

Raumzeitliche Beobachtung und Auswertung einer Dünenverformung unter dem Einfluss von Wind und Niederschlag

Spatio-temporal Observation and Evaluation of a Dune Deformation under the Influence of Wind and Precipitation

Nils Koldrack, Patrick Postert, Ralf Bill

Seit Ende des 18. Jahrhunderts werden im Ostseeraum Dünen für den Küstenschutz künstlich angelegt. Vor allem Sturmfluten und raue Wetterverhältnisse haben Einfluss auf die natürliche Erosion des Dünenkörpers. Um diese Sand- und Materialablagerungen an einer Forschungsdüne am Strand von Warnemünde zu analysieren, wurde die Düne periodisch in der Wintersaison 2017/18 mittels UAV (Unmanned Aerial Vehicle) befliegen. Die aus den Bilddaten abgeleiteten DGM (Digitale Geländemodelle) dienen der Bestimmung der Erosionseffekte, deren Ursachen durch Einbeziehung offener Wetter- und Pegeldata erforscht werden sollen. Dabei scheint der Wind einen deutlich höheren Einfluss als der Niederschlag zu haben.

Schlüsselworte: Deformationsanalyse, Erosion, UAV, DGM, Wind, Niederschlag

Since the end of the 18th century, dunes have been artificially created for coastal protection in the Baltic Sea region. Storm surges and rough weather conditions have an influence on the natural erosion of the dune body. In order to analyse these sand and material deposits on a research dune located at the beach of Warnemünde, a study area was periodically monitored by UAV (Unmanned Aerial Vehicle) during the winter season 2017/18. The DTM (Digital Terrain Model) derived from the image data served to determine the erosion effects, the causes of which are to be investigated by including open weather and flood data. Wind seems to have a much higher influence than precipitation.

Keywords: Deformation analysis, erosion, UAV, DTM, wind, precipitation

1 EINFÜHRUNG

Zum Küstenschutz kommen unterschiedliche Bauwerke zum Einsatz, so z. B. Dünen, Deiche, Buhnen und Wellenbrecher. Dünen, auf die sich dieser Beitrag konzentriert, sind Erhebungen aus Sand, die immer wieder nach Abtrag durch neuen Sand aufgeschüttet werden. Bei einer Sturmflut schützen Dünen das Hinterland und halten den vom Strand bei auflandigen Winden verwehten Sand fest. In Mecklenburg-Vorpommern sind allein 30 % der 377 km langen Küstenlinie durch Landesküstenschutzdünen, oft in Kombination mit einem Küstenschutzwald, geschützt. In Schleswig-Holstein dagegen sind Dünen häufig den Küstenschutzdeichen vorgelagert.

Trotz weltweiter Forschung zu Dünen ist bislang nicht ausreichend bekannt, wie eine Düne im Fall einer Sturmflut bricht, wie Polderflächen durch eine Dünenbresche geflutet werden und wie sie sich nach Absinken der Sturmflutwelle entleeren und wie der Bemessungsseegang für dahinter liegende Deiche durch das überströmte Dünensystem beeinflusst wird. Existierende Dünenerosionsmodelle lösen diese Fragestellungen noch nicht zur vollsten Zufriedenheit.

Dies ist Anlass für das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsprojekt „Prozesse und

Auswirkungen von Dünendurchbrüchen an der deutschen Ostseeküste“ (PADO), welches als interdisziplinäres Forschungsvorhaben an der Universität Rostock, der RWTH Aachen und dem Institut für ökologische Wirtschaftsforschung angesiedelt ist.

