdünen variiert. Daher wurde zur Ermittlung der Lage des Dünenfußes und des MThw-Höhenniveaus jeweils die MKL-Methode (Vermaas et al. 2021) angewendet.

3.1.2 Auswahl von morphologisch gleichartigen Analyseabschnitten

Die morphologischen Prozesse an den West- und Nordseiten der Inseln Juist und Langeoog unterscheiden sich im Hinblick auf die großräumigen und kleinräumigen morphologischen Prozesse, deren zeitliche Variabilität und den prägenden morphologischen Strukturen.

Der Transportpfad, über den das Sediment von Borkum durch die Osterems und ihre Nebenrinnen über die Brauerplaten und das Juister Riff nach Juist gelangt, beschreibt aufgrund der komplexen Situation im Bereich Borkum-Memmert-Juist keinen kompakten Riffbogen (Abbildung 2). Es finden deshalb vor den Randdünen auf Juist, anders als auf Langeoog, keine periodischen Platenanlandungen statt. Das Sediment erreicht die Insel Juist im Westen am Billriff und wird entlang des Nordstrandes über hochdynamische Riff-Rinne-Systeme in Richtung Osten transportiert (Ladage 2001).

Die Unterschiede in der morphologischen Entwicklung des westlichen und östlichen Inselteils von Juist werden durch den Vergleich der aus den Referenzprofilen abgeleiteten Zeit-Weg-Diagramme deutlich. Die Lage der Profile sowie die Einteilung der Abschnitte auf Juist zeigt Abbildung 3. Der westliche als Abschnitt A gekennzeichnete Bereich der Insel bis ca. Profil 37 weist eine negative bis ausgeglichene Sedimentbilanz auf und ist von Dünenerosionen geprägt. Exemplarisch für diesen Abschnitt ist das im westliche Drittel des Abschnittes liegende Referenzprofil 19 (Abbildung 4). Hingegen liegt im als Abschnitt B gekennzeichneten östlichen Teil Juists eine ausgeglichene bis positive Sedimentbilanz vor, die in Fall von großen Trockenstrandbreiten ein laterales seewärtiges Wachstum der Dünen ermöglicht. Diese Entwicklung ist exemplarisch für das in der Mitte des Abschnittes liegende Profil 53 in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 2: Übersicht Borkum und Juist (Karte: Conscience Sentinel 2 2018).



Abbildung 3: Lage der Abschnitte und darin enthaltene Profile, Juist.

8

NLWKN



Abbildung 4: Zeit-Weg-Diagramm von Profil 19, Juist.



Abbildung 5: Zeit-Weg-Diagramm von Profil 53, Juist.

Die Entwicklung der Insel Langeoog wird durch Platenanlandungen im Nordwesten aus dem Riffbogen (Abbildung 6) des zwischen Baltrum und Langeoog gelegenen Seegats Accumer Ee geprägt (Ehlers 1988, Ladage 2002). Die Platenanlandung ist durch Zeiträume von mehreren Dekaden geprägt. Der Sedimenttransport erfolgt sowohl entlang des Weststrandes in südliche Richtung bzw. entlang des Nordstrands in östliche Richtung. Die Unterschiede in der morphologischen Entwicklung der Strandbereiche werden durch den Vergleich der aus den Referenzprofilen abgeleiteten Zeit-Weg-Diagramme deutlich. Die Lage der Profile ist in Abbildung 7 dargestellt.



Abbildung 6: Übersicht Baltrum und Westteil von Langeoog mit Lage des Seegats der Accumer Ee (Luftbild NLWKN).

Der Strandbereich des Weststrandes von Profil 8 bis etwa Profil 30 (Abschnitt A in Abbildung 7) ist durch diskontinuierliche Platenanlandungsprozesse mit großen Sedimentvolumen geprägt. Das in Abbildung 8 exemplarisch für diesen Abschnitt dargestellte Zeit-Weg-Diagramm für das Profil 13 zeigt die Anlandung dreier Platenkomplexe, aus denen für die Jahre 1986 und 2022 maximale Trockenstrandbreiten von über 200 m resultieren, während die dritte Platenanlandung im Jahr 2021 noch nicht abgeschlossen ist.



Abbildung 7: Lage der Abschnitte und darin enthaltene Profile, Langeoog.

Der Bereich des Nordstrandes östlich von Profil 30 unterliegt bis etwa Profil 50 (Abschnitt B, Abbildung 7) deutlichen kurzzeitigeren zeitlichen Änderungen, die durch längerfristige Entwicklungen überlagert sind. Exemplarisch werden diese Prozesse im Zeit-Weg-Diagramm für Profil 37, welches im westlichen Teil des Abschnittes B liegt, deutlich (Abbildung 9). Es treten kleinräumige Platenanlandungen und die Ausbildung von hochdynamischen Riff-Rinne-Systemen auf, über die Sedimente in Richtung Osten transportiert wird. Diese Prozesse werden insbesondere durch die ausgeprägten zeitlichen Variationen der Höhenniveaus NHN - 1,3 m und NHN 0 m deutlich. Dieser Abschnitt weist zudem eine überwiegend negative Sedimentbilanz auf, die bedarfsweise durch Strandaufspülungen ausgeglichen wird, welche sich durch eine seewärtige Verlagerung insbesondere der Höhenniveaus NHN + 1,34 m und NHN + 3 m deutlich werden.

Östlich von Profil 50 bis Profil 80 befindet sich der Strandabschnitt C, in dem hochdynamische Riff-Rinne-Systeme prägend sind, welche exemplarisch durch die ausgeprägten Variationen der Höhenniveaus NHN - 1,3 m und NHN + 0 m im Profil 55 (Abbildung 10) sichtbar werden. Zudem herrscht hier eine positive Sedimentbilanz vor, die insbesondere durch die seewärtige Verlagerung des Dünenfußes auf dem Höhenniveau von NHN + 3 m und des seeseitigen Dünenhanges auf dem Höhenniveau von NHN + 5 m deutlich wird.



Abbildung 8: Zeit-Weg-Diagramm von Profil 13, Langeoog.



Abbildung 9: Zeit-Weg-Diagramm von Profil 37, Langeoog.



Abbildung 10: Zeit-Weg-Diagramm von Profil 55, Langeoog.

3.1.3 Bestandsaufnahme von Sandfangmaßnahmen am Dünenfuß

Eine durchgehende, für weitere Auswertungen verwendbare Dokumentation der Erstellung von Sandfangmaßnahmen auf den Inseln Juist Langeoog liegt nicht vor. Um eine rückblickende Übersicht der Existenz von Sandfangzäunen zu erhalten, wurden Orthofotos, Infrarot- bzw. Color-Infrarot-Luftbildaufnahmen und Laserscandaten aus dem Zeitraum 1966 - 2019 ausgewertet.

Bereits auf Schwarzweiß-Aufnahmen der 1960er-Jahre sind dünenparallele Sandfangzäune erkennbar (Abbildung 11). Die Qualität insbesondere der älteren Aufnahmen variiert jedoch zwischen den Jahren, so dass eine eindeutige Detektion von erfolgten Sandfangmaßnahmen im Bereich des Dünenfußes nicht in allen Fällen möglich ist.

Ergänzend wurden Daten aus Airborne Laser Scanning (ALS) verwendet. Für die Erstellung digitaler Geländemodelle aus ALS werden im Aufbereitungsprozess die sogenannten Nicht-Boden-Punkte über Filtertechniken selektiert und separat gespeichert. Die Nicht-Boden-Punkte beinhalten zu großen Anteilen Höhenpunkte des Vegetations- oder Gebäudebestands. Durch ALS erfasste Sandfangzäune werden bei diesen Filterungen ebenfalls als Nicht-Boden-Punkt klassifiziert. Die linienhafte Struktur von Sandfangzäunen kann bei der Visualisierung der Datenpunkte anhand ihrer charakteristischen Form detektiert und erfasst werden (Abbildung 12).



Abbildung 11: Orthofoto Langeoog 1966, 1998, 2018.



Abbildung 12: Beispiel von detektierten Nicht-Bodenpunkten auf Juist aus Filterung der ALS 2013.

Im einem erstellten Kataster sind für alle Strandprofile der Inseln Juist und Langeoog jahresweise die Information über einen erkannten Sandfangzaun abgelegt. Die küstenparallele räumliche Ausdehnung der entlang des Dünenfußes detektierten Zäune ist für die jeweiligen Jahren in Abbildung 13 und Abbildung 14 für Juist bzw. Langeoog dargestellt.

NLWKN



Abbildung 13: Räumliche und zeitliche Verteilung von Sandfangzäunen am Dünenfuß auf der Insel Juist.



Abbildung 14: Räumliche und zeitliche Verteilung von Sandfangzäunen am Dünenfuß auf der Insel Langeoog.

Im Fall von Juist liegen ab 1986 für die meisten Jahre verwertbare Daten vor, für Langeoog ab 1989.

Es ist in Abbildung 13 deutlich zu erkennen, dass die Sandfangmaßnahmen auf Juist im Wesentlichen im westlichen Inselbereich d.h. im Untersuchungsabschnitt A (Abbildung 3) erfolgte. Auf Langeoog können für den Nordwesten der Insel seit dem Jahr 1990 wiederholte Errichtungen von Sandfangzäunen in den Abschnitten A und B Abbildung 7) mit sehr ähnlich räumlichen Grenzen dokumentiert werden (Abbildung 14).

3.1.4 Analysezeitraum und -abschnitte

Auf Basis der für die Referenzprofile verfügbaren Messdaten sowie des erstellten Katasters für die Sandfangmaßnahmen kann der Zeitraum, im dem für alle Inselabschnitte auf den beiden Inseln Juist und Langeoog eine lückenlose Zeitreihe der Strandtopographie mit mindestens einer Messung pro Jahr sowie eine ausreichend detaillierte Information zum Bestand von Sandfangzäunen am Dünenfuß vorliegt, ermittelt werden. Im Zeitraum von 01.01.1990 bis 01.01.2017 können 23 Referenzprofile auf Juist sowie 34 Referenzprofile auf Langeoog in die Analyse einbezogen werden. Die folgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verwendeten Profile sowie ihre Zuordnung zu den Inselabschnitten. Die Lage der in die Analyse einbezogenen Profile ist in Abbildung 3 und Abbildung 7 darstellt.

| | | Abschnitt A | Abschnitt B | Abschnitt C |
|----------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | 13, 15, 17, 19, 21, | 43, 49, 50, 51, 52, | |
| Inist | Reterenzprofile [-] | 23, 25, 27, 29, 31, | 53, 54, 56, 58, 64, | |
| Juise | | 33, 35, 37 | 70 | |
| | Abschnittslänge [km] | 6,0 | 6,0 | |
| | | 8, 9, 10, 11, 13, | | |
| Langeoog | Referenzprofile [-] | 14, 15, 16, 17, 18, | 32, 35, 37, 39, 41, | 55, 60, 65, 70, 75, |
| | | 19, 20, 22, 23, 24, | 43, 45, 50 | 80 |
| | | 25, 26, 27, 28, 30 | | |
| | Abschnittslänge [km] | 3,5 | 3,1 | 5,4 |

Tabelle 1 In der Analyse verwendete Referenzprofile auf den Inseln Juist und Langeoog sowie deren Zuordnung zu den betrachteten Strandabschnitten.

3.2 Abhängigkeit von Trockenstrandbreite und Dünenfußentwicklung

Im Zuge der weiteren Auswertung werden für die Trockenstrandbreite sowie für die Verlagerungsgeschwindigkeit des Dünenfußes gleitende Mittelwerte über 5 Jahre gebildet. Diese werden in Dünenfußentwicklungsdiagrammen in Bezug zueinander gesetzt, indem die Dünenfußentwicklung in Abhängigkeit von der trockenen Strandbreite dargestellt wird. Für die Bestimmung der Korrelationsfunktion werden die in Tabelle 2 genannten Parameter durch den Ansatz der Kleinste-Quadrate-Schätzung ermittelt. Die linearen Korrelationsfunktionen der logarithmierten Strandbreiten erzielen für die vorliegenden Daten bessere Korrelationskoeffizienten als eine rein lineare Korrelationsfunktion.

$$y = a \cdot \ln(x) + c \tag{1}$$

Tabelle 2 Variablennamen der logarithmischen Regressionsfunktion im Allgemeinen (mittlere Spalte) und in dieser Anwendung (rechte Spalte).

| у | Betrachtete Bestandsgröße | Laterale Dünenfußentwicklung (= Verlagerung der Po- sition des NHN + 3 m Höhenniveaus) [m/Jahr] |
|---|---------------------------|--|
| а | Faktor | |
| х | Variable | Trockene Strandbreite [m] |
| с | Konstante | |

Die Güte der Korrelationsfunktion wird mithilfe des Korrelationskoeffizienten r^2 (Gl. 2) ermittelt. Dieser entspricht dem Verhältnis der erklärten Varianz (Gl. 3) zu der Gesamtvarianz (Gl. 5), er nimmt Werte zwischen 0 und 1 ein (Schönwiese 2006). Geringe Werte für den Korrelationskoeffizienten gehen mit einem hohen Anteil der unerklärten Varianz (Gl. 4) und somit einer schwachen Korrelation einher. Gemäß Schönwiese (2006) ist diese Methode auch im Fall von nichtlinearen, monotonen Funktionen anwendbar.

$$r^{2} = \frac{\Sigma(\hat{B} - \bar{B})^{2}}{\Sigma B_{i}^{\prime 2}} = 1 - \frac{\Sigma(B_{i} - \hat{B}_{i})^{2}}{\Sigma B_{i}^{\prime 2}}$$
(2)

$$\frac{\Sigma(\hat{B}-\bar{B})^2}{n-1} \tag{3}$$

$$\frac{\sum (B_i - \hat{B}_i)^2}{n-1} \tag{4}$$

$$\frac{\sum B_i^{\prime 2}}{n-1} \tag{5}$$

 B_i : Erfasste Daten

 \overline{B} : arithmetisches Mittel

 B'_i : Differenz zwischen B_i und \overline{B}

\hat{B}_i : mittels Regressionsfunktion bestimmte Werte

n: Anzahl der erfassten Daten

Die Auswertungen erfolgen je Insel abschnittsweise für die zuvor definierten Strandabschnitte (vgl. Abschnitt 3.1.2). Zudem erfolgt in einem Folgeschritt eine Differenzierung der in den Abschnitten erkannten Abhängigkeiten durch Einbeziehen der jeweils bestehenden Richtung der MThw-Höhenniveauverlagerung. Auch hierbei wird, wie bei der Verlagerung des Dünenfußes, eine seeseitige Verlagerung als positiv definiert.

