

Einfluss von Sandfangzaunkonfigurationen auf das Wachstum des Dünenfußes

Christiane Kreyenschulte, Mariana Vélez Pérez und Holger Schüttrumpf

RWTH Aachen University, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft,

christiane.kreyenschulte@web.de ORCID ID 0000-0002-4005-1975

mariana.velez@rwth-aachen.de ORCID ID 0009-0006-7751-3236

schuettrumpf@inww.rwth-aachen.de ORCID ID 0000-0002-0104-0499

Zusammenfassung

Sandfangzäune aus lokal verfügbarem Buschmaterial stellen eine naturnahe Küstenschutzmaßnahme dar, die das Wachstum des Dünenfußes unterstützen können. Durch die Installation von Sandfangzäunen in der Nähe des seeseitigen Dünenfußes wird die Geschwindigkeit des auflandigen Windes verringert, so dass sich die äolisch transportierten Sedimente an den einzelnen Buschreihen eines Sandfangzauns ansammeln können. Dadurch wird ein zusätzlicher Sedimentpuffer geschaffen, der die Energie von einlaufenden Wellen dämpfen oder lokale Defizite des Sedimentbudgets ausgleichen kann. Gegenwärtig beruht der Bau von Sandfangzäunen größtenteils auf Erfahrungswerten, da nur wenige wissenschaftliche Studien ihre Effektivität, ihr optimales Design, die Anordnung der einzelnen Reissiglinien sowie ihre relative Position im Strandprofil zur Sedimentakkumulation untersucht haben. Jedoch sind für die Wiederherstellung und die Instandhaltung von Stranddünen systemen detaillierte Kenntnisse über die Wechselwirkung zwischen dem Stranddünen system und den Sandfangzäunen erforderlich, um effektive Sandfangzäune entlang ausgedehnter Küstenabschnitte zu gewährleisten.

Daher wurden Langzeituntersuchungen zum Dünenfußwachstums an Abschnitten mit und ohne Sandfangzäunen auf den ostfriesischen Inseln Langeoog und Norderney durchgeführt. Die untersuchten Sandfangzäune bestanden aus lokal vorhandenem Reissigmaterial und unterschieden sich in ihrem Alter seit Installation, ihrer Porosität und ihrer Anordnung von parallel und orthogonal zu den Küstendünen ausgerichteten Buschreihen. Mithilfe von wiederholten unbemannten Drohnenflügen von März 2020 bis Mai 2021 konnten aus den Drohnenaufnahmen via digitaler Photogrammetrie digitale Höhenmodelle erstellt werden. So konnten die Volumenänderungen um verschiedene Sandfangzaunkonfigurationen über die Zeit ausgewertet werden. Es zeigte sich, dass die vorherrschenden Randbedingungen wie die vorhandene Topographie, die Sedimentzufuhr, die Porosität des Zauns, die Höhe der herausragenden Äste und die Anordnung der Reissiglinien die Effektivität Sediment zu akkumulieren, maßgeblich beeinflussten. Die Wachstumsrate des Dünenfußes war unmittelbar nach dem Bau eines neuen Sandfangzauns signifikant und nahm mit der Zeit ab. Sandfangzäune mit geringerer Porosität begünstigten ein lokales Wachstum direkt an den Buschreihen, während Zäune mit höherer Porosität eine Sedimentakkumulation weiter windabwärts begünstigten.

Schlagwörter

Sandfangzäune, Nature-based Solutions, Wachstum des Dünenfußes, Äolischer Sedimenttransport

Summary

Sand trapping fences made of locally available brushwood are a widely used nature-based solution to initiate and facilitate the establishment of the dune toe. By installing sand trapping fences close to the seaward dune toe, the incoming onshore wind velocity is reduced so that windblown sediment can accumulate at the individual brushwood lines downwind. Thereby, an additional sediment buffer is created and the developed sediment buffer can attenuate incoming wave energy or rebalance local deficits in sediment budgets. At present, the construction of sand trapping fences is mainly based on empirical knowledge since only a few scientific studies investigate their efficiency, optimal design, arrangement of individual brushwood lines, and relative position in the beach-dune profile. However, the restoration and maintenance of beach-dune systems along the coast requires detailed knowledge of the interaction between the beach-dune system and the sand trapping fences to ensure effective sand trapping fences. In order to investigate the dune toe growth around different sand trapping fences' configurations, long-term field campaigns were conducted at coastal sections without and in the vicinity of sand trapping fences on the East Frisian islands Langeoog and Norderney. In the course of these campaigns, sand trapping fences made of locally available brushwood differing in their installation age, porosity, and arrangement parallel or orthogonal to the coastal dunes were monitored by repeated surveys with unmanned aerial vehicles. Digital elevation models achieved by digital photogrammetry were used for analyzing the dune toe volume changes with time. It was found that prevailing boundary conditions such as topography, sediment supply, porosity, protruding branch height, and arrangement significantly influenced the efficiency to accumulate sediment. The dune toe growth rate was significant immediately after constructing a new sand trapping fence and decreased over time. Sand trapping fences with lower porosity caused localized coastal dune toe growth directly at their brushwood lines, whereas fences with higher porosity led to sediment deposition further downwind.

Keywords

Sand trapping Fences, Nature-based solutions, Dune Toe Growth, Aeolian Sediment Transport

1 Einleitung

Küstendünen nehmen zahlreiche unterschiedliche Funktionen ein: sie sind Habitat für Flora und Fauna, haben eine hohe touristische und sozioökonomische Bedeutung und sind zudem ein integraler Bestandteil von Küstenschutzmaßnahmen. Sie schützen das tiefer liegende Hinterland bei Sturmfluten gegen Hochwasser. Der Großteil der sandigen Küstengebiete erfährt Erosion durch energetische Prozesse von Wellen, Wind und Strömungen (Hesp 2011). Es wird angenommen, dass diese Erosion aufgrund des Klimawandels und des damit verbundenen Anstiegs des Meeresspiegels sowie der Intensität und Häufigkeit von Sturmfluten weiter zunehmen wird (Harff et al. 2011, Keijzers et al. 2015, Hesp 2011). In Anbetracht der Tatsache, dass etwa 33 % der Weltbevölkerung in einem Abstand von 100 Kilometern zur Küstenlinie leben (NASA 2020), wird deutlich, wie wichtig die Wiederherstellung und die Instandhaltung von Küstendünen sind (NLWKN 2007). Aufgrund

des wachsenden Umweltbewusstseins der Bevölkerung haben Küstendünen ein vermehrtes Interesse an einem nachhaltigen Küstenschutz erfahren, insbesondere im Zusammenhang mit nature-based Solutions. So können Sandfangzäune aus lokal verfügbarem Buschmaterial eine umweltfreundliche und effektive Küstenschutzmaßnahme zur Wiederherstellung und zum Erhalt von Stranddünenystemen darstellen (Morris et al. 2018).

Durch die Installation von Sandfangzäunen in der Nähe des seeseitigen Dünenfußes wird die Geschwindigkeit des auflandigen Windes verringert, so dass sich die äolisch transportierten Sedimente an den einzelnen Buschreihen eines Sandfangzauns ansammeln können. Dadurch wird ein zusätzlicher Sedimentpuffer geschaffen, der die Energie von einlaufenden Wellen dämpft oder ein lokales Sedimentdefizit ausgleichen kann (Eichmanns et al. 2021), siehe Abbildung 1.

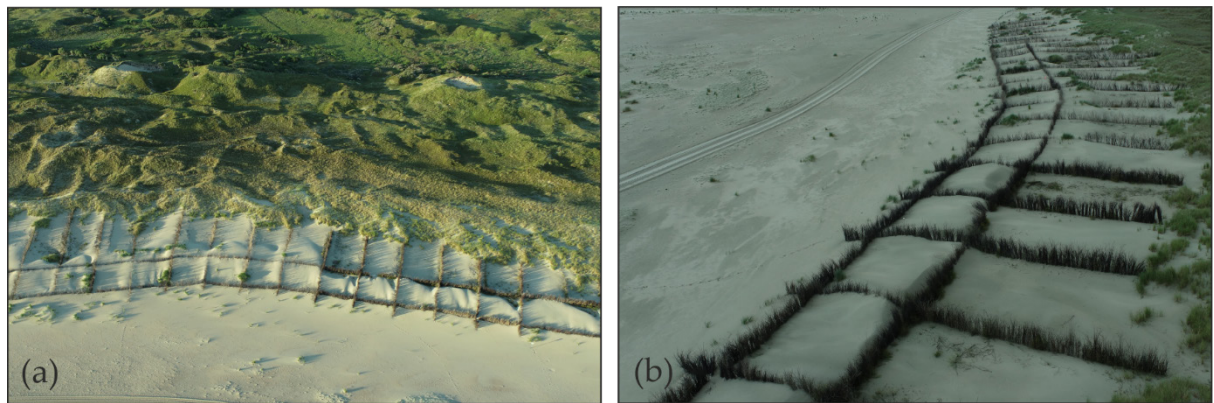


Abbildung 1: (a) Drohnenaufnahme sowie (b) Nahaufnahme vom Sandfangzaun auf Norderney vom 25.08.2020.

Der Bau von Sandfangzäunen beruht derzeit auf empirisch gewonnenen Erkenntnissen, da nur wenige wissenschaftliche Studien die Effektivität in Abhängigkeit der optimalen Gestaltung (Zaunhöhe und Zaunporosität), Anordnung der einzelnen Buschreihen sowie der relativen Position im Strandprofil untersuchen (Ruz und Anthony 2008, Anthony et al. 2007, Eichmanns und Schüttrumpf 2020, 2021, Itzkin et al. 2020). Für Küstenmanagerinnen und Küstenmanager, die Sandfangzäune zur Wiederherstellung und Erhaltung von Stranddünenystemen installieren, ist das Wissen über die Wechselwirkung zwischen äolischem Sedimenttransport, Sandfangzäunen und Stranddünenystem jedoch entscheidend, um effektive Sandfangzäune zu gewährleisten. Um diese Wissenslücken zu schließen und die Wirksamkeit von Sandfangzäunen, die sich in der Zaunporosität, der Zaunhöhe und der Anordnung der einzelnen Reisiglinien unterscheiden, quantitativ bewerten zu können, wurden im Rahmen des BMBF-Forschungsprojekts ProDune (FKZ: 03KIS125) sowohl Kurzzeit- als auch Langzeit-Messkampagnen in-situ als auch physikalische Modellversuche in der wasserbaulichen Versuchshalle des IWW durchgeführt, vgl. Abbildung 2.



Abbildung 2: Aufbau des Projekts ProDune seitens IWW.

Zunächst müssen die Unterschiede zwischen dem durch Sandfangzäune beeinflussten äolischen Sedimenttransport und den natürlichen Bedingungen an der Küste verstanden werden (in-situ Untersuchung I). Dazu wurde ein Kurzzeit-Feldexperiment auf der ostfriesischen Insel Langeoog durchgeführt, bei dem Windgeschwindigkeit, Windrichtung, vertikale Sedimentprofile, äolische Sedimenttransportraten und Feuchtigkeitsgehalte am Strand, Dünenfuß, Dünenkrone und Sandfangzaun gemessen wurden. Weiter wurde am Strand, Dünenfuß und am Sandfangzaun untersucht, inwieweit empirische Modelle zur Vorhersage der äolischen Sedimenttransportraten herangezogen werden können, siehe Eichmanns und Schüttrumpf (2020).

Zur Untersuchung des Dünenfußwachstums im Bereich unterschiedlicher Sandfangzaunkonfigurationen wurden auf den ostfriesischen Inseln Langeoog und Norderney auch Langzeitmessungen mithilfe von wiederholten unbemannten Drohnenflügen durchgeführt (in-situ Untersuchung II). Die installierten Sandfangzäune unterschieden sich in ihrem Alter seit Installation, ihrer Porosität und ihrer Anordnung parallel oder orthogonal zu den Küstendünen. Weiter wurde die Trendentwicklung des Dünenfußes grob anhand von potentiellen Sedimenttransportraten, die über die stündlichen meteorologischen Daten integriert wurden, abgeschätzt, siehe Eichmanns und Schüttrumpf (2021).

Im Anschluss an die Feldkampagnen wurden Windkanaluntersuchungen durchgeführt, um die Sedimentakkumulation um einen Sandfangzaun unter Berücksichtigung der wichtigsten Einflussfaktoren, Zaunhöhe und Zaunporosität, zu untersuchen. Im Vergleich zu den Feldexperimenten boten die Windkanaluntersuchungen die Möglichkeit, den Einfluss spezifischer Zauneigenschaften unter konstanten Randbedingungen zu untersuchen, siehe Eichmanns und Schüttrumpf (2022).

Das Ziel des vorliegenden Küste-Teilbeitrags ist es, einen Teil der Ergebnisse der Untersuchungen des Dünenfußwachstums im Bereich unterschiedlicher Sandfangzaunkonfigurationen auf Langeoog und Norderney (in-situ Untersuchungen II) zusammenfassend darzustellen, siehe auch Eichmanns und Schüttrumpf (2021).