Für das Projekt PADO wurde im Dezember 2017 eine 120 m lange und etwa 1,2 m hohe Versuchsdüne am Strand von Warnemünde zwischen der Dünenanlage der Stadt Rostock und der Küstenlinie errichtet. Ziel war die Analyse eines Dünendurchbruchs beim Eintreten eines einjährigen Sturmflutereignisses. Dieses Ereignis blieb allerdings im Winter 2017/18 aus, sodass ein erneuter Versuch 2018/19 stattfand. Da die Versuchsdüne nur über einen kurzen Zeitraum im Untersuchungsgebiet stehen konnte, musste auf Dünenvegetation, die ansonsten üblich ist und zu einer erheblichen weiteren Dünenstabilisierung beiträgt, verzichtet werden.

Da die Belastung von einer Sturmflut, die im Normalfall maßgeblich für die Verformung des Dünenkörpers verantwortlich ist, ausblieb, wird in diesem Beitrag ausschließlich die Veränderung der Dünengestalt über den Winter 2017 durch Wind und Niederschlag anhand von periodisch erstellten Digitalen Geländemodellen (DGM) ermittelt. Hierzu erfolgt eine Auswertung anhand von Differenzmodellen des Strandabschnitts sowie von Volumenmodellen der Düne. Die Effekte werden dann im Kontext von Wind- und Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) epochenweise bewertet.

2 STAND DER FORSCHUNG

Die rasante Entwicklung der UAV-Photogrammetrie ermöglicht ein immer besser werdendes oberflächenbasiertes Messverfahren, welches eine hohe räumliche Auflösung besitzt. Moderne digitale Photogrammetrie-Softwarelösungen ermöglichen es, die mit einem UAV aufgenommenen Bilder in wenigen Schritten in hoch aufgelöste DGM zu prozessieren, um anschließend Verformungsanalysen durchzuführen.

/Naumann et. al. 2014/ haben mit diesem Verfahren Verformungen innerhalb eines Jahres von einem bewachsenen Deichbauwerk analysiert. Für die Datenaufnahme bei diesem Verfahren kam neben zwei UAV ein terrestrischer Laserscanner (TLS) zum Einsatz.

Um Bodenerosion von Ackerflächen und der damit verbundenen Bodendegradation innerhalb von 7 Monaten zu untersuchen, haben /Eltner et. al. 2013/ zwei Untersuchungsgebiete von mindestens 500 m² mittels UAV und TLS vermessen. Die quantitativen Messungen der Bodenerosion wurden daraufhin mit unterschiedlichen Softwarelösungen verglichen.

Die südlichen und nördlichen Nehrungen an der Westküste von Sylt sind vor allem im Winter den Sturmfluten der Nordsee ausgesetzt. Um die geomorpho-

logischen Veränderungen der Dünenklippen und der Strandbreite aufzuzeigen, verwendeten /Richter et. al. 2013/ jährlich aufgenommene Lidar-Daten.

3 DATENGRUNDLAGE UND DGM-VERGLEICHE

Als Datengrundlage dienen Luftbildaufnahmen, welche mithilfe von Unmanned Aerial Vehicles (UAV) aufgenommen wurden. Die Aufnahmen erfolgten mit dem Multikopter Phantom der Firma DJI Technology Co., Ltd. Die Georeferenzierung geschah jeweils auf Grundlage von ausgelegten Zielmarken und deren Einmessung als Passpunkte mittels GNSS-Empfänger (Leica Viva Net-Rover). Mit der Software AgiSoft PhotoScan wurden anschließend die Bilddateien aufbereitet und fünf Digitale Geländemodelle erstellt. Die Differenz zwischen den aufeinanderfolgenden DGM wird dann zum Epochenvergleich der Versuchsdüne genutzt (Tab. 1). Durch die unterschiedlichen Rahmenbedingungen der Befliegung ist die Bodenauflösung der DGM-Raster zwar leicht unterschiedlich; sie liegt aber in allen Fällen bei wenigen Zentimetern und erlaubt somit die Bestimmung sehr präziser Geländemodelle.