Um die Wirkung der Sandfangzäune analysieren zu können, werden die Daten in die Kategorien "mit Sandfangzaun (mSF)" und "ohne Sandfangzaun (oSF)" aufgeteilt. Dabei fällt ein Wert in die Kategorie "mit Sandfangzaun", wenn mindestens über die Hälfte des Zeitraumes, für den Informationen vorliegen, Sandfangzäune vorhanden waren.



Abbildung 15: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenniveaus auf Juist für den Zeitraum 1990-2017 für alle Daten sowie differenziert nach Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus (positiv = blau; negativ = rot).

ProDune-B FKZ: 03KIS126



Abbildung 16: Verlagerungstrend des NHN + 3 m Höhenniveaus auf Langeoog für den Zeitraum 1990-2017 für alle Daten sowie differenziert nach Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus (positiv = blau; negativ = rot).

Die vorstehenden Abbildungen zeigen die Dünenfußentwicklungsdiagramme für die Inseln Juist und Langeoog (Abbildung 15 und Abbildung 16). Die Farben der einzelnen Datenpunkte markieren die Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus zu Beginn der dem Mittelwert zugrundeliegenden 5-Jahresperiode, die Form der Datenpunkte weist auf den jeweiligen Strandabschnitt (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 7) und die Füllung der Datenpunkte auf die Existenz von Sandfangmaßnahmen am Dünenfuß hin.

Sowohl für die Teildatensätze als auch für den Gesamtdatensatz der einzelnen Inseln wurden Korrelationsfunktionen gemäß der eingangs des Kapitels beschriebenen Methodik bestimmt, die Kennwerte dieser Funktionen sind in den Abbildungen sowie in Tabelle 3 aufgeführt.

Die geringste auftretende trockene Strandbreite aller Messungen beträgt 30 m. Es liegt eine deutliche Abhängigkeit zwischen der trockenen Strandbreite und der lateralen Entwicklung des Dünenfußes vor: Schmale Strände mit Breiten kleiner als 50 m sind von einem negativen Verlagerungstrend der NHN +3 m Linie d.h. Erosion geprägt (Abbildung 15, Abbildung 16). Mit größer werdender Strandbreite nimmt der Anteil der positiven Dünenfußentwicklung zu, d.h. das NHN + 3 m-Niveau weist eine größere seewärtige Verlagerungsgeschwindigkeit auf. Dieser lateralen Entwicklung folgt zeitversetzt auch die vertikale Entwicklung des seewärtigen Dünenhangs, wie den Zeit-Weg-Diagrammen für die beispielhaft dargestellte Höhenstufe NHN + 5 m zu entnahmen ist (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 8). Ab einer trockenen Strandbreite von 90 m ist die Dünenfußentwicklung überwiegend positiv (Abbildung 15). Ab einer Strandbreite von ca. 100 m ist zunächst keine signifikante weitere Zunahme der Verlagerungsgeschwindigkeit des Dünenfußes erkennbar. Weiterhin ist die Streuung der Datenpunkte ab dieser Strandbreite deutlich geringer als bei schmalen Stränden. Erst ab einer trockenen Strandbreite von 250 m markieren einige

stark streuende Datenpunkte die Bildung sowie das Abflachen von Vordünen (Abbildung 17), welche zu plötzlichen Sprüngen des Zeit-Weg-Diagrammes führen.



Abbildung 17: Verlagerungstrend des NHN + 3 m Höhenniveaus auf Langeoog für den Zeitraum 1990-2017 für alle Datenpunkten der Abschnitte A, B und C.

Da die Vordünenentwicklung nicht im Fokus dieser Untersuchungen steht, werden im Folgenden Strände mit trockenen Strandbreiten kleiner als 250 m betrachtet.

Tabelle 3 Werte der Korrelationsfunktion gemäß Gl. 1 und Tabelle 2 als Näherung für die mittlere Dünenfußentwicklung in Abhängigkeit der Strandbreite sowie die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten gemäß Gl. 2 für unterschiedliche Verlagerungsrichtungen des MThw-Höhenniveaus (positiv = seewärts; negativ = inselwärts).

| | Laterale Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus | а | С | r ² |
|----------|--|--------|----------|----------------|
| | Alle Datenpunkte – keine Differenzierung | 2,9959 | - 13,742 | 0,4676 |
| Juist | Positive Verlagerungsrichtung | 1,5299 | - 6,4745 | 0,2542 |
| | Negative Verlagerungsrichtung | 4,6163 | 4,6163 | 0,6161 |
| | Alle Datenpunkte – keine Differenzierung | 3,3996 | - 14,686 | 0,2651 |
| Langeoog | Positive Verlagerungsrichtung | 0,1213 | 0,8338 | 0,0006 |
| | Negative Verlagerungsrichtung | 5,626 | - 25,054 | 0,5849 |

Es ist in den Abbildungen und an den Korrelationskoeffizienten zu erkennen, dass neben der Breite des trockenen Strands auch die Richtung der MThw-Höhenniveau-Entwicklung einen großen Einfluss auf die Entwicklung des Dünenfußes hat. Bei einer Differenzierung über die Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus ist für die Fälle einer negativen Richtung eine höhere Korrelation zu erzielen als dies bei der gemeinsamen Analyse aller Datenpunkte der Fall ist. Für die Fälle einer positiven Verlagerungsrichtung des

MThw-Höhenniveaus ergeben sich bedingt durch die größeren Streuungen, insbesondere im Fall von Langeoog, niedrige Korrelationskoeffizienten. Da diese Streuung der Daten zu einem Teil auf die deutlich unterschiedlichen morphologischen Situationen der Strandabschnitte zurückgeführt werden kann, erfolgt im folgenden Abschnitt eine weitere Differenzierung der Daten entsprechend der Lokation des Profils.

3.3 Einfluss von Sandfangzäunen auf die Entwicklung des Dünenfußes

In diesem Abschnitt wird eine weitere Differenzierung der Dünenfußentwicklungsdiagramme für die Inseln Juist und Langeoog nach Inselabschnitten sowie gleichzeitig in Bezug auf den Einsatz von Sandfangmaßnahmen dargestellt. Ziel ist es, die Beziehung zwischen Trockenstrandbreite und Dünenfußentwicklung in Abhängigkeit von der strandmorphologischen Situation sowie der Wirkung der Sandfangmaßnahmen zu untersuchen.

Die Dünenfußentwicklungsdiagramme werden inselweise jeweils für die Fälle mit positiver und mit negativer Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus erstellt, dabei wird bei der Ermittlung der Korrelationsfunktion zudem unterschieden, ob eine Sandfangmaßnahme in der Nähe des Dünenfußes vorhanden war.

3.3.1 Juist

Die Gesamtdarstellung der Abschnitte A und B ist in den beiden folgenden Abbildungen dargestellt. Die getrennte Darstellung der Einzelabschnitte findet sich in den Abbildung 20 und Abbildung 21.



Abbildung 18: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei positiver Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus ermittelt über alle Inselschnitte in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Juist für den Zeitraum 1990-2017.



Abbildung 19: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei negativer Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus ermittelt über alle Inselschnitte in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Juist für den Zeitraum 1990-2017.



Abbildung 20: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei positiver Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus für die Abschnitte A (oben) und B (unten) in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Juist für den Zeitraum 1990-2017.



Abbildung 21: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei negativer Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus für die Abschnitte A (oben) und B (unten) in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Juist für den Zeitraum 1990-2017.

Tabelle 4 Werte der Korrelationsfunktion gemäß Gl. 1 als Näherung für die mittlere Dünenfußentwicklung in Abhängigkeit der Strandbreite sowie die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten gemäß Gl. 2 für Strände unterschiedlicher Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus (positiv = seewärts; negativ = inselwärts) sowie Fallunterscheidung zum Einsatz von Sandfangzäunen auf Juist.

| Abschnitt | Laterale Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus | Sandfangzaun | а | С | r² |
|-------------------------|--|--------------|---------|----------|--------|
| т • , | Positiv | Mit | 1,5299 | - 6,4745 | 0,2542 |
| Juist – | | Ohne | 1,6624 | - 7,2678 | 0,3123 |
| (A B) | Negativ | Mit | 4,5705 | - 20,879 | 0,5389 |
| (Λ, \mathbf{D}) | | Ohne | 4,8389 | - 22,409 | 0,6848 |
| Juist (A) | Positiv | Mit | 5,1149 | - 21,700 | 0,3063 |
| | | Ohne | 4,5979 | - 19,782 | 0,7400 |
| | Negativ | Mit | 7,1978 | - 31,682 | 0,6001 |
| | | Ohne | 7,7107 | - 34,104 | 0,8129 |
| Juist (B) | Positiv | Mit | 3,2990 | - 14,948 | 0,1476 |
| | | Ohne | 1,3255 | - 5,6141 | 0,0614 |
| | Negativ | Mit | 1,5807 | - 6,7246 | 0,3088 |
| | | Ohne | -1,1630 | 8,1782 | 0,0378 |

3.3.2 Langeoog

Die Gesamtdarstellung für die drei Abschnitte A, B und C ist in den beiden folgenden Abbildungen dargestellt. Die getrennte Darstellung der Einzelabschnitte findet sich in den Abbildung 24 und Abbildung 25.



Abbildung 22: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei positiver Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus ermittelt über alle Inselschnitte in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Langeoog für den Zeitraum 1990-2017.



Abbildung 23: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei negativer Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus ermittelt über alle Inselschnitte in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Langeoog für den Zeitraum 1990-2017.



Abbildung 24: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei positiver Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus für die Abschnitte A (oben), B (Mitte) und C (unten) in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Langeoog für den Zeitraum 1990-2017.



Abbildung 25: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei negativer Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus für die Abschnitte A (oben), B (Mitte) und C (unten) in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Langeoog für den Zeitraum 1990-2017.

Tabelle 5 Werte der Korrelationsfunktion gemäß Gl. 1 als Näherung für die mittlere Dünenfußentwicklung in Abhängigkeit der Strandbreite sowie die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten gemäß Gl. 2 für Strände unterschiedlicher Verlagerungsrichtungen des MThw-Höhenniveaus sowie Fallunterscheidung zum Einsatz von Sandfangzäunen auf Langeoog.

| Abschnitt | Laterale Verlagerungsrichtung | Sandfangzaun | а | С | r ² |
|-------------------------------------|-------------------------------|--------------|--------|---------|----------------|
| | des MThw-Höhenniveaus | | | | |
| T | Positiv | Mit | 0,1389 | 1,1506 | 0,0004 |
| Langeoog | | Ohne | 1,7228 | -7,4275 | 0,1519 |
| -gesam | Nagativ | Mit | 6,2253 | -27,382 | 0,4729 |
| $(\Lambda, \mathbf{D}, \mathbf{C})$ | Inegativ | Ohne | 5,5491 | -24,957 | 0,6347 |
| | Donitin | Mit | 0,5243 | -0,7932 | 0,0053 |
| Langeoog | POSITIV | Ohne | 2,1957 | -10,606 | 0,3798 |
| (A) | Negativ | Mit | 4,9684 | -21,783 | 0,3853 |
| | | Ohne | 5,8574 | -26,439 | 0,6603 |
| Langeoog (B) | Positiv | Mit | 4,0322 | -13,77 | 0,1311 |
| | | Ohne | 4,0492 | -16,454 | 0,3276 |
| | Negativ | Mit | 9,8446 | -41,501 | 0,3338 |
| | | Ohne | 8,6814 | -37,572 | 0,7729 |
| Langeoog (C) | Positiv | Mit | n.v. | n.v. | n.v. |
| | | Ohne | 1,2374 | -4,5309 | 0,0556 |
| | | Mit | n.v. | n.v. | n.v. |
| | Inegativ | Ohne | 2,3124 | -9,0775 | 0,136 |

n.v. = nicht vorhanden

3.4 Bewertung

Durch die weitere Differenzierung im Hinblick auf die Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus und die Sandfangmaßnahmen (Abbildung 18, Abbildung 19 bzw. Abbildung 22, Abbildung 23) sowie morphologisch gleichartiger Analyseabschnitte (vgl. Abschnitt 3.1.2) ergeben sich teilweise deutlich verbesserte Korrelationskoeffizienten im Vergleich zu den in Abschnitt 3.2 erzielten Werten (vgl. Tabelle 3).Dieses gilt insbesondere für die Fälle einer positiven Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus in den Analyseabschnitten Juist A (Abbildung 20; oben) und Langeoog A sowie B (Abbildung 24; oben und Mitte).