Ein Großteil der dargestellten Ergebnisse wurde bereits in Eichmanns et al. (2021), Eichmanns und Schüttrumpf (2020, 2021, 2022) und Eichmanns (2022) veröffentlicht. Die entsprechenden Ergebnisse wurden unter den Allgemeinen Geschäftsbedingungen der Creative Commons Lizenz veröffentlicht (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

2 Untersuchungsgebiete Langeoog und Norderney

Die in-situ Untersuchungen fanden auf den ostfriesischen Inseln Langeoog und Norderney von Mai 2020 bis März 2021 statt, siehe Abbildung 3. Diese erstrecken sich über eine Gesamtlänge von ca. 90 km. Dabei sind die Inseln durch sechs Gezeitenbuchten voneinander getrennt. Zwischen den Barriereinseln und dem Festland (Entfernung ~3–20 km) liegen ausgedehnte Wattflächen (NLWKN 2010).

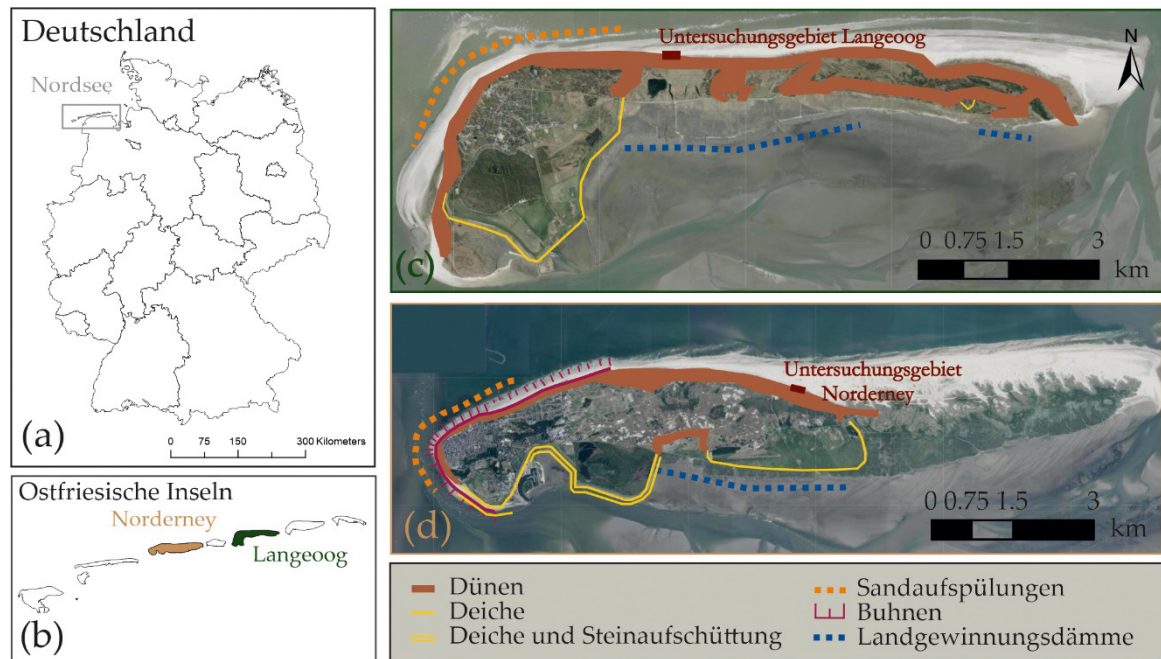


Abbildung 3: (a) Lage der Ostfriesischen Inseln entlang der deutschen Nordseeküste, (b) Darstellung der Ostfriesischen Inseln, (c) Untersuchungsgebiet Langeoog und (d) Norderney. Veröfentlichtung mit Genehmigung von © GeoBasis-DE/ BKG, 2021 (BKG), Daten basierend auf NLWKN (2010), Eichmanns und Schüttrumpf (2021). Diese Abbildung ist eine open-access Abbildung veröffentlicht unter den Allgemeinen Geschäftsbedingungen der Creative Commons Attribution Lizenz (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Die ostfriesische Insel Langeoog ist ~20 km² groß, und ihre Morphologie besteht im Allgemeinen aus einem natürlichen Sandstrand, gefolgt von Dünenlandschaften. Die Dünen sind teilweise mit dem Europäischen Strandhafer (*Ammophila arenaria*) bewachsen (Eichmanns und Schüttrumpf 2020, NLWKN 2010). Die Insel verfügt über eine 5,5 km lange Deichlinie (gelbe Linie) im Südwesten und eine 0,3 km lange Deichlinie (gelbe Linie) im Südosten, während Küstendünen (braune Bereiche) auf einer Länge von ~20,3 km die Küstenlinie von der Südwestseite der Insel nach Norden und Osten schützen. Im Nordwesten der Insel werden bei Bedarf Sandaufspülungen durchgeführt (orange gestrichelte Linie). Das Untersuchungsgebiet Langeoog befindet sich nördlich der Insel in unmittelbarer Nähe des Dünenfußes. Der entsprechende Strandabschnitt besteht aus Quarzsand mit einer mittleren Korngröße von $d_{50} = 218 \mu\text{m}$ und besitzt eine relativ starke Neigung von $m \sim 1:50$ (Eichmanns und Schüttrumpf 2020). Die Strandbreite W [m], angegeben als der Abstand zwischen einem definierten Wasserstand (Mittelwert des Hochwasserpegels MHW oder Mittelwert des Niedrigwasserpegels MNW) und dem Dünenfuß ($\xi = +3 \text{ mNHN}$ (Ladage 2002)), schwankte während des Untersuchungszeitraums zwischen ~300 m bei MNW = -1,3 mNHN und ~70 m bei MHW = +1,4 mNHN (BSH

2019, 2020). Während des Untersuchungszeitraums war die trockene Strandbreite immer $W > 50$ m. Im Juli 2020 wurden im Pirolatal auf der Insel Langeoog, 1,5 km westlich des Untersuchungsgebietes, Sandaufspülungen mit einem Sandvolumen von $V = 700.000 \text{ m}^3$ durchgeführt.

Norderney ist mit einer Fläche von $\sim 26 \text{ km}^2$ die zweitgrößte ostfriesische Insel. Sie besitzt Küstendünen (braune Flächen), die sich über $\sim 12,1$ km von der Südwestseite der Insel nach Norden zur Inselmitte hin erstrecken. Die Küstendünen sind teilweise auch mit *Ammophila arenaria* bewachsen. Die Strandneigung auf Norderney ist mit $m \sim 1:200$ deutlich flacher als auf Langeoog. Die Küstenlinie ist im Süden auf über ~ 10 km durch Küstendeiche (gelbe Linie) geschützt. Zusätzlich wird die Deichlinie teilweise durch Deckwerke (gelbe Doppellinie) und massive Buhnen (lila Linie) geschützt. Im Nordwesten der Insel werden bei Bedarf Sandaufspülungen vorgenommen (orange gestrichelte Linie) (NLWKN 2010). Das Untersuchungsgebiet Norderney liegt ebenfalls im Norden der Insel am Dünenfuß und wies über den Untersuchungszeitraum eine trockene Strandbreite von $W \sim 320$ m auf (MHW = $+1,2 \text{ mNHN}$ (BSH 2019, 2020). Bei Niedrigwasser (MNW = $-1,3 \text{ mNHN}$) stieg die Strandbreite bis auf $W \sim 550$ m an. In der Vergangenheit errichtete Sandfangzäune umgeben das Untersuchungsgebiet (NLWKN 2010).

Der Anstieg des Meeresspiegels im Holozän, das reichliche Vorhandensein von Sedimenten, großflächige Aufschüttungen und Sturmfluten haben wesentlich zur Entwicklung und Form dieser Barriereinseln beigetragen (Reise 2005, Oost et al. 2012). Bisher hat der in unregelmäßigen Zeiträumen von Jahrzehnten stattfindende Küstenlängstransport der intertidalen Sandbänke im Küstenvorland von West nach Ost durch Gezeiten, Strömungen, Wellenbelastungen und Sturmfluten den Sedimenthaushalt der Ostfriesischen Inseln erheblich verändert und zu einem zeitweiligen Sandangebot oder -defizit für diese Inseln geführt (EAK 2020, NLWKN 2010, Oost 2012).

Die Ostfriesischen Inseln können als mesotidiale Barriereinseln mit halbtägigen Gezeiten und einem Tidenhub von etwa $TR \sim 2,5$ m (Norderney, Riffgat) bis zu $TR \sim 2,7$ m (Langeoog, Hafeneinfahrt) eingestuft werden (BSH 2020, Hayes 1979, Thorenz 2008). Bei ansteigender Tide füllen sich die Tidebecken, bei abnehmender Tide werden sie wieder geleert (Niemeyer 1995). Die einlaufenden Wellen kommen überwiegend aus den Richtungen Nordwest und Südwest wobei die nordwestliche Komponente der Wellen auf die Untersuchungsgebiete Langeoog und Norderney trifft (BAW et al. 2020).

Während der gesamten Messkampagne von Mai 2020 bis März 2021 wurde von dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH 2021) keine Sturmflut gemessen, die den Dünenfuß erreichte. Dies deutet darauf hin, dass die Veränderung des Düenvolumens maßgeblich durch äolische Prozesse und Sandfang verursacht wurde.

Für die vorherrschenden Windbedingungen auf den beiden Inseln Langeoog und Norderney werden die Messdaten des Deutschen Wetterdienstes von den Wetterstationen Norderney und Spiekeroog (DWD 2019) herangezogen. Abbildung 4 (a) zeigt die stündlich gemittelten Winddaten an der Wetterstation Norderney in einer Höhe von 11 m über dem Boden und (b) Spiekeroog in einer Höhe von 14 m über dem Boden. Die Winddaten vom 01. Mai 2020 bis 31. März 2021 sind als Windrosen dargestellt. Während des gemessenen Zeitraums wurde eine signifikante Südwestkomponente des Windes mit Windgeschwindigkeiten von bis zu $\sim 20 \text{ m/s}$ und hauptsächlich schräg ablandigen Windverhältnissen in Bezug auf die Küstenlinie aufgezeichnet. Der schräg auflandige Wind trat weniger häufig auf, erreichte aber im Durchschnitt höhere Windgeschwindigkeiten (DWD 2019). Die starken

Südwestwinde haben an beiden Untersuchungsstandorten nur geringe Auswirkungen auf den lokalen Wasserstand, während die selteneren, aber starken Nordwestwinde eine längere Fetchlänge haben und lokal zu höheren Wasserständen führen können.

Beide Wetterstationen liefern ähnliche Ergebnisse, wobei auf Spiekeroog tendenziell immer höhere Windgeschwindigkeiten gemessen werden als auf Norderney. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das nahe gelegene Stadtgebiet die Windgeschwindigkeiten der Wetterstation auf Norderney dämpft.

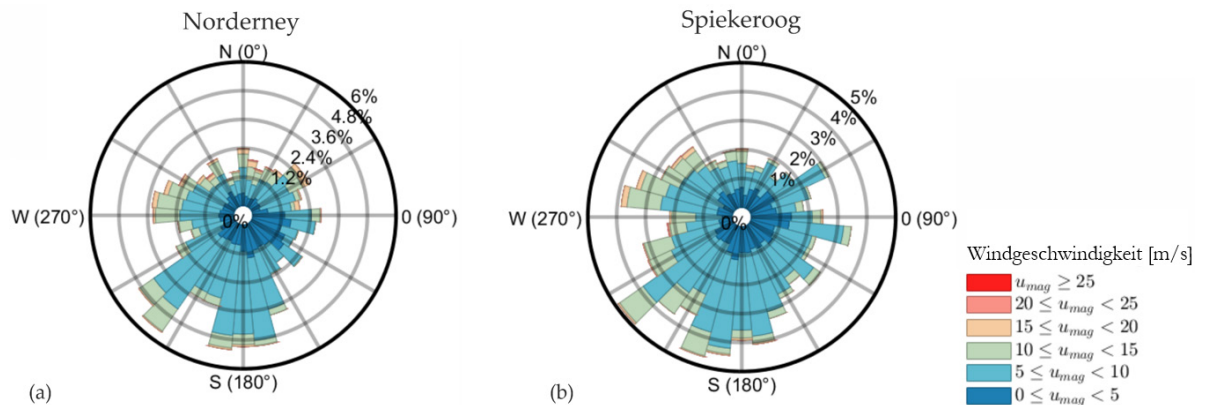


Abbildung 4. Stündlich gemittelte Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen an den Wetterstationen (a) Norderney und (b) Spiekeroog vom 01. Mai 2020 bis 31. März 2021 (Winddaten aus (DWD 2019)). Diese Abbildung ist ein open-access Abbildung veröffentlicht unter den Allgemeinen Geschäftsbedingungen der Creative Commons Attribution Lizenz (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

2.1 Sandfangzäune

Sandfangzäune auf den Ostfriesischen Inseln werden in der Regel nach Ende der Sturmflutsaison und vor Beginn der touristischen Hauptsaison durch den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) errichtet. Die Sandfangzäune auf Norderney und Langeoog wurden im Juli 2019 bzw. Mai 2020 in der Nähe des Dünenfußes installiert. Viele Teilnehmende beteiligten sich am Bau des Sandfangzauns auf Norderney. Daher ist der auf Norderney installierte Sandfangzaun weniger homogen als der Sandfangzaun auf Langeoog, der von wenigen aber erfahrenen Mitarbeitenden des NLWKN (2020) errichtet worden ist. Die Sandfangzäune bestehen aus lokal verfügbaren Reisigbündeln, welche parallel und orthogonal zu den Dünen ca. 0,5 m in den Sand eingegraben wurden. Die Äste ragten anschließend ca. 1,8 m aus dem Boden heraus.