Aufgrund der hohen Bodenauflösung von besser als 5 cm und fehlender Bruchkanten im Dünenbauwerk wurde sich im Rahmen der qualitativen Betrachtung der im Bereich von Dezimetern liegenden Dünenerosion auf abgeleitete Raster-DGM beschränkt (Abb. 1). Die einzelnen DGM-Epochen wurden jeweils berechnet und global Differenzanalysen durchgeführt, aus denen die Volumenänderungen zwischen den Epochen als globale Maßzahl berechnet wurden (Tab. 2).

Aufnahme-datum	DGM-Bezeichnung	Bodenauflösung
15.12.2017	DGM 1	3,2 cm
12.01.2018	DGM 2	3,2 cm
07.02.2018	DGM 3	5,0 cm
14.03.2018	DGM 4	1,8 cm
21.03.2018	DGM 5	1,9 cm

Tab. 1 | Kenndaten der UAV-Befliegungen aus einer Flughöhe von 55 m

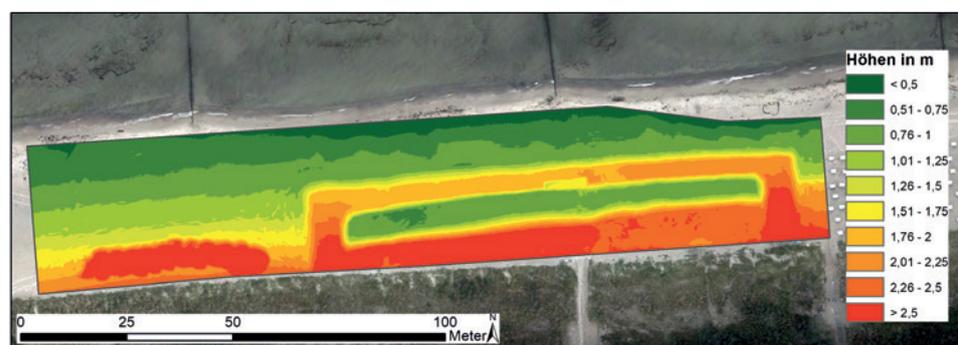


Abb. 1 | Geländemodell (DGM 1) des Untersuchungsgebiets in Meter (in den dunkleren Rottönen ist die eigentliche Küstenschutzdüne sowie links ein Sandlager zu sehen, in den orangenen Tönen die davor aufgeschüttete Versuchsdüne von 120 m Länge)

Zeitraum	Ausgangs-DGM	Ausgangsvolumen	Ziel-DGM	Endvolumen	Volumenänderung
Epoche 1	DGM 1	2 293,95 m ³	DGM 2	2 338,73 m ³	44,78 m ³
Epoche 2	DGM 2	2 338,73 m ³	DGM 3	2 310,06 m ³	-28,67 m ³
Epoche 3	DGM 3	2 310,06 m ³	DGM 4	2 334,47 m ³	24,41 m ³
Epoche 4	DGM 4	2 334,44 m ³	DGM 5	2 050,95 m ³	-283,52 m ³
Epochenübergreifend	DGM 1	2 293,95 m ³	DGM 5	2 050,95 m ³	-243,00 m ³

Tab. 2 | Volumenveränderungen je Epoche

4 WIND UND NIEDERSCHLAG ALS URSACHE FÜR DÜNENEROSION

Eine Ursachenforschung der entstandenen Dünenerosionen zwischen den jeweiligen DGM erfolgt mithilfe öffentlicher Wetterdaten der DWD-Station in der Seestraße in Warnemünde. Die Messstation befindet sich mit einer Entfernung von weniger als 2 km in unmittelbarer Nähe der Versuchsdüne. Aufgrund der direkten Strandnähe der Messeinrichtungen ist mit vergleichbaren Wind- und Niederschlagsbedingungen wie im Versuchsgebiet zu rechnen. Die im ASCII-Format vorliegenden Daten wurden hierfür automatisiert erfasst. Der DWD gibt an, dass bei den bereitgestellten Daten eine systematische grobe Prüfung und Korrektur der Daten erfolgt, die Korrektheit und Qualität aller Daten jedoch nicht garantiert wird /Deutscher Wetterdienst 2018a/. Sowohl für die Windrichtung als auch die Windstärke liegen stündliche Werte für den Versuchszeitraum von Dezember 2017 bis März 2018 vor. Da es sich bei der Datengrundlage um Mittelwerte handelt /Deutscher Wetterdienst, 2018b/, können Böen nur in unzureichender Form abgebildet werden. Ferner wird nur die stündlich dominante Windrichtung angegeben. Aus den Daten ist daher nur eine Tendenz der Windverhältnisse ableitbar.