Über den Abstand der schwarz gekennzeichneten Trendlinien in durchgezogener und gestrichelter Form wird die Wirkung der Sandfangmaßnahmen bei abschnittsweiser Darstellung deutlich (Abbildung 20, Abbildung 21 sowie Abbildung 24, Abbildung 25).

Mit Ausnahme des Abschnitts B auf Juist bei negativer Verlagerungsrichtung des MThw-Niveaus (Abbildung 20, unten), liegen bei beiden Inseln die Regressionsfunktion für den Fall "mit Sandfangmaßnahme" oberhalb der Regressionsfunktion für den Fall "ohne Sandfangmaßnahme". Es besteht in diesen Fällen eine Erhöhung der seewärtigen lateralen Entwicklungstendenz des Dünenfußes durch die Sandfangmaßnahmen. Diese Abstände unterscheiden sich deutlich von den sich bei inselweiser Betrachtung ergebenden Regressionsfunktionen (Abbildung 18, Abbildung 19 sowie Abbildung 22, Abbildung 23), diese sind daher zum Vergleich in den abschnittsweise darstellten Abbildungen jeweils als blaue bzw. rote Trendlinien dargestellt.

Weiterhin bestehen Unterschiede in der Wirkung von Sandfangmaßnahmen in Abhängigkeit von der Entwicklungstendenz des MThw-Niveaus. Bei positiver Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus in den Abschnitten auf Langeoog ist in diesen Fällen der Abstand der Linien größer (Abbildung 24) als in den Fällen mit entgegengesetzter Verlagerungsrichtung (Abbildung 25). In diesen Fällen ist die Wirkung der Sandfangmaßnahme größer, als dies bei negativer Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus der Fall ist. Für Juist ist dieser Zusammenhang nicht festzustellen (Abbildung 20, Abbildung 21).

Bei negativer Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus verlaufen für kleinere Strandbreiten die Trendlinien nahezu deckungsgleich (Abbildung 21, Abbildung 25). In diesen Fällen ist somit keine Wirkung der Sandfangzäune im Vergleich zur Situation ohne Sandfang festzustellen. Eine Ausnahme stellt der Abschnitte A der Insel Langeoog dar, für den auch bei schmalem Trockenstrand eine deutlich erkennbare Wirkung des Sandfangs zu erkennen ist (Abbildung 25, oben).

Bei positiver Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus liegen für Langeoog in Abschnitt A und B für die Fälle mit Sandfangmaßnahmen die Korrelationsfunktionen durchgehend im positiven Bereich (Abbildung 24, oben und Mitte). D.h. auch für vergleichsweise schmale trockene Strandbreiten von weniger als 60 m ergibt sich eine positive Entwicklung des Dünenfußes. In Abschnitt C der Insel Langeoog sind keine Profile mit Sandfangmaßnahmen im Analysezeitraum vorhanden.



Abbildung 26: Erodierende Dünen am schmalen Strand im Westen von Juist.



Abbildung 27: Anwachsende Dünen am breiten Strand auf Langeoog (Profil 50) mit einsedimentierten Sandfangzäunen.

Bei trockenen Strandbreiten von weniger als 80 m und einer negativen Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus zeigen sich für beide Inseln überwiegend Erosionstrends des Dünenfußes (Abbildung 21, oben; Abbildung 25, oben und Mitte). Die einzelnen Datenpunkte, die trotz geringer Strandbreiten von weniger als 50 m eine Sedimentablagerung am Dünenfuß aufzeigen, korrelieren ausschließlich mit einer positiven Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus (Abbildung 20, oben; Abbildung 24, oben und Mitte).

Im Fall von breiteren Stränden korreliert für die Strände auf Langeoog eine negative Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus mit einer stärkeren Sedimentablagerung am Dünenfuß (Abbildung 25). Dieser Zusammenhang ist in den Daten von Juist weniger eindeutig (Abbildung 21).

Da eine negative Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus den Trockenstrand schmaler werden lässt, wird deren negativer Einfluss auf die Dünenentwicklung deutlich. Verschiebt sich das MThw-Höhenniveau landwärts, bewirkt diese Entwicklung insbesondere an sehr schmalen Stränden eine Erosion der Düne und des Strandes bis sich in etwa eine Trockenstrandbreite von ca. 30 m einstellt. Der dabei auftretenden Neigungswinkel entspricht in etwa dem Neigungswinkel von Aufspülmaterial unter Seegangseinfluss (an't Hoff & van der Kolff 2012).

An vergleichsweise breiten Stränden hat eine Änderung der Trockenstrandbreite geringere Auswirkung auf die Dünenfußentwicklung. Da die Strand- und Dünenentwicklung auf Langeoog stark von Platenanlandungen geprägt ist, alternieren hier, insbesondere im Abschnitt A der Insel, Phasen positiver Sedimentbilanz mit Phasen negativer Sedimentbilanz. Das Zeit-Weg-Diagramm in Abbildung 8 zeigt diesen Vorgang am Beispiel von Profil 13. Anhand des Zeit-Weg-Diagrammes wird ein zeitlicher Versatz in der Entwicklung der verschiedenen Höhenlinien sichtbar: Je höher das betrachtete Niveau liegt, desto später reagiert es auf eine Trendwende. Dementsprechend ist am Dünenfuß z. B. im Zeitraum 2006 - 2010 noch eine positive Entwicklung sichtbar, während sich das MThw-Höhenniveau bereits landwärts verschiebt. Dieser zeitliche Versatz kann erklären, weshalb in den Daten von Langeoog an breiten Stränden eine positive Dünenfußentwicklung während einer negativen Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus auftritt.

Eine Platenanlandung, aus der wie auf Langeoog ein periodischer Wechsel von Phasen positiver mit Phasen negativer Sedimentbilanz resultiert, findet im betrachteten Strandbereich von Juist nicht statt. Hier wird das Sediment von der Billplate über die Prozesse des litoralen Sedimenttransportes zur Verfügung gestellt. Hier hat die Richtung der Verlagerung des MThw-Höhenniveaus an breiten Stränden keinen eindeutigen Einfluss auf die Akkumulation am Dünenfuß.

Der Vergleich der inselweise ermittelten Korrelationskoeffizienten (Tabelle 4, Tabelle 5) zeigt, dass die Streuung der Langeooger Daten in jeder Konstellation größer ist als die der Daten von Juist. Weiterhin sind auf beiden Inseln während einer positiven Verlagerung des MThw-Höhenniveaus (Abbildung 20, Abbildung 24) die Daten deutlich weiter gestreut als während einer negativen Verlagerung des MThw-Höhenniveaus (Abbildung 21, Abbildung 25). Die stärkere Streuung auf Langeoog im Vergleich zu Juist lässt sich ebenfalls darauf zurückführen, dass Langeoog stark von einer langandauernden Platenanlandung geprägt ist, bei der sich Phasen positiver Sedimentbilanz und Phasen negativer Sedimentbilanz abwechseln. Zudem haben im betrachteten Zeitraum mehrere Aufspülungen auf Langeoog stattgefunden. Die gleichförmigeren Sedimentumlagerungsprozesse auf Juist führen

zu einer gleichmäßigeren Dünenfußentwicklung, welche zu einer geringeren Streuung führt. Der höhere Korrelationskoeffizient während einer negativen Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus zeigt (Tabelle 4), dass die Dünenentwicklung während Phasen mit geringem Sedimentdargebot vorhersehbarer verläuft als in Phasen mit großem Sedimentdargebot. Eine Ausnahme stellen die Korrelationskoeffizienten des Abschnitts B für die Fälle ohne Sandfang dar, die jedoch beide sehr niedrig sind.

Insbesondere an schmalen Trockenstränden führt die inselwärtige Verschiebung des MThw-Höhenniveaus häufig zu einer Erosion des Dünenfußes, während die Akkumulation am Dünenfuß in einer Phase mit positivem Sedimentdargebot von verschiedenen Faktoren, wie Windstärke, Windrichtung und Winddauer, abhängt.

Für Trockenstrandbreiten kleiner als ca. 120 m stellt sich eine deutliche Abhängigkeit der Effektivität von Sandfangzäunen von den morphologischen Verhältnissen, wie sie durch die positive Verlagerung des MThw-Niveaus abgebildet werden, dar. Jedoch ist die Breite der Streuung für kleine Trockenstrandbreiten höher als dies für große Trockenstrandbreiten der Fall ist (Abbildung 18, Abbildung 19, Abbildung 22 und Abbildung 23). Dies kann mit der schnelle Reaktion des Dünenfußes auf kurzfristige Ereignisse, wie bspw. die Verlagerung von Strandriffen oder das Eintreten von Sturmfluten, erklärt werden.

Für Trockenstrandbreiten größer als ca. 120 m können aus den Daten keine eindeutigen Zusammenhänge abgeleitet werden, hier liegen nicht in allen Analyseabschnitten Daten vor bzw. weisen die Regressionsfunktionen geringe Korrelationskoeffizienten auf. Ist eine positive Verlagerung der MThw-Niveaus gegeben, wie es während der Phasen mit positiver Sedimentbilanz auf Langeoog der Fall ist, können Sandfangkörper am Dünenfuß aufgebaut werden. Diese können während einer nachfolgenden Phase mit negativer Sedimentbilanz den angrenzenden Dünenkörper vor dem Wellenangriff und damit verbundener Erosion schützen.

4 Numerische Untersuchungen zum Einfluss der Geometrie des Sandfangkörpers auf die Erosion des Dünenquerschnitts im Sturmflutfall

Zusätzlich am seeseitigen Dünenhang abgelagertes Sediment, wie es z. B. durch die Sandfangkörper innerhalb der Sandfangzäune erreicht werden kann, stellt im Fall von Sturmfluten ein Verschleißvolumen bereit, das zu einer Minderung von Erosionsverlusten am Hauptkörper der Randdüne führen kann.

Die Frage nach einem anzustrebenden Querschnitt für einen solchen Sandfangkörper, der bereits bei der Anlage der Sandfangmaßnahmen berücksichtigt werden sollte, erfordert weitergehende Untersuchungen, um die unterschiedliche Wirksamkeit von unterschiedlichen Geometrien des Sandfangkörpers mit Blick auf den dadurch gewonnenen zusätzlichen Schutz für die sturmflutkehrende Düne beantworten zu können.

4.1 Methodik

Neben in-situ Messungen und deren Analyse ermöglichen numerische Modellierungen eine weiterführende Simulation von Belastungszuständen und deren Auswirkungen. Hierbei können erosionsinduzierende Ereignisse variiert und Auswirkungen in Bezug auf einzelne Parametervariationen untersucht werden. Numerische Modellierungen eignen sich daher insbesondere für die Untersuchung von Szenarien.

Im Hinblick auf die mit Hilfe von Sandfangzäunen geschaffenen Sandfangkörper kann deren Wirkung zum Schutz der Düne vor Erosion im Fall von erhöhten Tiden oder Sturmfluten sowie der Einfluss der Geometrie auf diese Schutzwirkung durch systematisch variierte Szenarien ermittelt und analysiert werden.

Der Fokus der numerischen Modellierungen zur Wirkung von durch Sandfangmaßnahmen geschaffenen Sandfangkörper wird hierfür auf eine 1D-Simulationen gelegt, da die Zielsetzung auf konzeptionellen Betrachtungen gelegt wird. Es werden verschiedene generalisierte Strand- und Dünengeometrien untersucht, die mit ausgewählten Wasserstands-Seegangskonstellationen belastet werden. Als Modellierungssoftware wird das 2DH open source Modell XBeach (eXtreme Beach behaviour) verwendetet. XBeach ist ein numerisches Modell der küstennahen Prozesse, welches als Werkzeug zur numerischen Berechnung der natürlichen Küstenreaktion, wie Erosion einschließlich Dünenerosion, Überspülung, bei zeitlich variierenden Sturm- und Orkanbedingungen entwickelt wurde (Roelvink et al. 2009). Die modelltechnischen Einstellungen werden aus Hillmann et al. (2021) entnommen.