2.1.1 Langeoog

Abbildung 5 zeigt eine Drohnenaufnahme des untersuchten Sandfangzauns auf Langeoog, welcher im Mai 2020 errichtet wurde. Der Sandfangzaun erstreckt sich über eine Länge von etwa 120 m und weist vier verschiedene Konfigurationen auf. Die Konfigurationen 1–4 unterscheiden sich durch die Anordnung der parallelen und orthogonalen Buschreihen zu den Küstendünen und die Anzahl an Buschreihen pro laufendem Meter n [bb/m].

Die roten Polygone grenzen die einzelnen Felder 1–12, West und Ost ein. Ein grünes Polygon zeigt das Referenzfeld (~ 40 m östlich von Feld 12), in dem die Sedimentablagerung nicht durch den Sandfangzaun beeinflusst wurden. Das Referenzfeld wurde so gewählt, dass annähernd die gleichen Windbedingungen, Position im Strandprofil, Topographie sowie Vegetationsbedeckung vorlagen. Wichtig war es, dass die kritische Fetchlänge bei östlicher Windlage überschritten wurde, aber dennoch nahezu gleiche Bedingungen wie in den Sandfangzäunen vorlagen. Somit wird nachfolgend angenommen, dass das Referenzfeld belastbare Rückschlüsse auf die Sedimentakkumulationen ohne Sandfangzaun im Vergleich zu den Feldern mit Sandfangzaun liefern. In den einzelnen Feldern (Konfig. 1–4) des Sandfangzauns waren stellenweise *Ammophila arenaria* mit unterschiedlichen Höhen (mittleren Höhe von etwa 0,5 m) und Unregelmäßigkeiten in der Topographie zu finden. Die Vegetation bedeckte maximal 3,0 % des Untersuchungsgebiets.

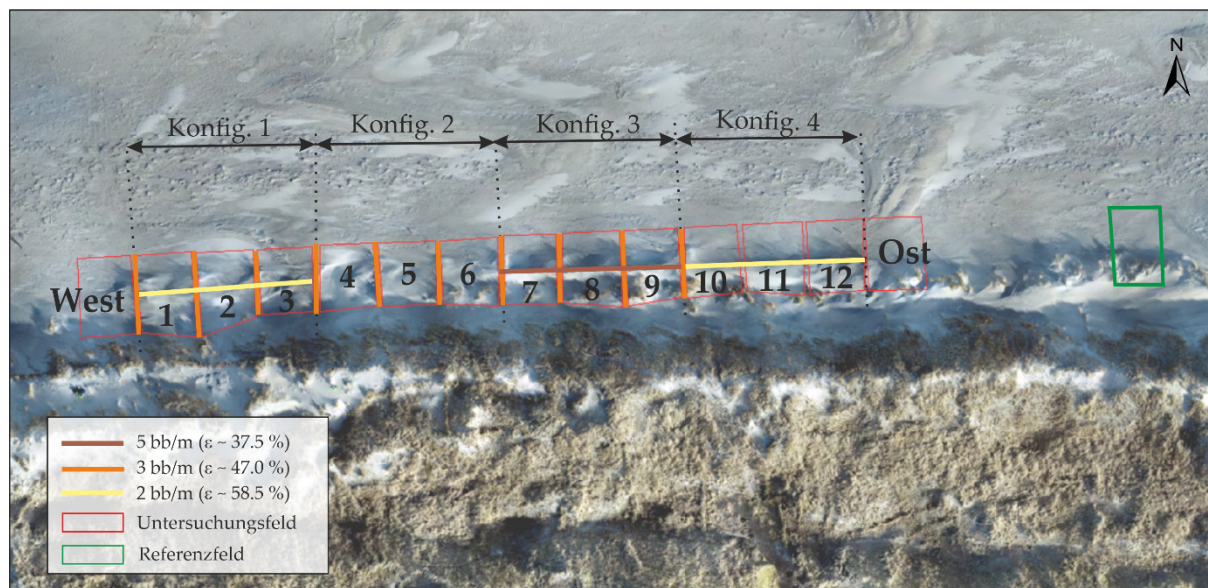


Abbildung 5: Luftaufnahme des Sandfangzauns auf Langeoog mit vier verschiedenen Konfigurationen, die sich durch die Anordnung der Buschreihen parallel und orthogonal zu der Küstendüne sowie durch die Anzahl der Reisigbündel pro laufendem Meter n [bb/m] bzw. ihre Porosität ε [%] unterscheiden. Die roten Polygone begrenzen die Felder West, Ost, 1–12 und ein grünes Polygon das Referenzfeld (verändert nach Eichmanns und Schüttrumpf (2021)). Diese Abbildung ist eine open-access Abbildung veröffentlicht unter den Allgemeinen Geschäftsbedingungen der Creative Commons Attribution Lizenz (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

2.1.2 Norderney

Abbildung 6 zeigt eine Drohnenaufnahme des Sandfangzauns auf Norderney, welcher bereits im Juli 2019 errichtet worden ist. Die roten Polygone grenzen die einzelnen Felder 1–22, West und Ost ab. Ein Referenzfeld, das sich ~ 75 m östlich von Feld 22 befindet, ist in grün dargestellt. Die gewonnenen Daten aus dem Referenzfeld werden ebenfalls als repräsentativ für die natürliche Sedimentakkumulation ohne Sandfangzaun angenommen.

Der Sandfangzaun erstreckt sich über insgesamt ~ 240 m. Die Konfigurationen 1*, 2*, 3* und 4* entsprechen im Allgemeinen den Konfigurationen auf Langeoog, besitzen jedoch unterschiedliche Feldgrößen. Darüber hinaus ist die Anordnung der Konfigurationen unterschiedlich: Konfiguration 3*, Konfiguration 1*, Konfiguration 4* und Konfiguration 2* folgen aufeinander (von West nach Ost). Bei Winden aus West oder Ost haben die

äußeren Felder ein potentiell höheres Sedimentangebot, da der Sedimenttransport in den inneren Feldern durch die Reisigbündel abgeschwächt wird, was zu einem potentiell geringeren Sedimentangebot führt. Zwischen den einzelnen Reisigbündeln wurden nur kleine Bereiche mit *Ammophila arenaria*, hauptsächlich in Konfig. 4* und Konfig 2*, identifiziert. Die Gesamtbedeckung der Fläche mit Vegetation betrug an diesem Untersuchungsgebiet maximal 3,5 %.

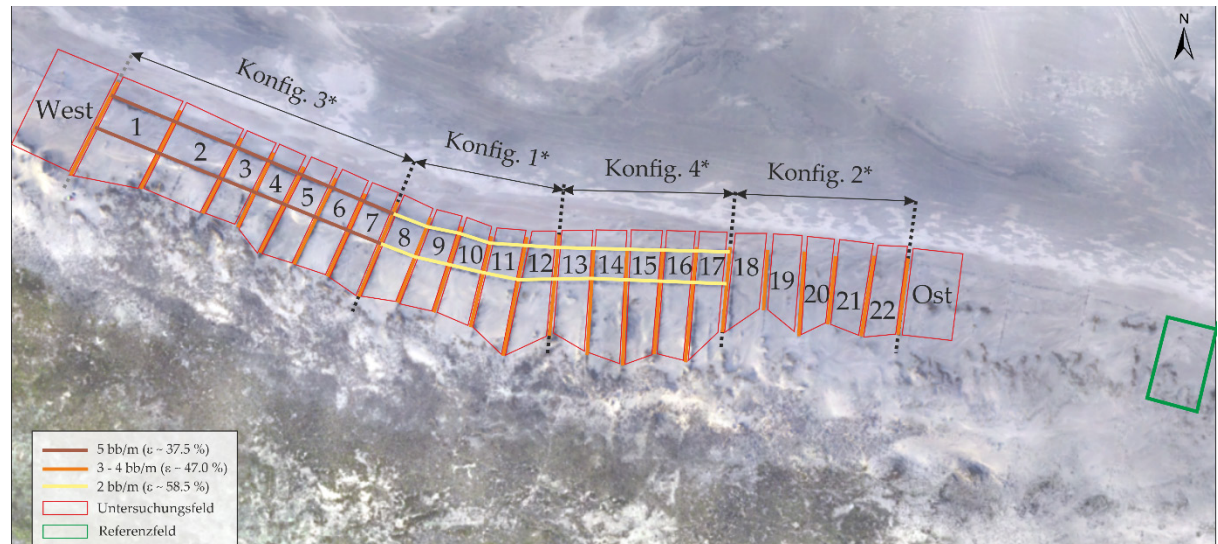


Abbildung 6: Luftaufnahme des Sandfangzauns auf Norderney mit vier verschiedenen Konfigurationen, die sich durch die Anordnung der Buschreihen parallel und orthogonal zu der Küstendüne sowie durch die Anzahl der Reisigbündel pro laufendem Meter n [bb/m] bzw. ihre Porosität ε [%] unterscheiden. Die roten Polygone begrenzen die Felder West, Ost, 1–22 und ein grünes Polygon das Referenzfeld (verändert nach Eichmanns und Schüttrumpf (2021)). Diese Abbildung ist eine open-access Abbildung veröffentlicht unter den Allgemeinen Geschäftsbedingungen der Creative Commons Attribution Lizenz (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

2.2 Porosität der Sandfangzäune

In diesem Abschnitt werden neben der Anzahl der verwendeten Reisigbündel pro laufendem Meter n [bb/m] die Porosität der installierten Sandfangzäune dokumentiert. Die Methodik zur Ermittlung der Porosität wird beschrieben und die ermittelten Werte in Tabelle 1 gegeben.

Die Ermittlung der unterschiedlichen Porositäten ist für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse notwendig, da der Einbau der Sandfangzäune unterschiedlich ausgeführt wurde und zudem unterschiedliches Reisigmaterial verwendet wurde, siehe Kapitel 2.1.1 und Kapitel 2.1.2. In Abbildung 7 sind Ausschnitte mit einer Abmessung von 45 cm x 45 cm des Sandfangzauns auf Norderney mit (a) einer niedrigen Porosität mit 5 bb/m, (b) einer mittleren Porosität mit 3–4 bb/m und (c) einer hohen Porosität mit 2 bb/m dargestellt.



Abbildung 7: (a) Ausschnitt des Sandfangzauns auf Norderney mit 5 bb/m, (b) 3–4 bb/m und (c) 2 bb/m (verändert nach Eichmanns und Schüttrumpf (2021)). Diese Abbildung ist eine open-access Abbildung veröffentlicht unter den Allgemeinen Geschäftsbedingungen der Creative Commons Attribution Lizenz (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Die zweidimensionale Porosität der Sandfangzäune wurde als Verhältnis von offener zu gesamter Oberfläche bestimmt. Dazu wurden die Fotos mit der MATLAB 2018 (R2018b, version 9.510.944444) Color Thresholder Application verarbeitet. Die von den Reisigmateriale überdeckten Bereiche wurden identifiziert und mit einem gewählten Grenzwert schwarz eingefärbt. Der Kontrast zum Hintergrund wurde erhöht und weiß eingefärbt, um das Buschmaterial von dem Hintergrund eindeutig abzugrenzen. Die Porosität der verschiedenen Sandfangzaunkonfigurationen variierte aufgrund der ungleichmäßigen Beschaffenheit der Äste leicht über die Höhe. Die Reisigbündel unterscheiden sich in den Merkmalen der Äste, wie beispielsweise dem Astdurchmesser ($d \sim 5\text{--}40\text{ mm}$). Derzeit ist den Autoren nicht bekannt, dass der Astdurchmesser einen signifikanten Einfluss auf die Sedimentablagerung um den Sandfangzaun hat. Die Porosität des Zauns wurde in der wissenschaftlichen Forschung als signifikanter Einfluss für die Sedimentablagerung identifiziert (z. B. Miri et al. 2019, Arens et al. 2001, Li und Sherman 2015, Yu et al. 2020, Zhang et al. 2010).

In Tabelle 1 sind die Eigenschaften der untersuchten Sandfangzäune zusammengefasst, bestehend aus dem Datum der Errichtung des Sandfangzauns, den Konfigurationstypen, der Anzahl der zu den Dünen parallelen Buschreihen k [-], der Gesamtlänge der parallel L_1 [m] und orthogonal L_2 [m] angeordneten Buschreihen, der Anzahl der verwendeten Reisigbündel für die parallel n [bb/m] und orthogonal i [bb/m] zu den Küstendünen angeordneten Buschreihen, der Abschnitt des Sandfangzauns (unterer oder oberer Teil), der durchschnittlichen Porositäten für die parallel ε_n [%] und orthogonal ε_i [%] angeordneten Buschreihen und der durchschnittlichen Porositäten für jede Konfiguration $\bar{\varepsilon}$ [%].

Es ist zu beachten, dass die Fotoaufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden. Mit der Zeit konnte sich immer mehr Sand an den Buschreihen anlagern. Daher zeigen die später aufgenommenen Fotoaufnahmen mehr vom oberen Teil des Sandfangzauns, wo die Porosität höher war, als die früher aufgenommenen Fotos, die mehr vom unteren Teil des Sandfangzauns zeigen, wo die Porosität geringer war.