4.1 Windverhältnisse

Zur Bewertung des Einflusses auf die Dünenerosion werden die Werte der Windgeschwindigkeiten in Windgeschwindigkeitsklassen zusammengefasst und die Winddauer der einzelnen Klassen für jede Windrichtung kumuliert betrachtet. Ausgehend von der durch den Wind auf die Düne wirkenden kinetischen Energie $\left(E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2\right)$ und der Luftmasse ($m = \rho V$) folgt unter der Annahme einer konstanten Luftdichte ρ und eines betrachteten konstanten Luftvolumens V die Proportionalität der einwirkenden kinetischen Windenergie und der zweiten Potenz der Windgeschwindigkeit $E_{\text{kin}} \sim v^2$. Zweckmäßig ist daher die Betrachtung insbesondere der hohen Windgeschwindigkeiten.

Neben der Angabe in m/s kann die Windgeschwindigkeit auch durch den Beaufortgrad quantifiziert werden. Hierbei entspricht der Grad 12 einem Orkan und der Grad 0 der Windstille. Am 29. Januar wird zwischen 23 Uhr und 24 Uhr eine maximale Durchschnittswindgeschwindigkeit von 14 m/s erreicht (Abb. 2), welche im Wertebereich von 13,9 m/s bis 17,1 m/s liegt und dem Beaufortgrad 7 zuzuordnen ist. Dieser Grad beschreibt einen steifen Wind, welcher eine fühlbare Hemmung beim Gehen gegen den Wind und

die Bewegung ganzer Bäume induziert. Mit einem Beaufortgrad von 6 werden starke Winde mit Geschwindigkeiten zwischen 10,8 m/s und 13,8 m/s klassifiziert. Charakteristisch für diese Windverhältnisse sind das Schwanken starker Äste und das Pfeifen von Telegrafeneleitungen im Wind. Insgesamt 33 Windstunden haben eine durchschnittliche

Geschwindigkeit in diesem Bereich. 133 Windstunden weisen als schwache Brise eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 8 m/s bis 10,7 m/s auf. Dies entspricht dem Beaufortgrad 5 und führt zur Ausbildung von Schaumkronen auf Seen und zum Schwanken kleiner Laubbäume. Mit 487 Windstunden hat die mäßige Brise mit Geschwindigkeiten zwischen 5,5 m/s bis 7,9 m/s und einem Beaufortgrad 4 einen wesentlichen Anteil am Untersuchungszeitraum. Jedoch ist der schwachen Brise mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 3,4 m/s bis 5,4 m/s (Beaufortgrad 3) mit 790 Windstunden das größte zeitliche Gewicht zuzuschreiben. Die etwa 900 verbleibenden Stunden weisen Durchschnittswindgeschwindigkeiten von weniger als 3,4 m/s auf und werden als nicht essenziell erachtet.

4.2 Niederschlagsverhältnisse

Auch die Messwerte des Niederschlags liegen in stündlicher Auflösung vor. Aufgrund der Epochenlänge von teils mehr als einem Monat ist neben der Bewertung der stündlichen Intensität in mm/h eine Betrachtung der kumulierten Tagesniederschläge in mm/d zweckmäßig.