4.2 Randbedingungen

Für die systematischen Variationen bei der szenarienbasierten Betrachtung werden zum einen als Anfangsbedingung Strand- und Dünenprofile generalisiert, indem aus den Vermessungsdaten abgeleitete synthetische Strandprofile mit unterschiedlichen Breiten des trockenen Strandes generiert werden. Zu anderen werden als Randbedingungen die hydrodynamischen Belastungen aus Wasserstand und Seegang basierend auf verfügbaren langjährigen Messreihen in Belastungsszenarien überführt.

4.2.1 Generalisierte Strand- und Dünenprofile

Der Modellaufbau erfolgt anhand gemessener Querprofile auf Juist und Langeoog zwischen 1990 und 2020. Hierfür werden die Vermessungen der Profile 35, 37, 39, 41 und 50 auf Langeoog sowie die Profile 13, 15 und 17 auf Juist als Grundlage verwendet, um mittlere Neigungen des Strandprofils im Bereich der Trocken- und Nassstrandbreite sowie der Teilvorstrände als generalisierte Profile abzuleiten. Die Definitionen werden dafür aus der DIN 4049-3 entnommen, wonach der Trockenstrand von der Küstenlinie bis zum MThw reicht, der Nassstrandbereich zwischen MThw und MTnw liegt und sich dem MTnw der Vorstrand anschließt (DIN 1994).

Darauf aufbauend werden verschiedene Varianten für die Trockenstrandbreiten von 40, 60, 80 und 120 m definiert. Im Weiteren werden die zuvor bestimmten Neigungen n für die verschiedenen Strandbreiten b berücksichtigt:

- Trockenstrand: n=1:24 (b=40 m), n=1:35 (b=60 m), n=1:47 (b=80 m),
 - n=1:71 (b=120 m)
- Nassstrand: n=1:50 (b=130 m)
- Teilvorstrand I: n=1:79 (b=220 m)
- Teilvorstrand II: n=1:400 (b=800 m)
- Teilvorstrand III: n=1:564 (b=3380 m)

Eine Zusammenstellung der berücksichtigten Strandprofile zusammen mit der einheitlich bis auf eine Höhe von NHN + 12 m aufragenden, angrenzenden Düne ist Abbildung 28 dargestellt.



Abbildung 28: Ausgangsprofile mit Trockenstrandbreiten (TSB) von 40, 60, 80 und 120 m.

Die Nassstrandbreite wurde einheitlich auf 130 m festgelegt. Für die synthetischen Profile wurden die mittleren Tidehoch- und Tideniedrigwasserstände an die vorliegenden Pegelstatistiken von Norderney und Langeoog angenähert:

| MThw: | NHN + 1,3 m |
|-------|-------------|
| MTnw: | NHN – 1,2 m |

Zur Erstellung der Strandprofile wird an den Teilvorstrand III eine Profilanpassung bis NHN - 25 m zur Sicherstellung der numerischen Stabilität gemäß den Empfehlungen Deltares (2020) vorgenommen.

Für die Simulation von erfolgten Sandfangmaßnahmen am Dünenfuß werden den vier Ausgangsprofilen (vgl. Abbildung 28) unterschiedlich gestaltete Sandfangkörper am seeseitigen Hang in Form von trapezförmigen Körpern hinzugefügt. Dabei werden deren Geometrien so gestaltet, dass die hinzugefügten Volumina für alle Varianten der Trockenstrandbreite gleich und damit untereinander vergleichbar sind. Die Volumina der Sandfangkörper betragen 25, 50 bzw. 100 m³/m und entsprechen damit typischen Größenordnungen, die über Sandfangmaßnahmen erreicht werden. Die Böschungsneigung der Trapeze beträgt 1:2 und deren Höhe liegt bei 6, 8 bzw. 10 m über NHN. Für jede Volumenvariante
werden zwei unterschiedlich hohe Geometrien untersucht, die bei NHN + 6 m und NHN + 8 m bzw. NHN + 8 m und NHN + 10 m liegen.

Wegen der unterschiedlichen Neigungen des Trockenstrands variieren die lateralen Ausdehnungen der Sandfangkörper geringfügig zwischen den unterschiedlichen Trockenstrandvarianten. Bei der Untersuchungsvariante mit einer Trockenstrandbreite von 40 m (TSB_040) können nur die Varianten mit 25 m³/m Volumen sinnvoll angeordnet werden. Abbildung 29 stellt die vier untersuchten Trockenstrandsituationen zusammen mit der Düne und den simulierten Sandfangkörpervarianten dar.



Abbildung 29: Synthetische Trockenstrand- und Dünenprofile mit den jeweiligen Sandfangkörpervarianten (gleiche Farben der Geometrienumrisse der Sandfangkörper = gleiche Volumina).

4.2.2 Wasserstand und Seegang

Ausgehend von den Untersuchungen zur Bestimmung der Sturmflutgrenzwerte an der niedersächsischen Küste (Knaack et al. 2021) werden Windstauwerte für vergleichsweise hohe Eintrittswahrscheinlichkeiten als Grundlage der Szenarien gewählt. Niedrige Eintrittswahrscheinlichkeiten und die damit verbundenen höheren Windstauwerte werden nicht ausgewählt, da für diese Windstauwerte vollständige Erosionen der Sandfangkörper am Dünenfuß zu erwarten sind, so dass differenzierte Aussagen hinsichtlich unterschiedlicher Schutzwirkungen durch die unterschiedlichen Geometrien nur eingeschränkt ableitbar wären.

Der aus der Statistik zu Sturmflutgrenzwerten des Pegels Norderney (Knaack et al. 2021) für den Zeitraum 1941 – 2020 für die Szenarien gewählte Wertebereich des Windstaus beginnt bei einem Wiederkehrintervall des Staus von ungefähr einem Jahr und reicht bis zu einem Wiederkehrintervall von 3 Jahren. Damit verbunden sind Windstauwerte oberhalb des 5-jährigen-MThw, die rund 1 m bzw. 2 m betragen. Bei der Festlegung der in den Szenarien verwendeten Windstauwerte werden die drei Werte 1,0 m, 1,5 m und 2,0 m gewählt.

Für die Ermittlung der in den Szenarien verwendeten Seegangsparameter werden offen verfügbare langjährige Messreihen von Seegang und Wasserstand im Küstenvorfeld der Ostfriesischen Inseln verwendet. Diese stehen für den westlichen Bereich der Ostfriesischen Inseln am Pegel Huibertgat sowie für die Seegangsmessstation Westems Ost über das Wasserinformationssystem des niederländischen Rijkswaterstaat als langjährige Datensätze mit zeitlich hochaufgelösten 10-Minuten-Werte zur Verfügung (Rijkswaterstaat 2022). Der Abbildung 30 kann die Lage der Messstellen entnommen werden.



Abbildung 30: Lage der Messstellen Pegel Huibertgat (schwarzer Punkt) und Boje Westerems Ost (roter Punkt) sowie Farbschichtdarstellung des Höhenmodells von Rottumeroog bis Langeoog (Sievers et al. 2020).

Aus diesen Zeitreihen werden die Relationen der Wellenhöhe $H_{1/3}$ zur Wellenperiode $T_{H1/3}$ für die jeweils in den Szenarien verwendeten Windstauhöhen auf Plausibilität geprüft. Dabei werden nur stauwirksame Wellenrichtungen berücksichtigt, d.h. aus West bis Nordwest anlaufende Wellen entsprechend theta = 270° bis 315°. Für die Filterung der Seegangsmesswerte hinsichtlich der Windstauhöhe, die zum Zeitpunkt der Messung vorlag, werden Klassenbreiten von 0,5 m verwendet.

Die folgenden Darstellungen (Abbildung 31) der Wellenperiode $T_{H1/3}$ in Abhängigkeit der Wellenhöhe $H_{1/3}$ zeigen in den für die drei Stauwerte erfolgten Klassenbildungen einen linearen Zusammenhang, der für die beiden unteren Stauklassen mit Regressionskoeffizienten von größer als 0,8 eine gute bis sehr gute Regression darstellt. Für die größte Stauklasse von 1,75 m bis 2,25 m führt die geringe Werteanzahl und die vergleichsweise große Streuung zu einem Regressionskoeffizienten von 0,4865.

Die auf Basis dieser Teildatensätze gewählten Seegangsparameter, die sowohl die Wellenrichtung als auch die Stauhöhe berücksichtigen, sind als Szenarien die Parameterkombinationen "a" mit $H_{1/3} = 2,5$ m und $T_{H1/3} = 8,0$ s bzw. "b" mit $H_{1/3} = 4,0$ m und $T_{H1/3} = 10,0$ s in den Abbildungen eingefügt. Diese für die konstante hydrodynamische Belastung gewählten Werte liegen sehr nahe an der jeweils ermittelten Regressionsfunktion und zudem innerhalb der Messdatenwolke. Eine Ausnahme stellt die Stauklasse von 1,75 m bis 2,25 m in der unteren Abbildung dar, der Seegang "a" liegt hier deutlich außerhalb der für diesen Teildatensatz vorliegenden Seegangswerte. Daher wird im Szenario mit einem Stau von 2,0 m nur der Seegang "b" in den Simulationen verwendet.

Als ein weiteres Szenario wurde die an den oben genannten Messstellen gemessene Sturmflut vom 9.11.2007 ausgewählt. Die zeitlichen Verläufe der Seegangsparameter und Wasserstände sind in Abschnitt 4.2.3 darstellt.



Abbildung 31: Seegangsverhältnisse an der Messstelle Westerems Ost für am Pegel Huibertgat eingetretene Windstauhöhen von 1,0 m (oben), 1,5 m (Mitte) und 2,0 m (unten), Zeitraum 2007-2016.

4.2.3 Hydrodynamische Belastungsszenarien

Auf Grundlage der an den ausgewählten Beobachtungsstationen gemessenen Seegangsparameter wurden wasserstandsabhängige hydrodynamische Belastungsszenarien als Randbedingungen für die numerische Modellierung der Dünenerosion an den Sandfangkörpern festgelegt. Da systematische Untersuchungen Schwerpunkt der Untersuchungen bilden wurden eine konstante Belastung über 6 Stunden angesetzt. Aus den Simulationsergebnisse kann ebenfalls die Reaktion der Sandfangkörper auf kürzere Einwirkdauern abgelesen werden.

Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die in Kapitel 4.2.2 beschriebenen fünf Belastungsszenarien sowie deren Bezeichnungen.

Tabelle 6 Übersicht der verwendeten Werte sowie der Bezeichnung der Szenarien mit konstanten hydrodynamischen Belastungen.

| Stauwert | Wellenhöhe H _{1/3} | Wellenperiode $T_{H1/3}$ | Bezeichnung |
|--------------|-----------------------------|--------------------------|-------------|
| [<i>m</i>] | [<i>m</i>] | [\$] | [-] |
| 1,0 | 2,5 | 8,0 | K100a |
| | 4,0 | 10,0 | K100b |
| 1,5 | 2,5 | 8,0 | K150a |
| | 4,0 | 10,0 | K150b |
| 2,0 | 4,0 | 10,0 | K200b |

Diese fünf Belastungsszenarien werden in der numerischen Simulation der Dünenerosion für die vorgenannten synthetischen Strandprofile mit den jeweils unterschiedlichen Sandfangkörpergeometrien verwendet.

Ergänzend zu den Szenarien mit konstanten hydrodynamischen Randbedingungen wird ein Szenario mit am Pegel Huibertgat bzw. der Boje Westerems Ost gemessenen Zeitreihen der hydrodynamischen Randbedingungen simuliert. Dabei werden die gleichen synthetischen Strandprofile simuliert, die bei den Szenarien mit konstanter hydrodynamischer Belastung verwendet werden. Bei dem gemessenen Ereignis handelt es sich um die Sturmflut vom 9.11.2007, deren Scheitelwert einem Stau von rund 1,7 m entspricht. Die simulierte Zeitdauer beträgt 72 Stunden. Aus Gründen der numerischen Stabilität wurden die Messwerte mit einem gleitenden Mittel über 5 Werte geglättet. Diese sind in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt. Sowohl der Windstauwert als auch die Seegangsparameter liegen hierbei im Wertebereich der in den Szenarien mit konstanten hydrodynamischen Belastungen untersuchten Werte.

NLWKI



Abbildung 32: Wasserstandsganglinie der Sturmflut vom 9.11.2007 an der Messstation Huibertgat.



Abbildung 33: Seegangsparameter der Sturmflut vom 9.11.2007 an der Messstation Westems Ost.

4.3 Ergebnisse der numerischen Simulationen

Für die in den Abschnitten 4.2.1 festgelegten Strand- und Dünengeometrien mit unterschiedlichen Trockenstrandbreiten und Geometrien von Sandfangkörpern wurden die in Abschnitt 4.2.3 festgelegten zeitlich konstanten hydrodynamischen Belastungsszenarien für eine Dauer von 6 Stunden sowie für die gemessenen Seegangsparameter der Sturmflut vom 9.11.2007 für eine Dauer von 72 Stunden simuliert.