Grundsätzlich ist ersichtlich, dass mit zunehmender Anzahl von Reisigbündeln pro laufenden Meter die Porosität abnimmt. Auffällig ist der Unterschied zwischen den ermittelten Porositäten des Sandfangzauns auf Langeoog und Norderney bei gleicher Konfiguration. Eine Ursache könnte sein, dass die Sandfangzäune von unterschiedlichen Personen installiert wurden, wie in Kapitel 2 beschrieben. Außerdem wurden unterschiedliche Arten von

Reisigbündeln verwendet. Die Vielfalt der Reisigbündel macht es schwierig, Sandfangzäune mit nahezu identischen Eigenschaften zu errichten. Dies verdeutlicht die Relevanz der Bestimmung der Porosität der Sandfangzäune als Maß für die Durchlässigkeit zu verwenden, anstatt der Reisigbündel pro laufenden Meter, um ihre Effektivität einheitlich zu interpretieren.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Merkmale der Sandfangzäune auf Langeoog und Norderney (verändert nach Eichmanns und Schüttrumpf (2021)).

Untersuchungsstandort	Konfig.-typ	k [-]	$L_1 + L_2$ [m]	n [bb/m]	i [bb/m]	Datum des Fotos und Ausschnitt	ϵ_n [%]	ϵ_i [%]	$\bar{\epsilon}$ [%]
Langeoog, Mai 2020	1	1	30+24	~2	~3	26.05.2020* unten	33	24	29
	4		30+15	~2	~3	26.05.2020* unten	33	24	30
	2		0+24	~3	~3	14.03.2020 oben	-	24	24
	3		30+24	~5	~3	26.05.2020* unten	12	24	17
Norderney, Juli 2020	1*		100+96	~2	~3-4	10.03.2021 oben	61	51	
						01.08.2019* unten	49	43	51
						Durchschnitt	55	47	
	4*	2	100+81	~2	~3-4	10.03.2021 oben	74	51	
						01.08.2019* unten	50	43	55
						Durschnitt	62	47	
	2*		0+93	~3-4	~3-4	10.03.2021 oben		51	
						01.08.2019* unten	-	43	47
						Durchschnitt		47	
	3*		180+12 8	~5	~3-4	10.03.2021 oben	42	51	
						01.08.2019* unten	33	43	41
						Durschnitt	37,5	47	

* Fotos vom Projektpartner NLKWN

3 Materialien und Methoden

3.1 Versuchsaufbau sowie Datenverarbeitung

Ein unbemanntes Fluggerät (UAV, Hersteller DJI Phantom 4 mit Echtzeit-Kinematik Funktion) wurde verwendet, um digitale Höhenmodelle (DGM) der untersuchten Sandfangzäune auf Langeoog und Norderney zu erhalten. Die UAV-Drohnenbefliegungen wurden auf Langeoog vom 20. Mai 2020 bis 12. März 2021 und auf Norderney vom 24. August 2020 bis 09. März 2021 durchgeführt. Die Wetterbedingungen waren unterschiedlich, von sonnig und windstill bis stürmisch und bewölkt. Zwei Flugpläne auf Norderney und vier

Flugpläne auf Langeoog mit unterschiedlichen Flughöhen zwischen 20 m und 100 m (Abstand über den Küstendünen) wurden mit der DJI Pilot App durchgeführt. Die Kamera nahm Fotoaufnahmen mit 70 bis 80 % Überlappung auf. Die Fluggeschwindigkeit wurde niedrig gehalten und variierte um eine Durchschnittsgeschwindigkeit von ~ 4 m/s. Die UAV-Aufnahmen wurden mit Agisoft LLC (2018) (Version 1.6.5; 64 bit) und der Structure from Motion Technik bearbeitet, um digitale Höhenmodelle zu erhalten. Das genaue Vorgehen kann Eichmanns und Schüttrumpf (2021) entnommen werden.

Die von der Drohne aufgenommenen Fotoaufnahmen mit Positionsbestimmung durch RTK erreichten eine Genauigkeit von $1\text{ cm} + 1\text{ parts-per-million (ppm)}$ für den Abstand zwischen Rover und Basis in horizontaler Richtung und $1,5\text{ cm} + 1\text{ ppm}$ für den Abstand zwischen Rover und Basis in vertikaler Richtung (DJI Phantom 4 RTK). Die genauen Positionen von vier Referenzpunkten wurden zusätzlich mit einem globalen Navigationssatellitensystem JAVAD GNSS Receiver SigmaD mit der gleichen Genauigkeit wie die der Drohne horizontal und vertikal erfasst (Javad 2020). Die Differenz in x -, y - und z -Richtung zwischen den Markern im DGM und den eingemessenen Referenzpunkten ergab für den Untersuchungsstandort Langeoog mittlere Abstände von $\Delta x = 0,023\text{ m}$, $\Delta y = 0,032\text{ m}$ und $\Delta z = 0,059\text{ m}$. Auf Norderney flog das UAV in größeren Höhen, was zu mittleren Abständen von $\Delta x = 0,051\text{ m}$, $\Delta y = 0,047\text{ m}$ und $\Delta z = 0,085\text{ m}$ führte.

3.2 Auswertung des Dünenfußwachstums

Das Dünensystem kann in fünf horizontale Bereiche unterteilt werden: (1) Boden, (2) Vorland, (3) Gezeitenzone, (4) Trockener Strand und (5) Dünen mit (6) Sandfangzaun, siehe Abbildung 8. Der Dünenfuß trennt den trockenen Strand (4) von den Dünen (5). Der Dünenfuß auf den Ostfriesischen Inseln ist bei $z = +3\text{ mNHN}$ definiert (Ladage 2002). Im Folgenden wurde das Dünenvolumen (7) als das Sandvolumen oberhalb einer festen horizontalen Ebene in z -Richtung und einer vertikalen Grenze in x -Richtung (etwa $\sim 3\text{ m}$ seeseitig von den orthogonalen Abweisern des Sandfangzauns) definiert. Außerdem wurde die horizontale z -Ebene so gewählt, dass sie sich mindestens auf Höhe des Dünenfußes und gleichzeitig $\sim 3\text{ m}$ seeseitig von den Abweisern des Sandfangzauns befindet. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Sandfangzäune das Untersuchungsgebiet am Dünenfuß direkt beeinflussten. Nachfolgend wird das Dünenvolumen in Abhängigkeit von den gewählten Begrenzungsebenen definiert und repräsentiert nicht das gesamte Küstendünenvolumen.

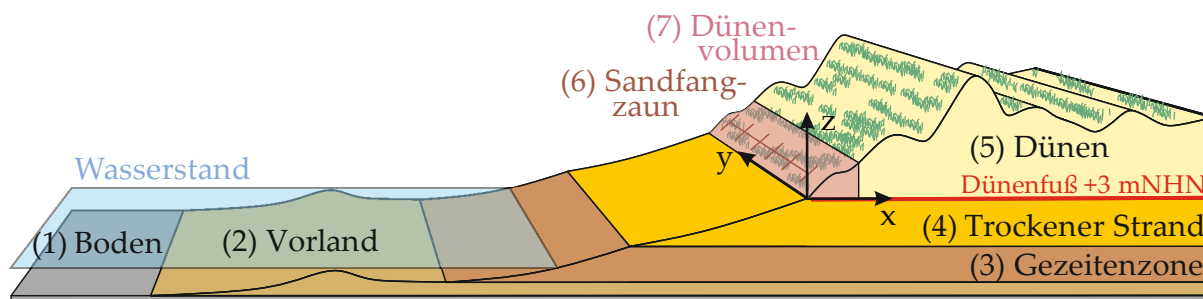


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Stranddünensystems mit Definition des Dünenvolumens (verändert nach Eichmanns und Schüttrumpf (2021), Strypsteen (2019)). Diese Abbildung ist eine open-access Abbildung veröffentlicht unter den Allgemeinen Geschäftsbedingungen der Creative Commons Attribution Lizenz (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Neben der Berechnung des Dünenvolumens um den Sandfangzaun wurde auch das Dünenvolumen zwischen den orthogonal angeordneten Buschreihen für jedes Feld einzeln ermittelt. Dadurch ist ein Vergleich der verschiedenen Konfigurationen untereinander möglich, siehe auch Abbildung 5 und Abbildung 6. Die Dünenvolumina zu verschiedenen Zeitpunkten wurden mit ESRI ArcGIS Desktop (2017) (Version 10.5.1; 64 bit) berechnet. Das genaue Vorgehen kann Eichmanns und Schüttrumpf (2021) entnommen werden.

4 Ergebnisse und Diskussion

Die Fläche mit *Ammophila arenaria* zur Gesamtfläche des Untersuchungsgebiet wurde mithilfe von ESRI ArcGIS Desktop (2017) bestimmt. Anhand der Orthofotos konnte die Vegetation identifiziert und ihr Flächenanteil bestimmt werden. Während des Untersuchungszeitraums schwankte die Vegetationsbedeckung zwischen 0,8 % und 3,0 % (Langeoog) bzw. zwischen 1,2 % und 3,5 % (Norderney). Wie in der Literatur allgemein bekannt, hat die Vegetation einen erheblichen Einfluss auf die Sedimentakkumulation in Küstengebieten, indem sie die Oberflächenrauigkeit erhöht, was die Sedimentablagerung und die beginnende Dünenbildung fördert (Adriani und Terwindt 1974, Hacker et al. 2012, Keijsers et al. 2015). Da die Vegetationsfläche an beiden Untersuchungsstandorten lokal begrenzt war, nehmen die Autoren an, dass der Einfluss durch Vegetation im Vergleich zu dem Einfluss durch den Sandfangzauns auf die Sedimentakkumulation nur gering ist.

Eine weitere Unsicherheit bei der Diskussion der Ergebnisse ist die natürliche Dünenentwicklung von Küstendünen, die die Sedimentakkumulation aufgrund des installierten Sandfangzauns überlagern kann (Houser et al. 2015).

4.1 Auswertung der digitalen Höhenmodelle

Nachfolgend werden die digitalen Oberflächenmodelle über den Untersuchungszeitraum ausgewertet. Hierzu ist in Abbildung 9 der Unterschied der Sedimentakkumulationen im Vorher-Nachhervergleich vom 20. Mai 2020 zum 12. März 2021 um den Sandfangzaun auf Langeoog dargestellt. Erosionsgebiete sind in blauer Farbe dargestellt, während Sedimentationsgebiete in roter Farbe gezeigt werden. Die Bereiche, in denen die Höhenänderung kleiner als die Messunsicherheit (~ 10 cm) ist, sind in weiß dargestellt. Im Anhang können die digitalen Geländemodelle für Langeoog für Höhen von 3 mNHN bis 8 mNHN am 20. Mai 2020, 15. Juni 2020, 27. August 2020, 26. Oktober 2020, 14. Dezember 2020 und 12. März 2021 eingesehen werden.

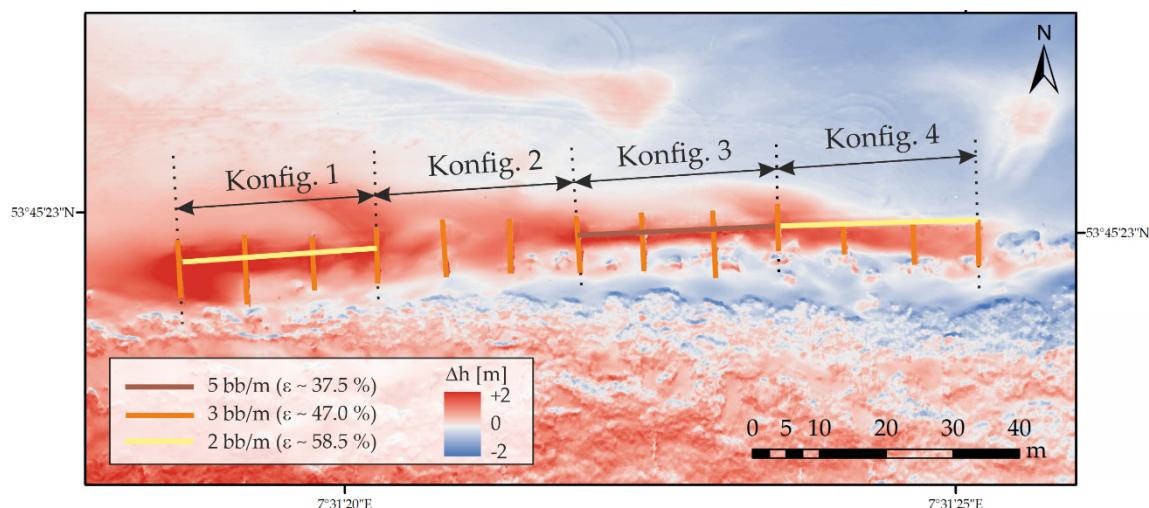


Abbildung 9: Aus dem DGM des Untersuchungsgebiets Langeoog abgeleitete Höhenunterschiede zwischen dem 20. Mai 2020 und dem 12. März 2021 (verändert nach Eichmanns und Schüttrumpf (2021)). Diese Abbildung ist eine open-access Abbildung veröffentlicht unter den Allgemeinen Geschäftsbedingungen der Creative Commons Attribution Lizenz (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich an den einzelnen Reisigzweigen des Sandfangzauns besonders viel Sediment angesammelt hat. Große Bereiche des Strandes bzw. in der Nähe des Dünenfußes sind im Laufe der Zeit gewachsen. Während des Untersuchungszeitraums haben sich Sedimentakkumulationen bis zu $\Delta h_{max} = +1,75$ m und Erosionsbereiche am Strand und zwischen dem Sandfangzaun und den Dünen ($\Delta h_{min} = -1,25$ m) ergeben. Die verschiedenen Konfigurationen haben jeweils unterschiedliche Wachstumsraten erfahren:

- Konfiguration 1: In den ersten drei westlich gelegenen Feldern hat sich über den gesamten Zeitraum eine durchschnittliche Sedimentmenge von $\Delta V / A_{konfig.1} \sim +0,71 \text{ m}^3/\text{m}^2$ angesammelt. Die Menge des angesammelten Sediments ist im Vergleich zum Mittelwert aller Konfigurationen ($\Delta V / A_{konfig.1-4} \sim +0,63 \text{ m}^3/\text{m}^2$) um 13 % höher. Das erste, nach Westen ausgerichtete Feld hat mit $\Delta V / A_{Feld1} \sim +0,80 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\Delta h_{Feld1} = +1,75$ m) die größte Sedimentmenge angelagert. Im Laufe der Zeit hat sich das Sediment sowohl an den parallelen und orthogonalen Buschreihen als auch küstennah an den Abweisern des Sandfangzauns angesammelt. Somit hat sich der Dünenfuß in Richtung Norden verschoben.
- Bei Konfiguration 2 kam es nur zu einer mäßigen Anhäufung von Sediment ($\Delta h_{konfig.2} = +1,39$ m), die zwischen den orthogonal angeordneten Buschreihen und nördlich des Sandfangzauns auftrat. Über den Untersuchungszeitraum hat sich eine durchschnittliche Sedimentmenge von $\Delta V / A_{konfig.2} = +0,60 \text{ m}^3/\text{m}^2$ angesammelt.
- Konfiguration 3: Überwiegend hat sich das Sediment an den parallelen Buschreihen und an den landseitigen Abweisern angesammelt. Südlich der parallelen Buschreihen in Richtung der Dünen gab es kaum Ablagerungen. Hier gibt es Bereiche der Erosion. Diese Konfiguration verzeichnete über den gesamten Untersuchungszeitraum den geringsten Zuwachs mit einem Sandvolumen von $\Delta V / A_{konfig.3} = +0,56 \text{ m}^3/\text{m}^2$ und einer Höhe von bis zu $\Delta h_{konfig.3} = +1,42$ m.
- Für Konfiguration 4 konnte ein umfangreiches Wachstum der Felder an den orthogonal angeordneten Buschreihen festgestellt werden, mit Höhen bis zu $\Delta h_{konfig.4} = +1,25$ m.

Das Sandvolumen auf der Leeseite wuchs stärker als das Dünenvolumen auf der Luvseite. Die Konfiguration hat die zweitgrößte Wachstumsrate mit einem kumulierten Sandvolumen von $\Delta V/A_{\text{Konfig.4}} = +0,66 \text{ m}^3/\text{m}^2$ erfahren. Es gibt ausgedehnte Erosionsbereiche am Strand und der Dünenfuß hat sich nicht wesentlich verschoben.

- Referenzfeld: Im Vergleich zu den Sedimentakkumulationen um die Konfigurationen hat sich im Referenzfeld lediglich $\Delta V/A_{\text{Referenz}} = +0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ Sediment angesammelt. Dies könnte auf die natürliche Dünenentwicklung zurückzuführen sein.

Generell ist festzustellen, dass die Sandfangzäune einen positiven Einfluss auf das Dünenfußwachstum haben. Das Niveau des Dünenfußes verschob sich mindestens um +0,3 m und maximal um +3,9 m in Richtung Norden. Die Konfigurationen haben unter den gegebenen Randbedingungen unterschiedlich Sediment akkumuliert.

Abbildung 10 zeigt entsprechend die Sedimentations- und Erosionsbereiche auf Norderney im Vergleich vom 24. August 2020 zum 09. März 2021. Der Untersuchungszeitraum beginnt somit etwa ein Jahr nach Errichtung des Sandfangzauns, sodass sich bereits Sediment um den Zaun angelagert hatte. Das Niveau des Dünenfußes verschob sich in Richtung Norden, mindestens um +0,2 m und maximal um +2,9 m. Im Anhang können die digitalen Geländemodelle für Norderney für Höhen von 3 mNHN bis 8 mNHN am 24. August 2020, 12. Dezember 2020 und 9. März 2021 eingesehen werden.

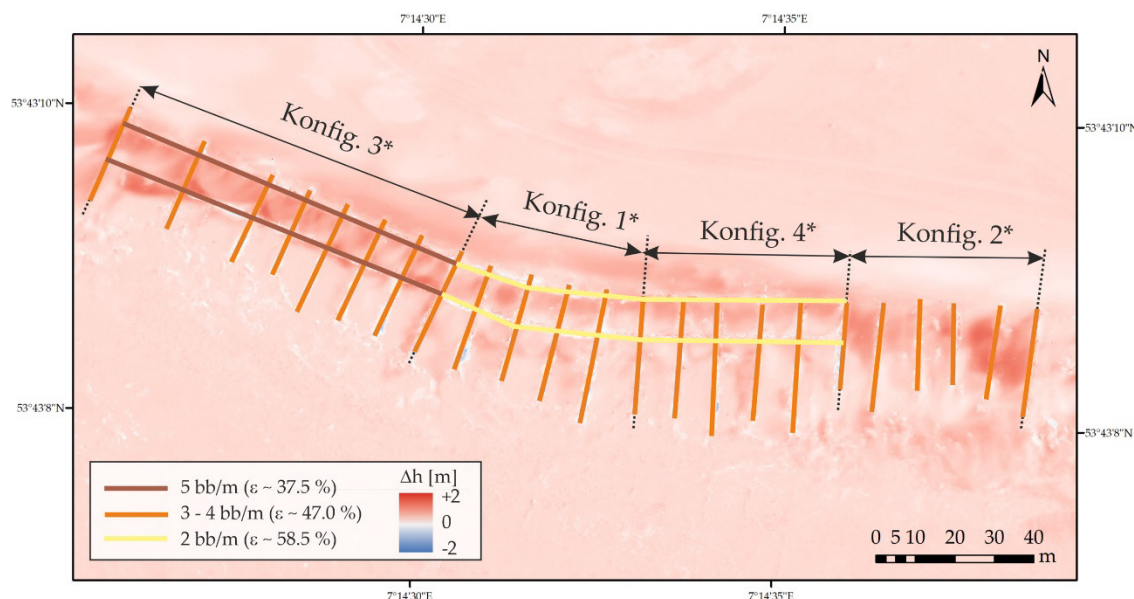


Abbildung 10: Aus dem DGM des Untersuchungsgebiets Norderney abgeleitete Höhenunterschiede zwischen dem 24. August 2020 und dem 09. März 2021 (verändert nach Eichmanns und Schüttrumpf (2021)). Diese Abbildung ist eine open-access Abbildung veröffentlicht unter den Allgemeinen Geschäftsbedingungen der Creative Commons Attribution Lizenz (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Während des Untersuchungszeitraums stieg die Geländehöhe um etwa $\Delta h_{\text{max}} = +1,20 \text{ m}$. Nur kleine Bereiche direkt entlang der Reisigzweige an der Küste zeigen Erosionsbereiche. Die verschiedenen Konfigurationen haben die folgenden Tendenzen gezeigt:

- Konfiguration 3*: Die Fläche nördlich des Sandfangzauns sowie zwischen den beiden parallelen Buschreihen ist deutlich in die Höhe gewachsen. Der nach Westen exponierte

Bereich wies eine erhöhte Sedimentakkumulation auf. Der Zuwachs für Konfiguration 3* war im Allgemeinen sehr homogen mit Sedimentakkumulationen bis zu $\Delta h_{\text{konfig.3}^*} = +1,16$ m. Über den Untersuchungszeitraum hat sich ein Sedimentvolumen von $\Delta V/A_{\text{konfig.3}^*} = +0,18$ m³/m² angesammelt.

- Konfiguration 1* verzeichnete mit $\Delta V/A_{\text{konfig.1}^*} = +0,04$ m³/m² die geringste Sedimentvolumenänderung auf. Sowohl die land- als auch seeseitigen Felder haben sich im Laufe der Zeit sehr ähnlich entwickelt. Der Dünenfuß hat sich deutlich verstärkt.
- Konfiguration 4*: Über den gesamten Untersuchungszeitraum hat sich eine Sandmenge von $\Delta V/A_{\text{konfig.4}^*} = +0,09$ m³/m² angesammelt. Die Entwicklung der Felder entspricht weitgehend der Entwicklung der Konfiguration 1*, während der Dünenfuß weniger stark gewachsen ist.
- In Konfiguration 2* hat sich über den Messzeitraum eine Sedimentmenge von $\Delta V/A_{\text{konfig.2}^*} = +0,27$ m³/m² angesammelt. Der Dünenfuß ist nur geringfügig gewachsen. Die Felder zwischen den orthogonalen Buschreihen haben gleichmäßig Sediment akkumuliert, wobei die nach Osten exponierten Felder mit $\Delta h_{\text{konfig.3}^*} = +1,20$ m die stärkste Sedimentzunahme verzeichneten.
- Referenzfeld: Im Referenzfeld hat sich $\Delta V/A_{\text{Referenz}^*} = +0,03$ m³/m² Sediment angesammelt.

Generell haben sich auf Norderney die Konfigurationen 1*, 2* und 4* ähnlich entwickelt, wobei Konfiguration 3* (westlich exponiert) am meisten Sediment akkumuliert hat.

Zusammenfassend lässt sich für Norderney feststellen, dass die parallelen Buschreihen mit geringer Porosität lokal vermehrt Sediment angelagert haben, wohingegen die durchlässigeren Buschreihen weiter windabwärts Sediment angelagert haben, dafür geringer in Höhe.

4.2 Auswertung der Querprofile

Abbildung 11 stellt die Veränderungen der Querprofile am Dünenfuß auf Langeoog über den Untersuchungszeitraum dar. Je nach Konfigurationen ergeben sich unterschiedliche durchschnittliche Porositäten, vgl. Kapitel 2.2. Für jede Konfiguration ist ein repräsentatives Querprofil in der Mitte eines Feldes dargestellt. Die Höhen sowie Längen sind über ihre Maximalwerte normiert. Für die Konfigurationen 1, 2, 3 sind die parallel zur Küste verlaufenden Buschreihen bei etwa der Hälfte des Abstands zu erkennen. Bei Konfiguration 2 gibt es keine orthogonalen Buschreihen und bei Konfiguration 4 keine Abweiser.

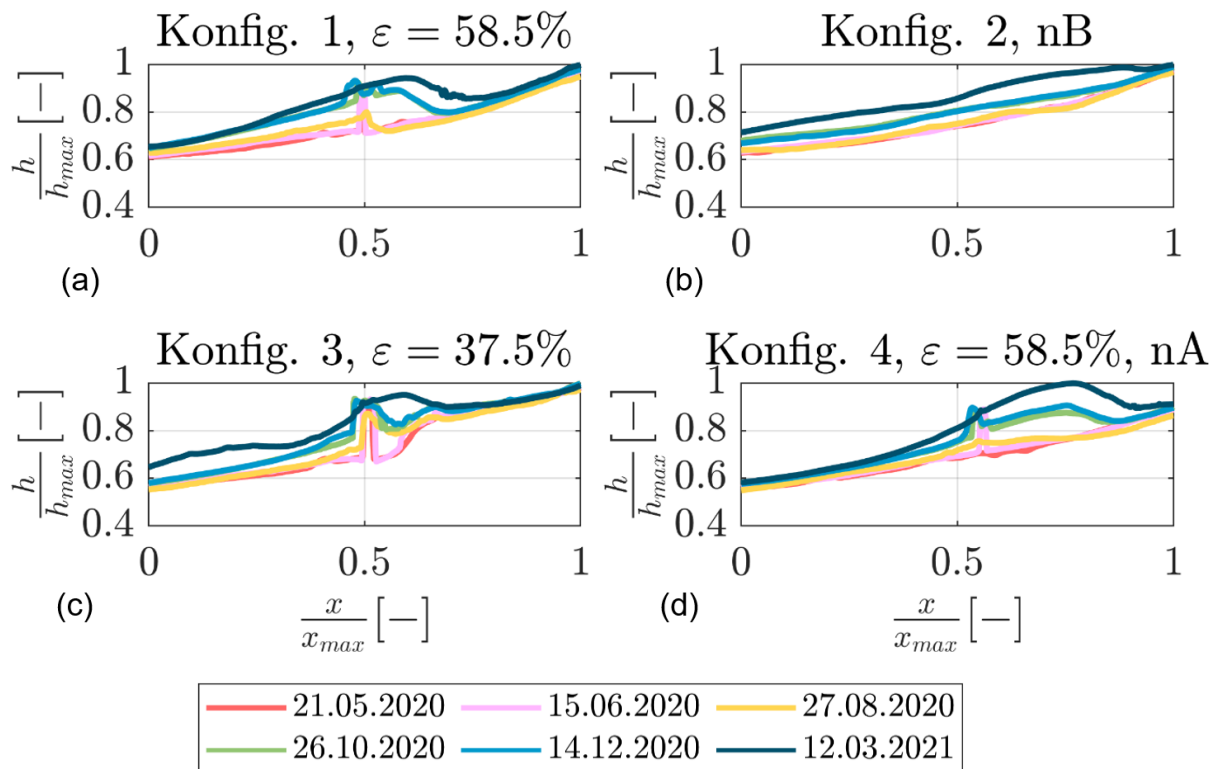


Abbildung 11: Querprofile in der Nähe des Dünenfußes in Abhängigkeit der Konfigurationen: (a) Konfiguration 1, (b) Konfiguration 2, (c) Konfiguration 3 und (d) Konfiguration 4 am Untersuchungsstandort Langeoog über den Messzeitraum vom 21.05.2020 bis zum 12.03.2021 (nB = keine orthogonale Buschreihe; nA = keine Abweiser) (verändert nach Eichmanns und Schüttrumpf (2021)).