Die in den nachfolgenden Abbildungen dargestellten Modellergebnisse für die einzelnen Szenarien werden wie folgt bezeichnet:

"Trockenstrandbreite"_"Breite in m"_"Sandfangvolumen in m³/m"_"Höhe des Volumens über NHN in m". Hiermit ergibt sich zum Beispiel für eine Trockenstrandbreite von 60 m mit einem Volumen von 50 m³/m bis auf 8 m NHN Höhe die Bezeichnung TSB_060_050_08.

4.3.1 Simulationen mit konstanter hydrodynamischer Belastung

Die Belastungen mit dem Szenario K100a (MThw + 1 m, $H_{1/3} = 2,5$ m, $T_{H1/3} = 8$ s, vgl. Tabelle 6) führen ohne Sandfangkörper bei den schmaleren Trockenstrandbreiten von 40 und 60 m (TSB_040 und TSB_060) zu geringen Abbrüchen an der zu schützenden Hauptdüne und dabei zu einer Rückverlagerung der NHN + 11 m Linie von 0,6 m am Ende des Simulationszeitraumes. Die Erosionsvolumina betragen maximal 5,4 m³/m (Abbildung 34 und Abbildung 35).



Abbildung 34: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100a für Profil TSB_040 sowie variierte Sandfangvolumina.

Für breitere Strände von 80 m bzw. 120 m (TSB_080 und TSB_120) ergeben sich mit 0,1 m äußerst geringe bis keine Rückverlagerungen der NHN + 11 m-Linie. Bei einer Trockenstrandbreite von 120 m treten ohne Sandfangkörper keine Erosionen an der Hauptdüne auf (Abbildung 36 und Abbildung 37).



Abbildung 35: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100a für Profil TSB_060 sowie variierte Sandfang-volumina.



Abbildung 36: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100a für Profil TSB_080 sowie variierte Sandfang-volumina.



Abbildung 37: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100a für Profil TSB_120 sowie variierte Sandfang-volumina.

Die Belastungen mit dem Szenario K100b (MThw + 1 m, $H_{1/3} = 4,0$ m, $T_{H1/3} = 10$ s), die bei gleichem Windstau eine höhere Seegangsbelastung beinhaltet (Tabelle 6), führen zu erhöhten Erosionen an der Hauptdüne mit bis zu 2,9 m Tiefe und einem Erosionsvolumen von bis zu 24,2 m³/m. Für sämtliche untersuchten Trockenstrandbreiten werden durch alle Sandfangkörpervarianten (TSB_Breite_Volumen_Höhe) Erosionen der Hauptdüne verhindert. Allerdings sind die an den Sandfangkörpern auftretenden Erosionsvolumina auf Grund der reduzierten Strandbreiten z.T. deutlich höher als die ohne Sandfangkörper an der Hauptdüne auftretenden. Mit zunehmender Strandbreite nimmt die Differenz deutlich ab. (Abbildung 38 bis Abbildung 41).



Abbildung 38: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100b für Profil TSB_040 sowie variierte Sandfangvolumina.

NLWKN



Abbildung 39: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100b für Profil TSB_060 sowie variierte Sandfangvolumina.



Abbildung 40: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100b für Profil TSB_080 sowie variierte Sandfangvolumina.

NLWKN



Abbildung 41: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100b für Profil TSB_120 sowie variierte Sandfangvolumina.

Das Szenario K150a (MThw + 1,5 m, $H_{1/3} = 2,5$ m, $T_{H1/3} = 8$ s, vgl. Tabelle 6) führt ohne Sandfangpolster für die Trockenstrandbreite von 40 m zu Erosionstiefen und –volumina von 2,1 m bzw. 18,3 m³/m, welche sich im Fall eine Trockenstrandbreite von 120 m auf 0,3 m und 2,4 m³/m reduzieren. Die Erosionsvolumina an den Sandfangkörpern übersteigen wie für die Szenarien K100a und K100b mit maximal 23,2 m³/m diejenigen an der Hauptdüne ohne Sandfangkörper (Abbildung 42). Im Fall von Sandfangkörpern vor der Hauptdüne ist diese auf dem Höhenniveau von NHN + 11 m nicht von Erosion betroffen. Auf Grund des im Vergleich zum Szenario K100a um 0,5 m höheren Wasserstandes ergeben sich für alle untersuchten Fälle sowohl in Bezug auf Erosionstiefen als auch Erosionsvolumina höhere Werte (Abbildung 42 bis Abbildung 45). Die Varianten ohne Sandfangkörper erfahren jedoch eine geringere Rückverlagerung des NHN + 11 m Höhenniveaus als bei der Belastung durch das Szenario K100b (MThw + 1 m, H_{1/3} = 4,0 m, T_{H1/3} = 10 s), die durch eine höhere Seegangsbelastung bei um 0,5 m geringerer Wassertiefe gekennzeichnet ist.



Abbildung 42: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150a für Profil TSB_040 sowie variierte Sandfang-volumina.



Abbildung 43: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150a für Profil TSB_060 sowie variierte Sandfang-volumina.



Abbildung 44: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150a für Profil TSB_080 sowie variierte Sandfang-volumina.

NLWKN



Abbildung 45: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150a für Profil TSB_120 sowie variierte Sandfang-volumina.

Das Szenario K150b (MThw + 1,5 m, $H_{1/3} = 4,0$ m, $T_{H1/3} = 10$ s, vgl. Tabelle 6) führt für alle Profile zu Erosionen, die höher sind als bei den Szenarien K100b und K150a. Die größten Erosionen liegen bei einer Trockenstrandbreite von 40 m vor und belaufen sich an der Hauptdüne ohne Sandfangkörper auf 5,2 m Tiefe und 42,0 m³/m Volumen sowie im Fall eines Sandfangvolumens von 25 m³ auf 3,1 m Tiefe an der Hauptdüne und 46,9 m³/m Gesamtvolumen (Abbildung 46). In diesem Fall kann ein Sandfangkörper bis 2 Stunden nach Simulationsbeginn eine Rückverlagerung der NHN + 11 m- Linie verhindern. Bei allen Trockenstrandbreiten werden die Varianten der Sandfangkörper mit

25 m³/m zu unterschiedlichen Zeitpunkten vollständig erodiert, während im Fall von Volumina mit 50 bzw. 100 m³/m keine Erosion der Hauptdüne auf einem Höhenniveau von NHN + 11 m stattfindet (Abbildung 47 bis Abbildung 49).



Abbildung 46: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150b für Profil TSB_040 sowie variierte Sandfangvolumina.



Abbildung 47: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150b für Profil TSB_060 sowie variierte Sandfangvolumina.



Abbildung 48: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150b für Profil TSB_080 sowie variierte Sandfangvolumina.

NLWKN



Abbildung 49: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150b für Profil TSB_120 sowie variierte Sandfangvolumina.

Das Szenario K200b (MThw + 2,0 m, $H_{1/3} = 4,0$ m, $T_{H1/3} = 10$ s, vgl. Tabelle 6) führt für alle Profile zu Erosionen, die auf Grund der stärksten hydrodynamischen Belastung höher sind als bei allen anderen untersuchten Szenarien. Bei einer Trockenstrandbreite von 40 m liegen die größten Erosionen vor, welche sich an der Hauptdüne ohne Sandfangkörper auf 7,9 m Tiefe und 62,2 m³/m Volumen sowie im Fall eines Sandfangvolumens von 25 m³ auf 5,9 m Tiefe an der Hauptdüne und 66,2 m³/m Gesamtvolumen belaufen (Abbildung 50). Für Sandfangkörper mit einem Volumen von 100 m³/m treten für allen untersuchten Trockenstrandbreiten keine Erosionen an der Hauptdüne auf dem Höhenniveau von NHN + 11 m auf. In allen Fällen reduziert die Existenz von Sandfangkörpern

vor der Hauptdüne die Erosion an dieser signifikant (Abbildung 50 bis Abbildung 53). Hierbei steigt die relative Wirkung mit zunehmender Strandbreite an. Für ein Volumen von 25 m³ wird die Erosionstiefe an der Hauptdüne bei 40 m Trockenstrandbreite von 7,9 m auf 5,9 m entsprechend auf 75 % und bei 120 m Trockenstrandbreite von 3,4 m auf 1,0 m entsprechend 29 % reduziert. Die Unterschiede in den Erosionsvolumina zwischen den untersuchten Varianten ohne Sandfangkörper und mit Sandfangkörpern reduzieren sich im Vergleich zu den untersuchten Varianten mit geringeren Windstauwerten signifikant, da bedingt durch den höheren Windstauwert eine unmittelbarere Seegangsexposition gegeben ist, welche zu Erosion der Hauptdüne bzw. des Sandfangkörpers führt.



Abbildung 50: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K200b für Profil TSB_040 sowie variierte Sandfangvolumina.

NLWKN



Abbildung 51: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K200b für Profil TSB_060 sowie variierte Sandfangvolumina.



Abbildung 52: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K200b für Profil TSB_080 sowie variierte Sandfangvolumina.

NLWKN



Abbildung 53: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K200b für Profil TSB_120 sowie variierte Sandfangvolumina.

4.3.2 Belastung durch Seegangsparameter der Sturmtide vom 9.11.2007

Die Erosion an der Hauptdüne bzw. den Sandfangkörpern setzt für die gemessenen Seegangsparameter der Sturmflut vom 9.11.2007 signifikant 30 Stunden nach Simulationsbeginn mit Eintritt der Haupttide der Sturmflut ein. Über die Dauer der Haupttide bis zum Simulationszeitpunkt 36 Stunden nach Simulationsbeginn setzen sich die Erosionen maßgeblich in allen Szenarien fort ein (Abbildung 54 bis Abbildung 57). Für die nachfolgende erhöhte Tide finden weitere Erosionen des Sedimentvolumens im Wesentlichen in Form einer Umlagerung von bereits in den Strandbereich umgelagertem Material in deutlich geringerem Umfang statt, während nur noch für die Trockenstrandbreiten von 40 m und 60 m geringfüge Erosionen der Hauptdüne auftreten.

Es ergeben sich maximale Erosionsraten von 8,4 m an der Hauptdüne bei 77,9 m³/m Erosionsvolumen für eine Trockenstrandbreite von 40 m. Die maximalen Erosionsraten betragen 91,8 m³/m bei einer Trockenstrandbreite von 60 m und einem bis auf NHN+8 m ausgedehnten Sandfangkörper von 100 m³/m Volumen. Für den Sandfangkörper von 100 m³/m zeigt sich ebenfalls wie in den konstanten Belastungsszenarien mit starker Seegangsbelastung, dass ein höhere Geometrie zu geringeren Erosionsraten führt (Abbildung 54 und Abbildung 56).



Abbildung 54: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der hydro-dynamischen Belastungen des Szenarios "reale Sturmflut" für Profil TSB_040 sowie variierte Sandfangvolumina.





Abbildung 55: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der hydro-dynamischen Belastungen des Szenarios "reale Sturmflut" für Profil TSB_060 sowie variierte Sandfangvolumina.

10,0

-**-**TSB_060



Abbildung 56: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der hydro-dynamischen Belastungen des Szenarios "reale Sturmflut" für Profil TSB_080 sowie variierte Sandfangvolumina.





Abbildung 57: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der hydro-dynamischen Belastungen des Szenarios "reale Sturmflut" für Profil TSB_120 sowie variierte Sandfangvolumina.

4.3.3 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

Mit Zunahme der Trockenstrandbreite nimmt die schützende Wirkung der Sandfangkörper für die Hauptdüne in Form einer Reduzierung bis hin zur Vermeidung von Erosion an dieser generell zu. Bei den Sandfangkörpervarianten zeigen sich zwischen den Geometrien in Bezug auf die Höhe der Körper Unterschiede in den Erosionsvolumina. Die niedrigeren und damit weiter seewärts reichenden Sandfangköper mit einem Volumen von 100 m³/m erodieren in den stärkeren Belastungsszenarien K150a, K150b und K200b bei höheren Erosionsraten stärker als die höheren und damit lateral geringer ausgedehnten Sandfangkörper. Besonders deutlich wird dieses in Abbildung 43, Abbildung 47, Abbildung 48, Abbildung 55 und Abbildung 56.

Insgesamt zeigt sich über alle Simulationen, dass sich im Fall einer größeren Trockenstrandbreite die Erosion der Düne reduziert. Bei geringen Trockenstrandbreiten von 40 m und 60 m treten deutliche Erosionen auf, während bei Trockenstrandbreiten von 80 m nicht mehr für alle untersuchten Szenarien Erosionen stattfinden. Für Trockenstrandbreiten von 120 m erfolgen Erosionen ausschließlich bei starken hydrodynamischen Belastungen, wie sie in Sturmfluten gegeben sind.