Konfiguration 2 (ohne parallele Buschreihe) zeigte ein relativ kontinuierliches Höhenwachstum im Querprofil. Die Konfigurationen 1 und 3 zeigten ein sehr ähnliches Wachstum, wobei die Konfiguration 1 im Vergleich zur Konfiguration 3 eine vermehrte Sedimentakkumulation im Lee aufwies. Konfiguration 4 zeigte vor allem ein Wachstum in Richtung der Dünen.

In Abbildung 12 sind die Querprofile in der Nähe des Dünenfußes entsprechend für den Untersuchungsstandort Norderney dargestellt.

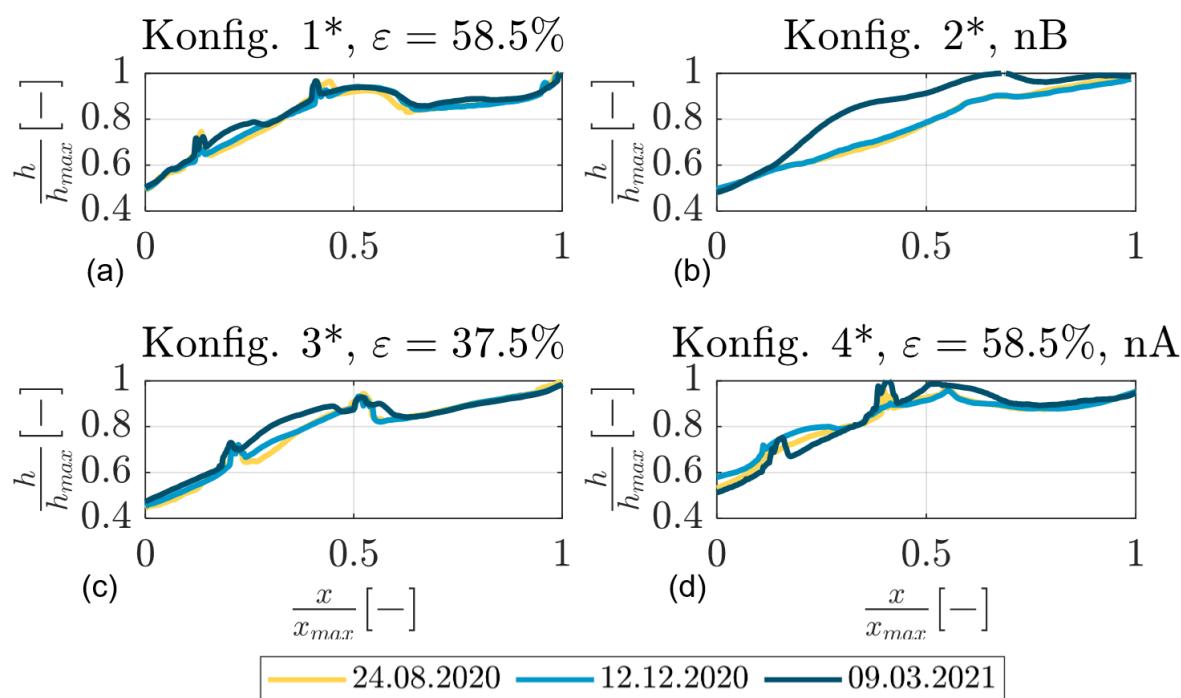


Abbildung 12: Querprofile in der Nähe des Dünenfußes in Abhängigkeit der Konfigurationen: (a) Konfiguration 1*, (b) Konfiguration 2*, (c) Konfiguration 3* und (d) Konfiguration 4* am Untersuchungsstandort Norderney über den Messzeitraum vom 24.08.2020 bis zum 09.03.2021 (nB = keine orthogonale Buschreihe; nA = keine Abweiser) (verändert nach Eichmanns und Schüttrumpf (2021)).

Bei der Konfiguration 2* (ohne parallele Buschreihen) erfolgte das Wachstum ähnlich der natürlichen Dünenform. Die Konfigurationen 1*, 3* und 4* zeigten ein sehr ähnliches Dünenwachstum. Zunächst wurden die zum Strand ausgerichteten Felder mit Sand gefüllt, bevor sich das Sedimentpolster zu den Dünen ausweitete. Die Konfiguration 4*, ohne orthogonal angeordnete Abweiser am Dünenfuß, zeigt im Vergleich zu den anderen Konfigurationen einen geringeren Anstieg des Volumens am Dünenfuß.

Auch hier lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Buschreihen mit geringeren Porositäten ein lokales Wachstum direkt an den Buschreihen begünstigten, während Buschreihen mit höherer Porosität eine Sedimentakkumulation weiter windabwärts begünstigten. Zudem haben die orthogonalen Abweiser das Wachstum des Dünenfußes begünstigt.

4.3 Auswertung der Volumenänderungen

In Abbildung 13 sind die Volumina der Sedimentakkumulationen pro Quadratmeter $\Delta V/A$ [m³/m²] über 197 Tage auf Langeoog (dunkle Farben) und Norderney (helle Farben) dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf den gleichen Untersuchungszeitraum von August 2020 bis März 2021 (197 Tage). Auf der x-Achse in Abbildung 13 (a) sind die durchschnittlichen Porositäten $\bar{\varepsilon}$ [%] von parallelen und orthogonalen Buschreihen dargestellt, während in Abbildung 13 (b) die x-Achse die Konfiguration zeigt. Die nach außen exponierten Felder wiesen eine besonders große Sedimentakkumulation auf, was höchstwahrscheinlich auf die erhöhte Zufuhr von Sediment im Vergleich zu den anderen Feldern zurückzuführen ist, vgl. hierzu auch Abbildung 4.

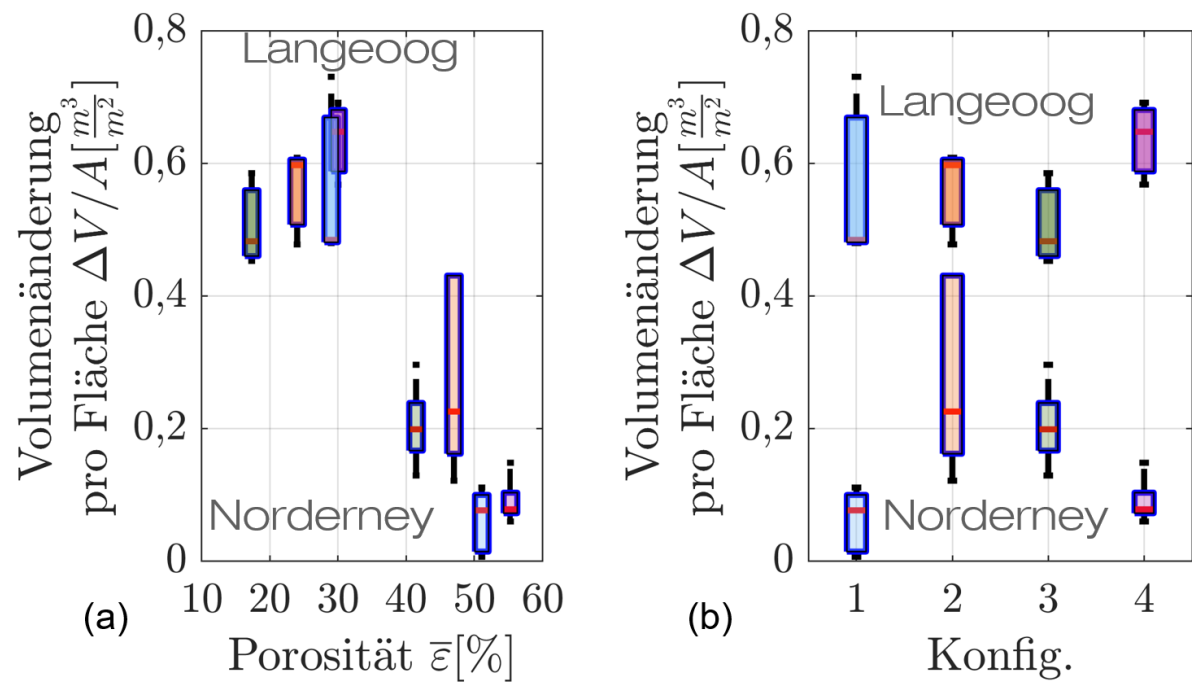


Abbildung 13: Veränderungen des Sedimentvolumens pro Quadratmeter von August 2020 bis März 2021 (197 Tage) bei verschiedenen Sandfangkonfigurationen auf Langeoog (dunklere Farben) und Norderney (hellere Farben) in Abhängigkeit der (a) durchschnittlichen Porosität $\bar{\epsilon}$ [%] und der (b) Konfiguration 1 (blau), Konfiguration 2 (orange), Konfiguration 3 (grün) und Konfiguration 4 (lila) (verändert nach Eichmanns und Schüttrumpf (2021)).

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Konfigurationen 1–4 ein größeres Dünenwachstum als die Konfigurationen 1*–4* erfahren haben. Norderney zeigt deutlich geringere Veränderungen des Sedimentvolumens im Vergleich zu Langeoog. Es liegt nahe, dass das Wachstum unmittelbar nach der Fertigstellung eines neuen Sandfangzauns, wie auf Langeoog, besonders hoch war. Hier ragten die Äste hoch aus dem Sand heraus und in Bodennähe lag eine geringe Porosität vor. Mit der Zeit hatte sich bereits mehr Sand an den Reisigbündeln angesammelt, so dass nur noch der obere Teil des Sandfangzauns mit einer höheren Porosität herausragte. Dadurch verlangsamte sich die Wachstumsrate.

In Abbildung 13 (b), sind die Veränderungen des Sandvolumens über die verschiedenen Konfigurationen aufgetragen, was zeigt, dass eine ähnliche Konfiguration auf Langeoog zu einem anderen Ergebnis auf Norderney führte. Dies deutet darauf hin, dass die vorherrschenden Randbedingungen wie Sedimentzufuhr oder das Alter des installierten Sandfangzauns (Höhe und Porosität der verbleibenden Äste) einen starken Einfluss auf die Wirksamkeit der verschiedenen Konfigurationen haben.

Bei der Auswertung der Sedimentvolumenänderungen der verschiedenen Konfigurationen auf Norderney und Langeoog müssen die unterschiedlichen Anfangs- und Randbedingungen berücksichtigt werden. Daher sind die Ergebnisse der beiden Untersuchungsstandorte nicht direkt miteinander vergleichbar. Die Konfigurationen sind je nach Untersuchungsgebiet unterschiedlich zueinander angeordnet und die Küstenlinien sind unterschiedlich nach Norden ausgerichtet, was zu unterschiedlichen auflandigen und ablandigen Windbedingungen führen kann (vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6). Darüber hinaus unterschieden sich die Dünenprofile signifikant voneinander (vgl. Abbildung 11 und Abbildung 12) sowie die dazugehörigen Strandabschnitte in Neigung als auch Breite, vgl.

Kapitel 2. Weiter sind die untersuchten Sandfangzäune auf Norderney von älteren Sandfangzäunen umgeben, während auf Langeoog der nächste Sandfangzaun mehrere hundert Meter entfernt ist. Wie bereits erwähnt, wurde der Sandfangzaun auf Norderney bereits im Juli 2019 errichtet, wohingegen der Sandfangzaun auf Langeoog erst im Mai 2020 installiert worden ist, sodass das starke Dünenwachstum zu Beginn auf Norderney nicht in den Messergebnissen enthalten ist. Dies erklärt die geringere Wachstumsrate auf Norderney im Untersuchungszeitraum.

Außerdem konnten die verschiedenen Konfigurationen der Sandfangzäune nicht getrennt voneinander untersucht werden. Jede Konfiguration beeinflusste die andere Konfiguration. Da die Hauptwindrichtung während der Feldkampagne West war und somit der Küstenlängstransport dominierte, hatten die westlich exponierten Felder die größte Sedimentzufuhr und ein positiver Lee-Effekt für die weiteren Felder wird angenommen. Unter idealen Versuchsbedingungen wäre es daher sinnvoll, jede Konfiguration separat mit einem Mindestabstand, der größer ist als die kritische Fetch-Länge, zu untersuchen. Somit würde sichergestellt werden, dass die spezifischen Unterschiede durch die jeweilige Konfiguration selbst verursacht wird und für alle Zaunkonfigurationen eine exponierte Westwindlage mit nahezu gleicher Sedimentzufuhr gewährleistet wird. Diese Versuchsanordnung der Sandfangzäune war jedoch nicht durchführbar, da die Sandfangzäune nicht nur für die durchgeführten Versuche, sondern auch für die Instandhaltung des Strand-Dünen-Systems installiert wurden und die Ausdehnung des Gebiets für die Installation von Sandfangzäunen begrenzt war.