5 Konzeption von Versuchsfeldern für Sandfangmaßnahmen und örtliche Beobachtungen

Die auf den Insel Norderney und Langeoog errichteten Versuchsfelder mit verschiedenen Bauweisen von Sandfangmaßnahmen wurden durch den NLWKN in Absprache mit der RWTH Aachen konzipiert. Ziel ist es, die Wirksamkeit in Bezug auf die Sedimentakkumulation zur Schaffung von Sandfangpolstern am Dünenfuß und äußeren Dünenhang zu untersuchen. Für die Gestaltung der Zäune wurden vier verschiedene Bautypen entwickelt, die Variationen von auf den Ostfriesischen Inseln praktizierten Bauweisen darstellen. Das genutzte Material entspricht den dort üblicherweise für Sandfangzäune verwendeten Bünden frisch geschlagener, gesunder, blattloser, dicht verzweigter und schlanker Reiser. Ein Bund weist einen Durchmesser von 20 cm auf, die einzelnen Reiser eine Länge von mindestens 2 m und einen Durchmesser von maximal 2-3 cm am Stammende.

Während der Bau der Felder durch den NLWKN durchgeführt wurde, oblag die regelmäßige Vermessung sowie die Auswertung der Messergebnisse der RWTH (Eichmanns & Schüttrumpf 2021). Ergänzend dazu fanden Drohnenbefliegungen und regelmäßige Begehungen durch den NLWKN zur visuellen Dokumentation des jeweiligen Zustands statt, so dass neben den durch die RWTH erzielten quantitativen Ergebnissen die Entwicklung der Felder auch visuelle dokumentiert wurde.

Am 17. bzw. 18. Juli 2019 fand ein erster Feldaufbau an den nach Norden ausgerichteten Stränden der Inseln Langeoog und Norderney statt. Durch die Sturmflut Sabine am 10. Februar 2020, die mit einem Scheitelwasserstand von rund NHN + 3 m am Pegel Langeoog eintrat, wurde ein Großteil der Maßnahmen auf Langeoog zerstört (siehe Abbildung 58), weshalb dort am 18. Mai 2020 ein Neuaufbau am selben Strandabschnitt erfolgte. Die exakte Lage der Versuchsfelder ist dem Bericht (Eichmanns & Schüttrumpf 2021) zu entnehmen.



Abbildung 58: Sandfangzäune auf Langeoog unter Einfluss einer Sturmflaut an drei aufeinanderfolgenden Tagen mit deutlich zunehmender Erosion und Zerstörung: a) 10.02.2020 b) 11.02.2020 c) 12.02.2020.

5.1 Konzeption der Versuchsfelder

Für den Aufbau wurden vier verschiedene Konstellationen der Sandfangmaßnahmen umgesetzt, die auf vier Grundtypen basieren. Typ A und B bestehen aus einem dünenparallelen Zaun mit beidseitigen Abweisern, wobei die dünenparallele Zaunkomponente bei Typ A eine geringere Durchlässigkeit aufweist als bei Typ B. Für den Bau des dünenparallelen Zaunes "Typ A" wurden die Bünde dicht an dicht gesetzt (ca. 5 Bund pro Meter), bei Typ B wurden die einzelnen Bünde gelöst und aufgefächert (ca. 2 Bund pro Meter, s. Abbildung 59). Die mit den verschiedenen Setzdichten korrelierenden Porositäten sind der Ausarbeitung der RWTH im Rahmen des Teilprojektes ProDune-A zu entnehmen (Eichmanns et al. in prep.). Typ C unterschiedet sich von Typ B durch das Fehlen der seeseitigen Abweiser (Abbildung 59). Typ D besteht ausschließlich aus senkrecht zur Düne angeordneten Abweisern.

Die seeseitigen Abweiser sind, sofern vorhanden, jeweils 3 m lang. Auf Langeoog gilt dies auch für die dünenseitigen Abweiser. Auf Norderney liegt am Ort der Versuchsfelder eine sehr flache Dünenböschung vor. Hier wurden zweireihige Sandfangzaunfelder angelegt, bestehend aus zwei Reihen dünenparalleler Sandfangzäune (im Fall von Typ A, B und C). Der Abstand zwischen den dünenparallelen Zäunen beträgt hier 10 m, die dünenseitigen Abweiser richten sich in ihrer Länge nach der Bewuchsgrenze der Düne.

Auf Langeoog wurden von jedem Typ drei 10 m breite Felder nebeneinander gebaut, auf Norderney jeweils fünf. Am westlichen Rand der Felder wurden auf Norderney zusätzlich zwei 20 m breite Felder des Typs A errichtet. Die mittleren Trockenstrandbreiten betrugen auf Norderney ca. 400 m und auf Langeoog ca. 80 m.

Beim Bau der ersten Testfelder im Jahr 2019 wurden die Felder von West nach Ost in der Typ-Reihenfolge A-B-C-D errichtet. Beim Neubau 2020 auf Langeoog wurde die Typ-Reihenfolge B-D-A-C realisiert, um über die verschiedenen Positionen die Effektivität der Felder unabhängig von ihrer Lage im Gesamtfeld einschätzen zu können.

Grundrisse und Luftbilder der errichteten Versuchsfelder sind in Abbildung 60, Abbildung 61 und Abbildung 62 dargestellt.



Abbildung 59: Zäune der Typen A (links) und B (rechts) auf Langeoog eine Woche nach dem Bau (Mai 2020).



Abbildung 60: Luftbild der Versuchsfelder Norderney, 18.12.2019.



Abbildung 61: Luftbild der Versuchsfelder Langeoog I, 18.9.2019.



Abbildung 62: Luftbild der Versuchsfelder Langeoog II, 26.5.2020.
5.2 Beobachtungen der Versuchsfelder

Die in Kapitel 5.1 beschriebenen Versuchsfelder wurden im Zeitraum zwischen ihrem Bau im Juli 2019 bzw. Mai 2020 und dem Frühjahr 2022 in unregelmäßigen Abständen aufgesucht und die auf visuellen Eindrücken basierenden Beobachtungen dokumentiert.

5.2.1 Auswirkungen verschiedener Bauweisen

Eine hohe Setzdichte ("Typ A"), welche mit einer geringen Durchlässigkeit einhergeht, führt dazu, dass sich der Sand sehr nah am Zaun ablegt. Es bildet sich ein vergleichsweise schmaler Sandwall direkt am Zaun (Abbildung 63, A). Im Anfangsstadium entstehen zudem furchenartige Auskolkung in den Zwischenräumen der Astbündel. Ein Zaun mit geringerer Setzdichte ("Typ B" und "Typ C") und dementsprechend höherer Durchlässigkeit führt zu einem Sandtransport weiter in die Felder hinein. Es bilden sich breitere Sandfangkörper hinter dem Zaun (Abbildung 63, B und C). Dieser Zusammenhang wird auch auf einem Luftbild des Versuchsfeldes auf Norderney deutlich, auf dem der frische Sand an Hand der feineren Strukturen erkennbar ist (Abbildung 64). Zur Verdeutlichung wurde die optisch detektierte Grenze farblich hervorgehoben.

Seeseitige Abweiser bewirken eine Sandakkumulation vor dem dünenparallelen Zaun im Windschatten der Abweiser (Abbildung 63, Luftbild). Im Nahfeld der Feldunterteilungen, welche eine Flucht mit den Abweisern bilden, akkumuliert auf Grund der geringeren Windexposition ebenfalls mehr Sediment als in der Mitte des Feldes (Abbildung 63, A und B). Ohne seeseitige Abweiser findet kaum Akkumulation seeseits des Zaunes statt, hinter dem Zaun bildet sich ein gleichmäßiges Sedimentpolster (Abbildung 63, C).

Ist kein dünenparalleler Zaun vorhanden ("Typ D"), akkumuliert das Sediment flächig zwischen den Zäunen bzw. im Windschatten der Abweiser.



Abbildung 63: Versuchsfelder II auf Langeoog am 3.3.2021 im Luftbild (links) sowie die verschiedenen Feldtypen A, B, C und D (rechts)



Abbildung 64: Versuchsfelder auf Norderney, 8.5.2020. Die Sandfangzäune sowie die landseitige Grenze des frisch angewehten Sedimentes sind farblich hervorgehoben.

Bei allen untersuchten Sandfangzaunkonstellationen sammelte sich im westlichsten Feld aufgrund der Randlage und der überwiegend westlichen Windrichtung überdurchschnittlich viel Sediment (Abbildung 65). Bei den im Jahr 2020 auf Langeoog erbauten Feldern gilt dies auf Grund von zeitweisen östlichen Windlagen auch für das östliche Randfeld. Bei den im Jahr 2019 erbauten Feldern ist eine überdurchschnittliche Sedimentation des östlichsten Feldes nicht zu beobachten, was jedoch mit der schlechten Vergleichbarkeit von Feldern des Typs D, welche sich bei den 2019 erstellten Konstellationen am östlichen Rand befanden, mit den anderen Feldtypen zu erklären ist. Sofern ein dünenparallel verlaufender Zaun vorliegt, akkumuliert in den am Rand liegenden Feldern mehr Sand als in den mittleren Feldern, unabhängig von der Durchlässigkeit und dem Vorhandensein seeseitiger Abweiser.



Abbildung 65: Windrose für den Zeitraum 1.7.2019-31.12.2021 (Deutscher Wetterdienst).

5.2.2 Zeitlicher Ablauf der Akkumulation und Endzustand der Felder

Die Versuchsfelder wurden im Juli 2019 bzw. Mai 2020 erbaut. Während des Sommers des jeweiligen Jahres waren nur geringe Veränderungen der Felder zu erkennen; eine starke, gut sichtbare Akkumulation von Sediment setzte ab September ein. Der akkumulierte Sand lagerte sich in den Windschatten der Sandfangzäune ab woraus sich ein jeweils der Windsituation entsprechendes Bild ergab. Durch die Sturmfluten vom Februar 2020 wurde ein Großteil des Versuchsfeldes auf Langeoog zerstört (s. Abbildung 58, Abbildung 66). Eine punktuelle Vermessung der Abbruchkante zeigt jeweils das Geländeniveau der einzelnen Feldmitten ober- und unterhalb der Abbruchkante von 1 m bis 1,5 m Höhe sowie Vergleichswerte auf beiden Seiten des Versuchsfeldes. (Abbildung 67). Im April 2019 vor dem Bau der Versuchsfelder variierte das Strandniveau an dieser Stelle zwischen NHN + 3,9 m und NHN + 4,3 m. Während der bis dato sechsmonatigen Versuchslaufzeit ist das Niveau in allen Feldern deutlich gestiegen, ohne das eine visuelle Differenzierung der Auswirkungen der verschiedenen Typen sichtbar ist.

Ende Oktober 2021, 17 Monate nach dem Bau des zweiten Versuchsfeldes auf Langeoog im Mai 2020, ist dieses nahezu vollständig versandet (Abbildung 68). In diesem Zustand sind optisch keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Bauweisen mehr erkennbar. Dies schließt auch den Feldtyp D mit ein. Bei ausreichender Sedimentzufuhr zeigt die gewählte Bauweise der Zäune eine mit zunehmender Standdauer geringer werdende Auswirkungen.

Die auf Norderney 2019 errichteten Sandfangzäune sind aufgrund ihrer Größe, die aus dem Abstand der dünenparallelen Zäune zu der Bewuchsgrenze der Düne resultiert, und der doppelten Reihe dünenparalleler Zäune bis zum Januar 2022 nicht vollständig versandet (s. Abbildung 69). Während in den seeseitigen ca. 15 m tiefen Bereichen der Versuchsfelder, welche sich aus dem 10 m*10 m großen vollständig umschlossenen Quadrat und den ersten Metern des dahinterliegenden, länglichen Feldes zusammensetzen, deutlich Akkumulation zeigen, befindet sich in dem dünenseitigen Bereich der Felder deutlich weniger Sediment, erkennbar an den weiter herausragenden Sandfangzäunen. Mit der hier genutzten Konstruktion aus zwei dünenparallelen Sandfangzäunen lässt sich ein neuer Dünenkamm entwickeln, es wird jedoch weniger Sediment in den Bereich des Dünenhanges transportiert.



Abbildung 66: Abbruchkante an den Versuchsfeldern Langeoog, 19.2.2020



Abbildung 67: Stationsbezogene Geländeoberkante in Metern über NHN ober- und unterhalb der Abbruchkante in der Mitte der Versuchsfelder auf Langeoog am 19.02.2020.



Abbildung 68: Versuchsfelder auf Langeoog am 28.10.2021.



Abbildung 69: Versuchsfelder auf Norderney am 25.1.2022.

6 Empfehlungen zum Einsatz von Sandfangmaßnahmen

Als ingenieurbiologische Maßnahme des naturbasierten, aktiven Küstenschutzes stellt der Einsatz von Sandfangmaßnahmen ein Element zur Wiederherstellung oder Stärkung von Randdünen dar, für welche keine aktuelle Gefährdungslage besteht. Deshalb kann ein mittelfristiger Aufbau eines Sandfangkörpers am Dünenfuß und damit eine im Zeitverlauf abhängig vom äolischen Transport zunehmende Schutzwirkung über Sandfangmaßnahmen bei geeigneten Bedingungen erreicht werden. Im Gegensatz zu mittels Erdbaumaschinen oder in Naßbaggertechnik hergestellten Dünenverstärkungen, über die Gefährdungssituationen auf Grund von zu geringen Dünenbreiten unmittelbar beseitigt werden, müssen bei der Planung von Sandfangmaßnahmen der längere Zeitraum bis zur ausreichenden Akkumulation und ein ggf. erforderliches schrittweises bzw. wiederholtes Vorgehen berücksichtigt werden.