Außerdem wird die Wirksamkeit des Sandfangzauns durch unabhängige morphologische Ereignisse wie bspw. die natürliche Wanderung von Dünenrücken beeinflusst. Anhand der DGM auf Langeoog ist bspw. zu erkennen, dass ebenfalls Erosion am Strand stattfand. Dies kann zu potentiell geringeren Sedimentveränderungen in der Nähe des Erosionsbereichs des Strands geführt haben, vgl. Abbildung 9.

Strandaufspülungen vergrößern in der Regel die Strandbreite und damit auch die Fetchlänge zudem wird die vorherrschende Kornzusammensetzung verändert. Die äolische Sedimenttransportrate hängt u. a. von der Korngröße und der Menge der Muschelfragmente ab (van der Wal 1998). Dies bedeutet, dass z. B. gröbere Körner zu einer potenziell niedrigeren Sedimenttransportrate führen können. Allerdings dürfte der Einfluss von den Sandaufspülungen gering sein, da die Fetchlänge während des Messzeitraums immer größer war als die kritische Fetchlänge.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Untersuchung des Dünenfußwachstums im Bereich unterschiedlicher Sandfangzaunkonfigurationen wurden auf den ostfriesischen Inseln Langeoog und Norderney Langzeitmessungen durchgeführt. Dabei wurden Sandfangzäune aus lokal verfügbarem Reisig, die sich in ihrem Alter seit Installation, ihrer Porosität und ihrer Anordnung parallel oder orthogonal zu den Küstendünen unterschieden, mithilfe von wiederholten unbemannten Drohnenflügen untersucht. Digitale Höhenmodelle, die mithilfe der digitalen Photogrammetrie erstellt wurden, ermöglichten die Analyse der Veränderungen des Dünenvolumens im Laufe der Zeit. Es zeigte sich, dass die vorherrschenden Randbedingungen wie Alter, Topographie, Sedimentzufuhr, Porosität, Höhe der herausragenden Äste und die Anordnung der Reisiglinien die Effektivität Sediment zu akkumulieren, maßgeblich beeinflussten.

Das Wachstum des Dünenfußes war unmittelbar nach dem Bau eines neuen Sandfangzauns signifikant und nahm mit der Zeit ab. Sandfangzäune mit geringerer Porosität begünstigten ein lokales Wachstum direkt an den Buschreihen, während Zäune mit höherer Porosität eine Sedimentakkumulation weiter windabwärts begünstigten.

Die Ergebnisse sind für Empfehlungen zur Gestaltung und Anordnung der Sandfangzäunen von großer Bedeutung. Es fehlt jedoch noch ein umfangreicher Datensatz über langfristige in-situ Messungen von Veränderungen der Topographie, der Strandneigung, der nassen und trockenen Strandbreite, des Tidenhubs, der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit in Kombination mit den Eigenschaften der Sandfangzäune (Höhe, Porosität, Anordnung, Position im Strandprofil) entlang ausgedehnter Küstenabschnitte.

6 Danksagung

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens ProDune (FKZ: 03KIS125) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) durch den Projektträger Jülich (PTJ), für die fachliche Begleitung durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) und für die gute Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN).

Anhang

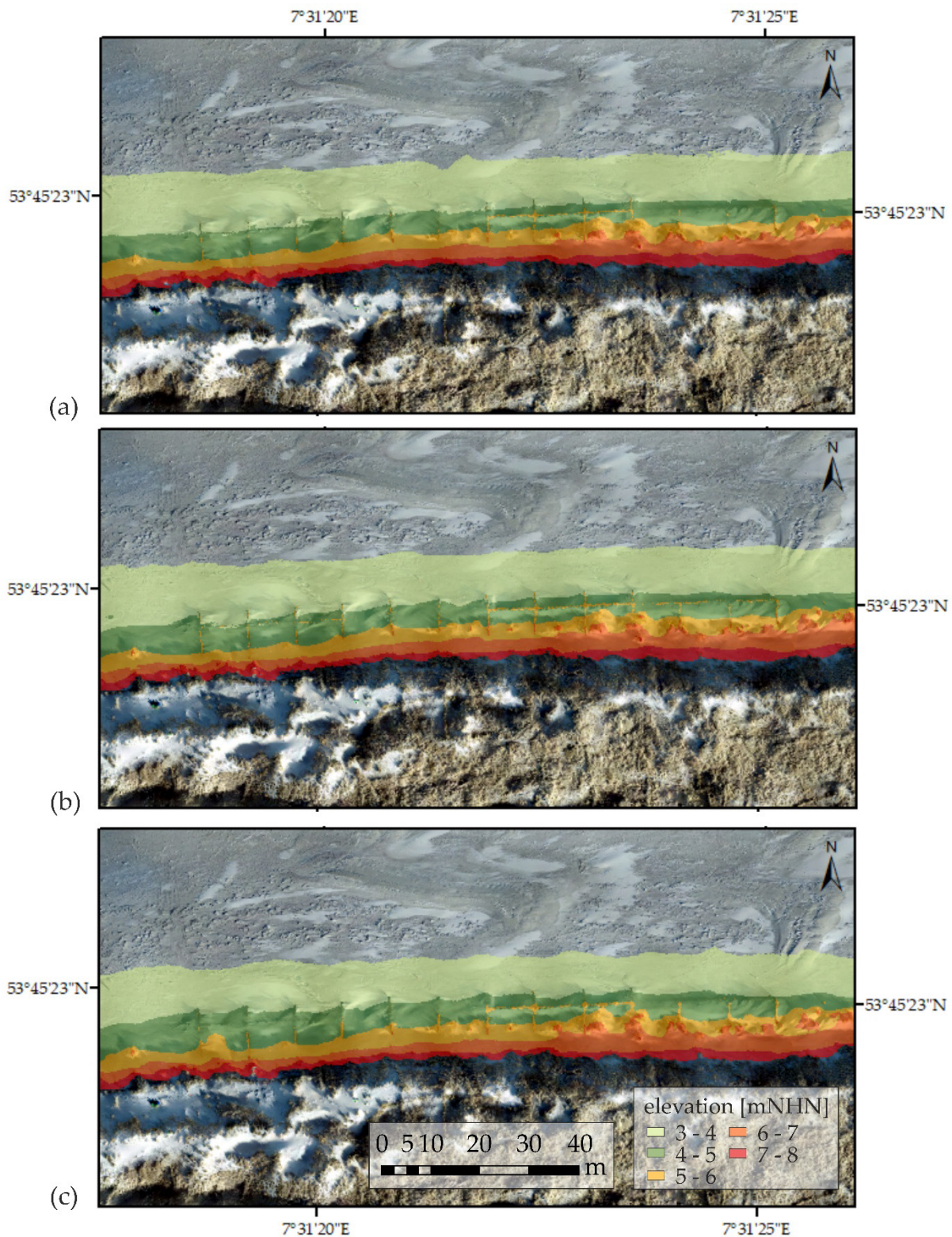


Abbildung 14: Orthophoto mit digitalen Geländehöhen von 3 bis 8 mNHN auf Langeoog am (a) 20. Mai 2020, (b) 15. Juni 2020 und (c) 27. August 2020. Diese Abbildung ist eine open-access Abbildung von Eichmanns und Schüttrumpf (2021) veröffentlicht unter den Allgemeinen Geschäftsbedingungen der Creative Commons Attribution Lizenz (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

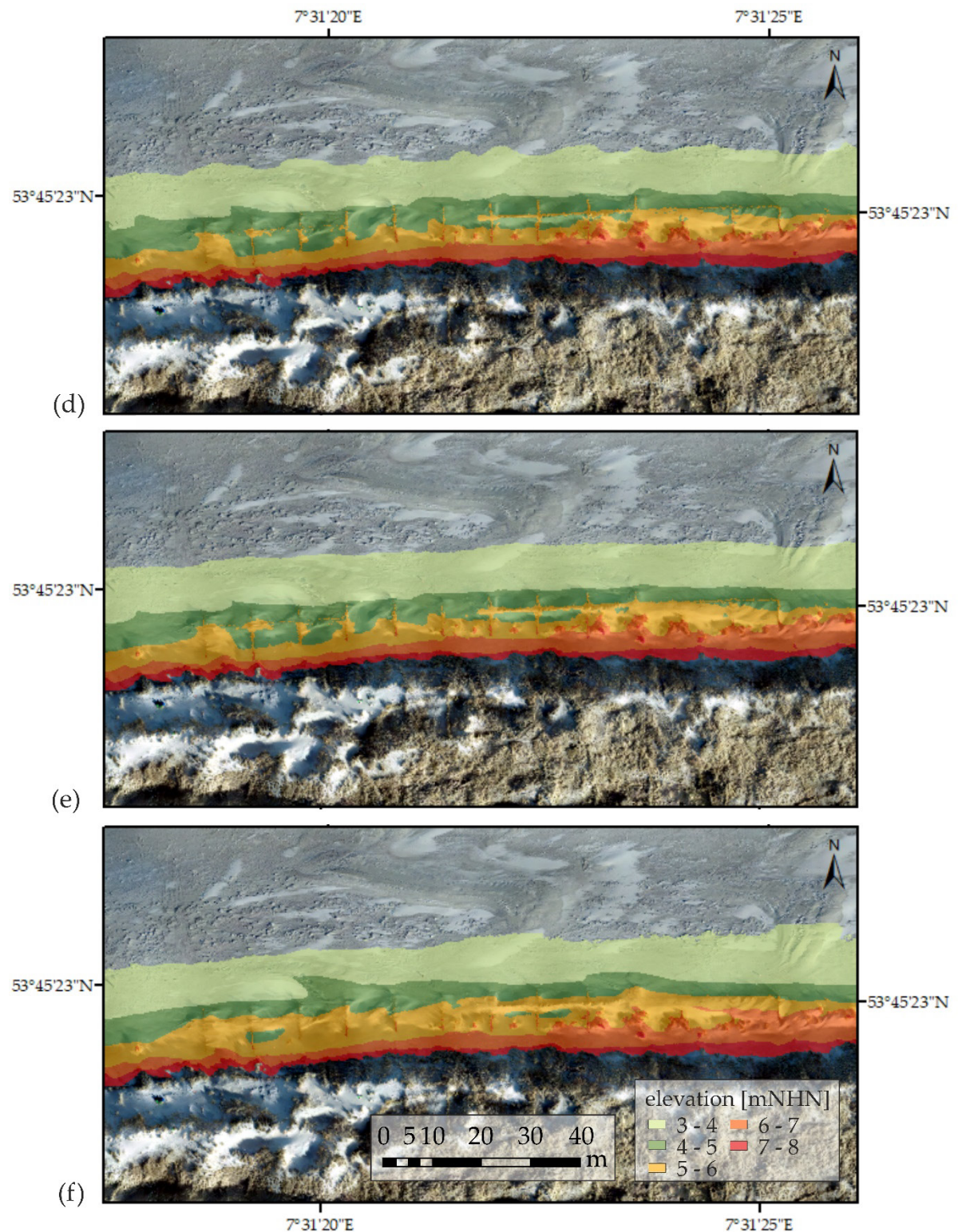


Abbildung 15: Orthophoto mit digitalen Geländehöhen von 3 bis 8 mNHN auf Langeoog am (d) 26. Oktober 2020, (e) 14. Dezember 2020 und (f) 12. März 2021. Diese Abbildung ist eine open-access Abbildung von Eichmanns und Schüttrumpf (2021) veröffentlicht unter den Allgemeinen Geschäftsbedingungen der Creative Commons Attribution Lizenz (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