Wesentlicher Faktor für die gezielte Schaffung von Sandfangkörpern, welche die Hauptdüne schützen, ist das Sedimentdargebot, aus dem durch äolischen Transport ein Sandfangkörper am Dünenfuß und zeitlich anschließend am seeseitigen Dünenhang entstehen kann. Neben der Breite des trockenen Strands vor der Düne, die einen Einfluss auf das Sedimentdargebot sowie insbesondere bei schmalen Stränden auf die Energiedissipation auf dem Strand und damit die Erosion der Düne hat, stellt die Entwicklungstendenz der MThw-Höhenniveau-Verlagerung einen weiteren Parameter zur Einschätzung der Wirksamkeit von Sandfangmaßnahmen am Dünenfuß dar. Diese muss in engem Zusammenhang mit den morphologischen Prozessen im Strand- und Vorstandbereich und den zu Grunde liegenden Zeitskalen betrachtet werden.

Grundsätzlich können Sandfangmaßnahmen dazu beitragen, die Dünenfußentwicklung positiv zu beeinflussen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen dabei unabhängig von den morphologischen Situationen einen mit der Breite des Trockenstrands zunehmend positiven Einfluss der Sandfangmaßnahmen. Für Strandabschnitte mit Trockenstrandbreiten zwischen 50 m und rund 80 m können Sandfangmaßnahmen, wie in Abschnitt 3 dargestellt, zu einem deutlich positiven Beitrag zur Entwicklung des Dünenfußes führen. Der Umfang ist dabei von der morphologischen Konstellation und Entwicklung der Strandbereiche abhängig.

Bei Trockenstrandbreiten kleiner als 50 m zeigen sich auf Juist in keiner Konstellation positive Dünenfußentwicklungen, es ist bei diesen sehr geringen Trockenstrandbreiten kaum eine Wirkung der Sandfangmaßnahme erkennbar.

Dagegen zeigen sich auf Langeoog bei positiver MThw-Höhenniveau-Verlagerung auch für Trockenstrandbreiten kleiner als 50 m in den Analyseabschnitt A und B, die im Westen bzw. vor dem Pirolatal liegen, deutlich positive Beiträge der Sandfangmaßnahme zur Entwicklung des Dünenfußes. Bei negativer MThw-Höhenniveau-Verlagerung stellen sich auf Langeoog nur leicht positive Beiträge der Sandfangmaßnahmen zur Entwicklung des Dünenfußes dar, jedoch reichen diese nicht aus, um einen insgesamt positiven Entwicklungstrend des Dünenfußes zu erzielen.

Bei Trockenstrandbreiten größer als rund 80 bis 100 m und einer negativen MThw-Höhenniveau-Verlagerung sind nur geringe Unterschiede im Vergleich zur Situation ohne-Sandfang zu erkennen. Deutlicher ist dies bei den Fällen mit einer positiven MThw-Niveau-Verlagerung sowohl auf Juist als auch auf Langeoog. Die unterschiedlichen morphologischen Konstellationen auf den Inseln bzw. im Vergleich der Inseln wirken sich deutlich unterschiedlich auf den Entwicklungstrend des Dünenfußes aus. Hieraus kann abgeleitet werden, dass bei der Planung von Sandfangmaßnahmen neben der Betrachtung des Strand- und Dünenprofils auch das Sedimentdargebot in Strandlängsrichtung, wie es beispielsweise bei Platenanlandungen in benachbarten Strandbereichen auftritt, berücksichtigt werden muss.

Die große Streuung der Dünenfußentwicklungstrends ist zum einen durch die verwendete Analysemethode mit gleitenden 5-Jahres-Mittelwerten, die wegen der deutlich unterschiedlichen zeitlichen Abstände der Messdaten (Messintervalle von mehreren Monaten bis zu einem Jahr) erforderlich ist, verursacht. Zum anderen führen die unterschiedlichen morphologische Zustände von hochdynamischen Transportkörpern wie Strandriffen und Strandprielen im Strandbereich, sturmflutbedingten Erosionen des Dünenfüßes, Erfolge der Sandfangmaßnahmen und unterschiedliche Windsituationen in den jeweiligen Analyseabschnitten zu einem großen Wertebereich. Es besteht insofern eine begrenzte Aussagefähigkeit der im Abschnitt 3.3 ermittelten Regressionsfunktionen, jedoch geben die sich abzeichnende Unterschiede der Wirkung zwischen positiven und negativen Küstenentwicklungen wichtige Hinweise für die Praxis.

Sandfangmaßnahmen sollten daher in Abhängigkeit von der morphologischen Situation geplant werden, dabei sind die kurz- und langfristige morphologische Prozesse zu berücksichtigen. Die Trockenstrandbreite von 50 m, die ähnlich groß ist wie die von Erchinger (1986) mit 60 m beschriebene Trockenstrandbreite des Strandtyps II, stellt dabei eine untere Grenze für den Dünenwiederaufbau mit Sandfang dar. Bei geringeren Trockenstrandbreiten sollten nur in Ausnahmefällen und bei gegebener positiver strandmorphologischer Situation Sandfangmaßnahmen am Dünenfuß durchgeführt werden.

Für die längerfristige Schaffung von Sandfangkörpern, z.B. nach längeren Erosionsphasen, sind Sandfangmaßnahmen, die bei gleichem Volumen eine eher höheren als breiteren Sandfangkörper schaffen, zielführender um die Erosionsanfälligkeit zu optimieren. Dies ist durch den Einsatz von durchlässigeren Zäunen erreichbar, die eine gezieltere Steuerung der Sedimentation in dem oberen Dünenhangbereich bis in die Hauptdüne zulassen.

Bei Beginn der Sandfangmaßnahmen auf dem Trockenstrand sollte kein zu großer Abstand zum Dünenfuß konzipiert werden, um eine Sedimentation in dem dünennahen Bereich nicht zu unterbinden.

Die gezielte Entwicklung der Sandfangkörper verläuft nach erfolgter erster Akkumulation in Phasen, die in vertikaler und horizontaler Richtung den Sandfangkörper aufbauen. Die Dauer dieser Phasen ist abhängig von der Sedimentakkumulation und in der Regel mehrjährig.

Über dünenparallele Zaunreihe, die in der Regel. nicht maximal dicht gesetzt werden, lässt sich Akkumulation, die möglichst flächig stattfinden sollte, kontrollieren. Über offene, orthogonal zur Dünen gesetzte Sandfangzäune, die ohne dünenparallele Zaunreihe erstellt werden, lassen sich die Sedimentationszonen weniger gut kontrollieren.

Der Einsatz von dichter gesetzten Sandfangzäunen erscheint vor allem dann sinnvoll, wenn nahe an der Dünenabbruchkante bei schmalen Stränden Sandfangkörper angelegt werden sollen. Im Fall von größerem Abstand der dünenparallelen Zäune vom Dünenfuß besteht, insbesondere bei geringerem äolischen Sedimentdargebot, die Gefahr, dass der Bereich zwischen Sandfangmaßnahme und Dünenkante unvollständig aufgefüllt wird.

NLWKN

7 Danksagung

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung des KFKI-Forschungsvorhabens ProDune-B (FKZ: 03KIS126) durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und den Projektträger Jülich (PTJ) sowie für die fachliche Begleitung durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI).

8 Schriftenverzeichnis

- Adriani, M. J.; Terwindt, J. H. J. (1974): Sand Stabilization And Dune Building. In: Rijkswaterstaat Communications (19).
- ALW (1997): Amt für Land- und Wasserwirtschaft. Fortschreibung Fachplan Küstenschutz Sylt. Husum.
- Carter, R. W. G.; Curtis, T. G. F.; Sheehy-Skeffington, M. J. (Hg.) (1992): Coastal Dunes. Management and conservation of sand dunes in Denmark. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Conscience Sentinel 2 (2018): https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser. Hg. v. Copernicus, European Space Agency (ESA).
- Deltares (2020): Boundary condition guidelines for XBeach simulations. Deltares Rapport 11205758-029-GEO-0003. Delft, The Netherlands.
- Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter http://opendata.dwd.de/, zuletzt geprüft am 28.04.2022.
- DIN (1994): Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 4049-3 Hydrologie Teil 3, Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- Ehlers, Jürgen (1988): The morphodynamics of the Wadden Sea. Rotterdam, Brookfield: A.A. Balkema.
- Eichmanns, Christiane; Lechthaler, Simone; Zander, Wiebke; Pérez, Mariana Vélez; Blum, Holger; Thorenz, Frank; Schüttrumpf, Holger (2021): Sand Trapping Fences as a Nature-Based Solution for Coastal Protection: An International Review with a Focus on Installations in Germany. In: Environments 8 (12), S. 135. DOI: 10.3390/environments8120135.
- Eichmanns, Christiane; Schüttrumpf, Holger (2021): Influence of Sand Trapping Fences on Dune Toe Growth and Its Relation with Potential Aeolian Sediment Transport. In: JMSE 9 (8), S. 850. DOI: 10.3390/jmse9080850.
- Eichmanns, Christiane; Pérez, Mariana Vélez; Schüttrumpf, Holger: Einfluss von Sandfangzaunkonfigurationen auf das Wachstum des Dünenfußes. Die Küste in prep.
- Erchinger, Heie Focken (1986): Strandaufspülungen als aktiver Küstenschutz vor Schutzwerken und Dünen auf Norderney und Langeoog. Die Küste H.43, Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hsg.), Heide i. Holstein.
- Fuglsang, Anthon (1947): Bidrag til Sandflugtens Historie. In: Jyske Samlinger (5. rk bd. 8), S. 162–194.
- Gerhardt, Paul (1900): Handbuch des deutschen Dünenbaues.
- Gómez-Pina, Gregorio; Muñoz-Pérez, Juan J.; Ramírez, Jose L.; Ley, Carlos (2002): Sand dune management problems and techniques, Spain. In: Journal of Coastal Research 36, S. 325–332. DOI: 10.2112/1551-5036-36.sp1.325.

- Hanley, M. E.; Hoggart, S.P.G.; Simmonds, D. J.; Bichot, A.; Colangelo, M. A.; Bozzeda, F. et al. (2014): Shifting sands? Coastal protection by sand banks, beaches and dunes. In: Coastal Engineering 87, S. 136–146. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2013.10.020.
- Hayes, M. O. (1979): Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: Academic Press, Inc.
- Hillmann, S.; Geertsen, K.-S.; Quataert, E.; Hoogland, R.; Frederiksen, B. (2021): Influencing the SPR for storm surge events. A cross-border XBeach application. Final Report.
- Hoff, J. an't; Kolff, A. N. van der (2012): Hydraulic Fill Manual, 1. Auflage. CRC Press / Balkema Taylor & Francis Group, Leiden, The Netherlands.
- Hotta, Shintaro; Harikai, Souichi (2010): State-of-the-art in Japan on controlling windblown sand on beaches. In: Coastal Engineering.
- Khalil, Syed M. (2008): The Use of Sand Fences in Barrier Island Restoration: Experience on the Louisiana Coast.
- Knaack, H.; Berkenbrink, C.; A. Wurpts (2021): Ermittlung der Sturmflutgrenzen für die niedersächsische Küste und Ästuare. Hg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für-Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Unveröffentlichter Untersuchungsbericht, Norden.
- Krause, G. C. A. (1850): Der Dünenbau auf den Ostsee-Küsten West-Preussens. Berlin: Carl Reimarus' Verlag.
- Ladage, F. (2001): Sonderuntersuchungen für Vorarbeiten zum Inselschutz Ostfriesische Inseln - Morphologische Entwicklung im Bereich Juist-Memmert. Hg. v. Niedersächsiches Landesamt für Ökologie. Forschungsstelle Küste. Norderney, Germany.
- Ladage, F. (2002): Vorarbeiten zu Schutzkonzepten für die Ostfriesischen Inseln Morphologische Entwicklung um Langeoog im Hinblick auf die verstärkten Dünenabbrüche vor dem Pirolatal. Hg. v. Niedersächsiches Landesamt für Ökologie. Forschungsstelle Küste. Norderney, Germany.
- Lima, Izael A.; Araújo, Ascânio D.; Parteli, Eric J. R.; Andrade, José S., JR.; Herrmann, Hans J. (2017): Optimal array of sand fences. Online verfügbar unter http://arxiv.org/pdf/1702.05114v1.
- Mendelssohn, Irving A.; Hester, Mark W.; Monteferrante, Frank J.; Talbot, Fay (1991): Experimental Dune Building and Vegetative Stabilization in a Sand-deficient Barrier Island Setting on the Louisiana Coast, USA.
- Miller, Deborah L.; Thetford, Mack; Yager, Lisa (2001): Evaluation Of Sand Fence And Vegetation For Dune Builduing Following Overwash By Hurricane Opal On Santa Rosa Island, Florida.
- NDG (2004): Niedersächsisches Deichgesetz i.d.F. v. 23.02.2004.
- NLWKN (2010): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen: Ostfriesische Inseln, Küstenschutz Band 2. Ostfriesische Inseln. Hg. v. Niedersächsicher Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Norden.
- Nordstrom; Lampe; Vandemark (2000): Reestablishing Naturally Functioning Dunes on Developed Coasts. In: Environmental management 25 (1), S. 37–51. DOI: 10.1007/s002679910004.
- Rijkswaterstaat (2022): Directorate-General for Public Works and Water Management. https://waterinfo.rws.nl/, zuletzt geprüft am 10.11.2022.