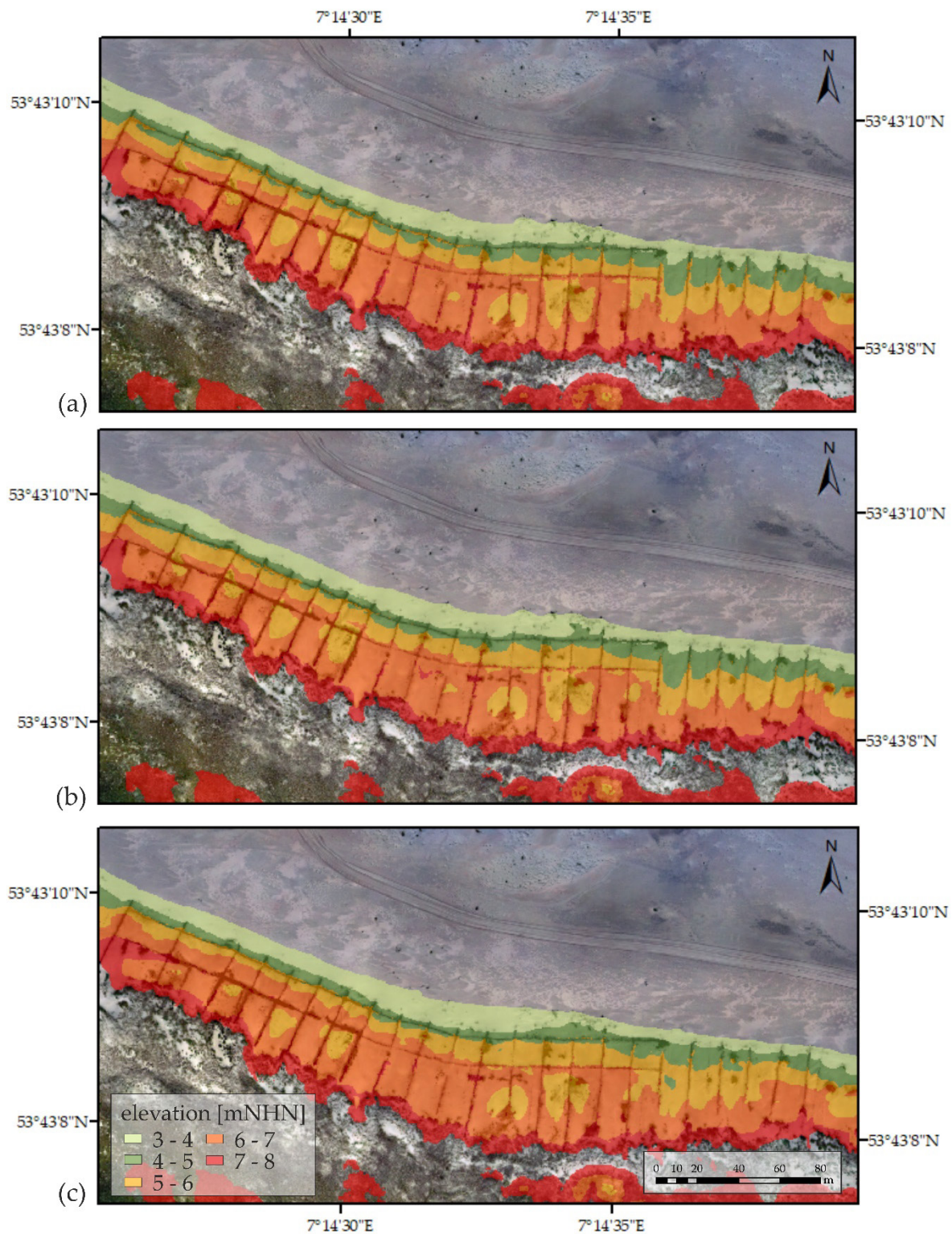


Abbildung 16: Orthophoto mit digitalen Geländehöhen von 3 bis 8 mNHN auf Norderney am (a) 24. August 2020, (b) 12. Dezember 2020 und (c) 9 März 2021. Diese Abbildung ist eine open-access Abbildung von Eichmanns und Schüttrumpf (2021) veröffentlicht unter den Allgemeinen Geschäftsbedingungen der Creative Commons Attribution Lizenz (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

7 Literaturverzeichnis

Adriani, M. J.; Terwindt, J. H. J.: Sand stabilization and dune building. Gov. Publ. Off; Government Publ. Office, GBV Gemeinsamer Bibliotheksverbund, The Hague. In: Rijkswaterstaat Communications (ISBN: 9012004985), 68, 1974.

Agisoft LLC: Agisoft PhotoScan User Manual. Professional Edition, Version 1.4, 2018.

Anthony, E. J.; Vanhee, S.; Ruz, M.-H.: An assessment of the impact of experimental brushwood fences on foredune sand accumulation based on digital elevation models. In: Ecological Engineering, 31, 1, 41–46, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.05.005>, 2007.

Arens, S. M.; Baas, A. C. W.; Van Boxel, J. H.; Kalkman, C.: Influence of reed stem density on foredune development. In: Earth Surf. Process. Landforms, 26, 11, 1161–1176, <https://doi.org/10.1002/esp.257>, 2001.

BAW (Hg.); Hagen, R.; Freund, J.; Plüß, A.; Ihde, R.: Validierungsdokument EasyGSH-DB Nordseemodell. Teil: UnTRIM2 – SediMorph – UnK. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), https://doi.org/10.18451/k2_easygsh_1, 2020.

BKG: Geodaten der deutschen Landesvermessung. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. Leipzig, Germany, 2021. http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/nutzungsbedingungen.pdf, zuletzt geprüft am 29.03.2021.

BSH: Gezeitenkalender 2020. Hoch- und Niedrigwasserzeiten für die Deutsche Bucht und deren Flussgebiete. Bundesamt für Schifffahrt und Hydrographie (BSH). Hamburg/Rostock, Germany, 2019.

BSH: Gezeitenkalender 2021. Hoch- und Niedrigwasserzeiten für die Deutsche Bucht und deren Flussgebiete. Bundesamt für Schifffahrt und Hydrographie (BSH). Hamburg/Rostock, Germany, 2020.

Bundesamt für Schifffahrt und Hydrographie. Berichte zu Sturmfluten und Extremen Wasserständen: Nordsee; Bundesamt für Schifffahrt und Hydrographie: Hamburg, Germany, 2021.

de Vries, S.; Stive, M.; van Rijn, L. C.; Ranasinghe, R.: A new conceptual model for aeolian transport rates on beaches. In: Int. Conf. Coastal. Eng., 1, 33, 1–39, <https://doi.org/10.9753/icce.v33.sediment.39>, 2012.

DJI Phantom 4 RTK: Product Specifications.

DWD: Climate Data Center. Wind, Perception and Temperature. Deutscher Wetterdienst (DWD), 2020. ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/, zuletzt geprüft am 25.11.2020.

DWD: Climate Data Center. Wind, Perception and Temperature. Deutscher Wetterdienst (DWD), 2021. <https://cdc.dwd.de/portal/>, zuletzt geprüft am 01.04.2021.

EAK: Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken durch den Ausschuss für Küstenschutzwerke der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. und der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V.: Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co. Heide i. Holstein, 65, ISBN: 978-3-8042-1056-1, 2007.

Eichmanns, Ch.; Lechthaler, S.; Zander, W.; Pérez, M. V.; Blum, H.; Thorenz, F.; Schüttrumpf, H.: 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, 135, <https://doi.org/10.3390/environments8120135>, 2021.

Eichmanns, Ch.; Schüttrumpf, H.: Investigating Changes in Aeolian Sediment Transport at Coastal Dunes and Sand Trapping Fences: A Field Study on the German Coast. In: *JMSE*, 8, 12, 1012, <https://doi.org/10.3390/jmse8121012>, 2020.

Eichmanns, Ch.; Schüttrumpf, H.: Influence of Sand Trapping Fences on Dune Toe Growth and Its Relation with Potential Aeolian Sediment Transport. In: *JMSE*, 9, 8, 850, <https://doi.org/10.3390/jmse9080850>, 2021.

Eichmanns, Ch.; Schüttrumpf, H.: A Nature-based Solution for Coastal Protection - Wind Tunnel Investigations on the Influence of Sand Trapping Fences on Sediment Accretion. In: *Frontiers in Built Environment*, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.878197>, 2022.

Eichmanns, Ch.: Investigating the Influence of Sand Trapping Fences on Aeolian Sediment Transport and Sediment Accretion in Coastal Areas. Dissertation. Fakultät für Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen University, <https://doi.org/10.18154/RWTH-2022-08482>, 2022.

ESRI ArcGIS Desktop: Version 10.5.1, 64 bit, 2017. <https://support.esri.com/en/products/desktop/arcgis-desktop/arcmap/10-5>, zuletzt geprüft am 31.03.2021.

Hacker, S. D.; Zarnetske, Ph.; Seabloom, E.; Ruggiero, P.; Mull, J.; Gerrity, S.; Jones, C.: Subtle differences in two non-native congeneric beach grasses significantly affect their colonization, spread, and impact. In: *Oikos*, 121, 1, 138–148, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2011.18887.x>, 2012.

Harff, J.; Björck, S.; Hoth, P.: The Baltic Sea basin. Berlin: Springer (Central and Eastern European development studies), 2011. <https://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1616/2011921542-b.html>.

Hayes, M. O.: Barrier Island Morphology as a Function of Tidal and Wave regime. In: *Barrier Islands from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*. New York, 1–27, 1979.

Hesp, P. A.: Dune Coasts. In: *Earth Systems and Environmental Sciences*, 3, 193–221, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00310-7>, 2011.

Houser, C.; Wernette, P.; Rentschlar, E.; Jones, H.; Hammond, B.; Trimble, S.: Post-storm beach and dune recovery: Implications for barrier island resilience. In: *Geomorphology*, 234, 54–63, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.12.044>, 2015.

Itzkin, M.; Moore, L. J.; Ruggiero, P.; Hacker, S. D.: The effect of sand fencing on the morphology of natural dune systems. In: *Geomorphology*, 352, 106995, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106995>, 2020.

Jackson, N. L.; Nordstrom, K. F.: Aeolian sediment transport and landforms in managed coastal systems: A review. In: *Aeolian Research*, 3, 2, 181–196, <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.03.011>, 2011.

Javad: Data Sheet GNSS Receiver Sigma-3, 2020. http://download.javad.com/manuals/hardware/Sigma_Operators_Manual.pdf, zuletzt geprüft am 25.11.2020.

Keijsers, J. G. S.; Groot, A. V. de; Riksen, M. J. P. M.: Vegetation and sedimentation on coastal foredunes. In: *Geomorphology*, 228, 723–734, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.027>, 2015.

Ladage, F.: Vorarbeiten zu Schutzkonzepten für die Ostfriesischen Inseln – Morphologische Entwicklung um Langeoog im Hinblick auf die verstärkten Dünenabbrüche vor dem Pirolatal. Hg. v. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie. Forschungsstelle Küste. Norderney, Germany, 2002.

Li, B.; Sherman, D. J.: Aerodynamics and morphodynamics of sand fences: A review. In: *Aeolian Research*, 17, 33–48, <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.11.005>, 2015.

MATLAB: Version 9.510.944444 (R2018b). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2018. https://de.mathworks.com/products/new_products/release2018b.html, zuletzt geprüft am 31.03.2021.

Miri, A.; Dragovich, D.; Dong, Z.: Wind-borne sand mass flux in vegetated surfaces – Wind tunnel experiments with live plants. In: *CATENA*, 172, 421–434, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.006>, 2019.

Morris, R. L.; Konlechner, T. M.; Ghisalberti, M.; Swearer, St. E.: From grey to green: Efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence. In: *Global change biology*, 24, 5, 1827–1842, <https://doi.org/10.1111/gcb.14063>, 2018.

NASA: Living Ocean. Online verfügbar unter <https://science.nasa.gov/earth-science/oceanography/living-ocean>, 2020.

Niemeyer, H. D.: Long Term Morphodynamical Development of the East Frisian Island and Coast. Proceedings of the 24th International Conference on Coastal Engineering, Kobe, Japan, 23–28 October 1994, <https://doi.org/10.9753/icce.v24.%25p>, 1995.

NLWKN: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen, Band 1. Festland. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), 2007.

NLWKN: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen: Ostfriesische Inseln, Küstenschutz Band 2. Ostfriesische Inseln. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Lower Saxony, Germany Band 2, 2010.

NLWKN: Documentation of the configuration of the installed sand trapping fence on Langeoog and Norderney. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Coastal Defence and Nature Conservation Agency. Lower Saxony, Germany, 2020.

Oost, A. P.; Hoekstra, P.; Wiersma, A.; Flemming, B.; Lammerts, E. J.; Pejrup, M.; Hofstede, J.; van der Valk, B.; Kiden, P.; Bartholdy, J.; van der Berg, M. W.; Vos, P. C.; Vries, S. de; Wang, Z. B.: Barrier island management: Lessons from the past and directions for the future. In: *Ocean and Coastal Manag.*, 68, 18–38, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.07.010>, 2012.

Reise, K.: Coast of change: habitat loss and transformations in the Wadden Sea. In: *Helgol. Mar. Res.*, 59, 9–21, <https://doi.org/10.1007/s10152-004-0202-6>, 2005.

Ruz, M.-H.; Anthony, E. J.: Sand trapping by brushwood fences on a beach-foredune contact: the primacy of the local sediment budget. In: *Zeit für Geo Supp*, 52, 3, 179–194, <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2008/0052S3-0179>, 2008.

Staudt, F.; Gijsman, R.; Ganai, C.; Mielck, F.; Wolbring, J.; Hass, H. C. et al.: The sustainability of beach nourishments: A review of nourishment and environmental monitoring practice – Review Article, 2021.

Strypsteen, G.: Monitoring and Modelling Aeolian Sand Transport at the Belgian Coast. Dissertation. KU Leuven, Faculty of Engineering Technology; Leuven, Belgium., 1–226, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19781.88806>, 2019.

Thorenz, F.: Coastal Flood Defence and Coastal Protection along the North Sea Coast of Niedersachsen. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (German Coastal Engineering Research Council). In: *Die Küste*, EAK. 74, 158–169, 2008. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101601>, zuletzt geprüft am 25.11.2022.

van der Wal, D.: Effects of fetch and surface texture on aeolian sand transport on two nourished beaches. In: *Journal of Arid Environments*, 39, 3, 533–547, <https://doi.org/10.1006/jare.1997.0364>, 1998.

Yu, Y.; Zhang, K.; An, Z.; Wang, T.; Hu, F.: The blocking effect of the sand fences quantified using wind tunnel simulations. In: *J. Mt. Sci.*, 17, 10, 2485–2496, <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6095-2>, 2020.

Zhang, N.; Kang, J.-H.; Lee, S.-J.: Wind tunnel observation on the effect of a porous wind fence on shelter of saltating sand particles. In: *Geomorphology*, 120, 3-4, 224–232, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.03.032>, 2010.