Roelvink, Dano; Reniers, Ad; van Dongeren, Ap; van Thiel de Vries, Jaap; McCall, Robert; Lescinski, Jamie (2009): Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. In: Coastal Engineering 56 (11-12), S. 1133–1152. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2009.08.006.

Savage, Rudolph P. (1962): Experimental Study of Dune Building with Sand Fences.

- Sievers, J., Rubel, M., Milbradt, P. (2020): EasyGSH-DB: Bathymetrie (1996-2016). Bundesanstalt für Wasserbau. https://doi.org/10.48437/02.2020.K2.7000.0002.
- Schönwiese, C.-D. (2006): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler.4. Aufl. Stuttgart: Gebrüder Borntraeger.
- StAUN (2009): Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock. Regelwerk Küstenschutz M-V, Übersichtsheft. Grundlagen, Grundsätze, Standortbestimmung und Ausblick. Hg. v. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern. Schwerin.
- Thorenz, Frank (2006): Coastal Defence Strategies for Sandy Coastlines as a Building Block for Integrated Coastal Zone Management. In: Shan-Hwei Ou, Chia Chuen Kao und Tai-Wen Hsu (Hg.): Proceeding of Third Chinese-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering. Third Chinese-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering. Tainan, 8.-16.11.2006. National Cheng Kung University, Tainan. Tainan: Coastal Ocean Monitoring Center (COMC), S. 463–472.
- Thorenz, Frank (2008): Coastal Flood Defence and Coastal Protection along the North Sea Coast of Niedersachsen. In: Die Küste (74), S. 158–169.
- U. S. Army Corps of Engineers (Hg.) (2002): Coastal Engineering Manual (CEM). Washington, DC.
- Vermaas, Tommer; Boersen, Stef; Wilmink, Rinse; Lodder Quirijn (2021): National analysis of nourishments; Coastal state indicators and driving forces for Bergen-Egmond., The Netherlands, Online verfügbar unter: https://keep.eu/api/project-attachment/1449/get_file/

Abbildungsverzeichnis

| Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebiets mit den Inseln Juist und Langeoog als Farbschichthöhenmodell (Sievers et al. 2020) |
|---|
| Abbildung 2: Übersicht Borkum und Juist (Karte: Conscience Sentinel 2 2018) |
| Abbildung 3: Lage der Abschnitte und darin enthaltene Profile, Juist |
| Abbildung 4: Zeit-Weg-Diagramm von Profil 19, Juist |
| Abbildung 5: Zeit-Weg-Diagramm von Profil 53, Juist |
| Abbildung 6: Übersicht Baltrum und Westteil von Langeoog mit Lage des Seegats der Accumer Ee (Luftbild NLWKN)10 |
| Abbildung 7: Lage der Abschnitte und darin enthaltene Profile, Langeoog11 |
| Abbildung 8: Zeit-Weg-Diagramm von Profil 13, Langeoog12 |
| Abbildung 9: Zeit-Weg-Diagramm von Profil 37, Langeoog12 |
| Abbildung 10: Zeit-Weg-Diagramm von Profil 55, Langeoog13 |
| Abbildung 11: Orthofoto Langeoog 1966, 1998, 2018 |
| Abbildung 12: Beispiel von detektierten Nicht-Bodenpunkten auf Juist aus Filterung der ALS 2013 |
| Abbildung 13: Räumliche und zeitliche Verteilung von Sandfangzäunen am Dünenfuß auf der Insel Juist15 |
| Abbildung 14: Räumliche und zeitliche Verteilung von Sandfangzäunen am Dünenfuß auf der Insel Langeoog15 |
| Abbildung 15: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenniveaus auf Juist für den Zeitraum 1990-2017 für alle Daten sowie differenziert nach Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus (positiv = blau; negativ = rot) |
| Abbildung 16: Verlagerungstrend des NHN + 3 m Höhenniveaus auf Langeoog für den Zeitraum 1990-2017 für alle Daten sowie differenziert nach Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus (positiv = blau; negativ = rot) |
| Abbildung 17: Verlagerungstrend des NHN + 3 m Höhenniveaus auf Langeoog für den Zeitraum 1990-2017 für alle Datenpunkten der Abschnitte A, B und C20 |
| Abbildung 18: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei positiver Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus ermittelt über alle Inselschnitte in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Juist für den Zeitraum 1990-201722 |
| Abbildung 19: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei negativer Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus ermittelt über alle Inselschnitte in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Juist für den Zeitraum 1990-201722 |
| Abbildung 20: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei positiver Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus für die Abschnitte A (oben) und B (unten) in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Juist für den Zeitraum 1990- 2017 |
| |

| Abbildung 21: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei negativer Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus für die Abschnitte A (oben) und B (unten) in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Juist für den Zeitraum 1990- |
|---|
| 2017 |
| Abbildung 22: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei positiver Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus ermittelt über alle Inselschnitte in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Langeoog für den Zeitraum 1990-201726 |
| Abbildung 23: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei negativer Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus ermittelt über alle Inselschnitte in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Langeoog für den Zeitraum 1990-201726 |
| Abbildung 24: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei positiver Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus für die Abschnitte A (oben), B (Mitte) und C (unten) in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Langeoog für den Zeitraum 1990-2017 |
| Abbildung 25: Verlagerungstrend der NHN + 3 m Höhenlinie bei negativer Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus für die Abschnitte A (oben), B (Mitte) und C (unten) in Abhängigkeit von Sandfangmaßnahmen, Insel Langeoog für den Zeitraum 1990-2017 |
| Abbildung 26: Erodierende Dünen am schmalen Strand im Westen von Juist |
| Abbildung 27: Anwachsende Dünen am breiten Strand auf Langeoog (Profil 50) mit einsedimentierten Sandfangzäunen |
| Abbildung 28: Ausgangsprofile mit Trockenstrandbreiten (TSB) von 40, 60, 80 und 120 m |
| Abbildung 29: Synthetische Trockenstrand- und Dünenprofile mit den jeweiligen Sandfangkörpervarianten (gleiche Farben der Geometrienumrisse der Sandfangkörper = gleiche Volumina) |
| Abbildung 30: Lage der Messstellen Pegel Huibertgat (schwarzer Punkt) und Boje Westerems Ost (roter Punkt) sowie Farbschichtdarstellung des Höhenmodells von Rottumeroog bis Langeoog (Sievers et al. 2020) |
| Abbildung 31: Seegangsverhältnisse an der Messstelle Westerems Ost für am Pegel Huibertgat eingetretene Windstauhöhen von 1,0 m (oben), 1,5 m (Mitte) und 2,0 m (unten), Zeitraum 2007-2016 |
| Abbildung 32: Wasserstandsganglinie der Sturmflut vom 9.11.2007 an der Messstation Huibertgat |
| Abbildung 33: Seegangsparameter der Sturmflut vom 9.11.2007 an der Messstation Westems Ost |
| Abbildung 34: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100a für Profil TSB_040 sowie variierte Sandfangvolumina42 |

| Abbildung 35: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100a für Profil TSB_060 sowie variierte Sandfangvolumina43 |
|---|
| Abbildung 36: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100a für Profil TSB_080 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 37: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100a für Profil TSB_120 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 38: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100b für Profil TSB_040 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 39: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100b für Profil TSB_060 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 40: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100b für Profil TSB_080 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 41: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K100b für Profil TSB_120 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 42: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150a für Profil TSB_040 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 43: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150a für Profil TSB_060 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 44: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150a für Profil TSB_080 sowie variierte Sandfangvolumina |

| Abbildung 45: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150a für Profil TSB_120 sowie variierte Sandfangvolumina |
|---|
| Abbildung 46: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150b für Profil TSB_040 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 47: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150b für Profil TSB_060 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 48: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150b für Profil TSB_080 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 49: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K150b für Profil TSB_120 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 50: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K200b für Profil TSB_040 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 51: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K200b für Profil TSB_060 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 52: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K200b für Profil TSB_080 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 53: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der konstanten hydrodynamischen Belastungen des Szenarios K200b für Profil TSB_120 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 54: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der hydro-dynamischen Belastungen des Szenarios "reale Sturmflut" für Profil TSB_040 sowie variierte Sandfangvolumina |

| Abbildung 55: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der hydro-dynamischen Belastungen des Szenarios "reale Sturmflut" für Profil TSB_060 sowie variierte Sandfangvolumina |
|---|
| Abbildung 56: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der hydro-dynamischen Belastungen des Szenarios "reale Sturmflut" für Profil TSB_080 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 57: Dünenrückgang der Hauptdüne auf NHN + 11 m sowie Erosionsvolumen am Sandfangkörper und dem Dünenkörper in Abhängigkeit von der Belastungsdauer der hydro-dynamischen Belastungen des Szenarios "reale Sturmflut" für Profil TSB_120 sowie variierte Sandfangvolumina |
| Abbildung 58: Sandfangzäune auf Langeoog unter Einfluss einer Sturmflaut an drei aufeinanderfolgenden Tagen mit deutlich zunehmender Erosion und Zerstörung: a) 10.02.2020 b) 11.02.2020 c) 12.02.202068 |
| Abbildung 59: Zäune der Typen A (links) und B (rechts) auf Langeoog eine Woche nach dem Bau (Mai 2020) |
| Abbildung 60: Luftbild der Versuchsfelder Norderney, 18.12.2019 |
| Abbildung 61: Luftbild der Versuchsfelder Langeoog I, 18.9.201970 |
| Abbildung 62: Luftbild der Versuchsfelder Langeoog II, 26.5.202070 |
| Abbildung 63: Versuchsfelder II auf Langeoog am 3.3.2021 im Luftbild (links) sowie die verschiedenen Feldtypen A, B, C und D (rechts) |
| Abbildung 64: Versuchsfelder auf Norderney, 8.5.2020. Die Sandfangzäune sowie die landseitige Grenze des frisch angewehten Sedimentes sind farblich hervorgehoben72 |
| Abbildung 65: Windrose für den Zeitraum 1.7.2019-31.12.2021 (Deutscher Wetterdienst). |
| Abbildung 66: Abbruchkante an den Versuchsfeldern Langeoog, 19.2.2020 |
| Abbildung 67: Stationsbezogene Geländeoberkante in Metern über NHN ober- und unterhalb der Abbruchkante in der Mitte der Versuchsfelder auf Langeoog am 19.02.2020 |
| Abbildung 68: Versuchsfelder auf Langeoog am 28.10.2021 |
| Abbildung 69: Versuchsfelder auf Norderney am 25.1.202274 |
| |

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1 In der Analyse verwendete Referenzprofile auf den Inseln Juist und Langeoogsowie deren Zuordnung zu den betrachteten Strandabschnitten.16
- Tabelle 2 Variablennamen der logarithmischen Regressionsfunktion im Allgemeinen
(mittlere Spalte) und in dieser Anwendung (rechte Spalte).17
- Tabelle 3 Werte der Korrelationsfunktion gemäß Gl. 1 und Tabelle 2 als Näherung für
die mittlere Dünenfußentwicklung in Abhängigkeit der Strandbreite sowie die
dazugehörigen Korrelationskoeffizienten gemäß Gl. 2 für unterschiedliche Ver-
lagerungsrichtungen des MThw-Höhenniveaus (positiv = seewärts; negativ =
inselwärts).20
- Tabelle 4 Werte der Korrelationsfunktion gemäß Gl. 1 als Näherung für die mittlere Dünenfußentwicklung in Abhängigkeit der Strandbreite sowie die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten gemäß Gl. 2 für Strände unterschiedlicher Verlagerungsrichtung des MThw-Höhenniveaus (positiv = seewärts; negativ = inselwärts) sowie Fallunterscheidung zum Einsatz von Sandfangzäunen auf Juist. 25
- Tabelle 5 Werte der Korrelationsfunktion gemäß Gl. 1 als Näherung für die mittlere Dünenfußentwicklung in Abhängigkeit der Strandbreite sowie die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten gemäß Gl. 2 für Strände unterschiedlicher Verlagerungsrichtungen des MThw-Höhenniveaus sowie Fallunterscheidung zum Einsatz von Sandfangzäunen auf Langeoog.
- Tabelle 6 Übersicht der verwendeten Werte sowie der Bezeichnung der Szenarien mit
konstanten hydrodynamischen Belastungen.40