In seiner koordinierten Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung (KOSTRA) beziffert der /Deutscher Wetterdienst 2018c/ die statistische einjährige Niederschlagshöhe über eine Dauer von 60 Minuten für den Dünenstandort in Warnemünde auf 14 mm. Abb. 2 zeigt maximale Tagesniederschläge von 20,7 mm/d am 03. Januar 2018 und 23,2 mm/d am 12. März 2018 auf. Die maximalen stündlichen Niederschläge belaufen sich an den gleichen Tagen auf 5,1 mm/h am 12. März 2018 und auf 4,2 mm/h am 03. Januar 2018. Für Letztere ergibt sich eine Wiederkehrzeit von 0,25 Jahren und 0,44 Jahren.

Der DWD warnt ab einem Wert von 20 mm Niederschlag innerhalb von 6 Stunden oder ab einem stündlichen Niederschlag von 15 mm/h vor einem Starkregenereignis /Deutscher Wetterdienst 2018d/. Da sich die oben genannten maximalen Tagesgesamtniederschläge über eine deutlich größere Niederschlagsdauer als 6 Stunden erstrecken, sind im Untersuchungszeitraum keine Starkregenereignisse zu verzeichnen.

4.3 Windgeschwindigkeiten und Niederschlag im Untersuchungszeitraum

Abb. 2 stellt die Windgeschwindigkeiten und Niederschläge über den Untersuchungszeitraum dar.

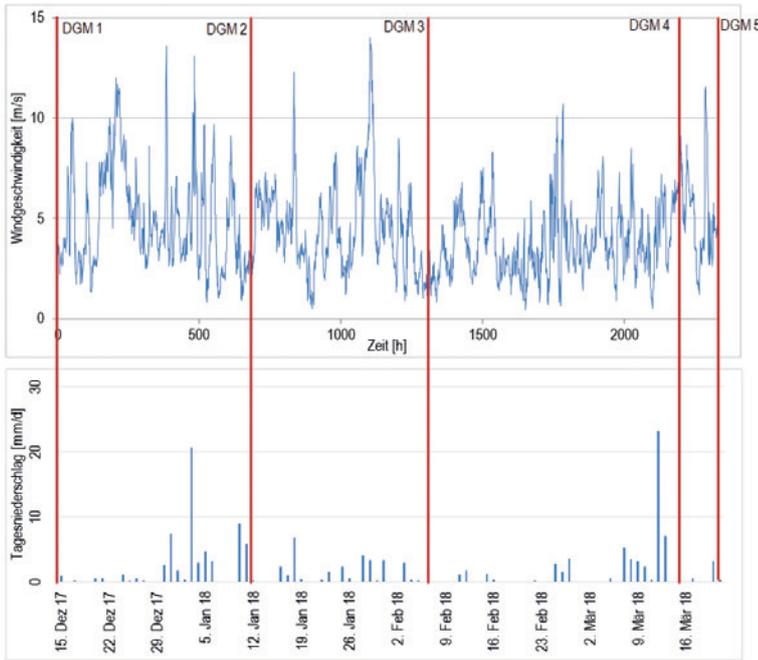


Abb. 2 | Windgeschwindigkeiten je Stunde (oben), Niederschläge als kumulierte Tagesgesamtniederschläge (unten)

In dem Beobachtungszeitraum wurde festgestellt, dass trotz Hinweisschildern die Düne durch Personen am Strand betreten wurde. Anthropogene Einflüsse können somit nicht ganz ausgeschlossen werden, sind jedoch i. d. R. sehr kleinräumig – sowohl die Fläche als auch das Volumen betreffend – und werden daher in der Analyse nicht mit einbezogen.

5 EPOCHENBEZOGENE URSACHENFORSCHUNG ZU WIND- UND NIEDERSCHLAGSEFFEKTEN DER DÜNENEROSION

5.1 Epoche 1 (Dezember bis Januar)

Die erste Epoche zwischen der ersten und zweiten Befliegung der fertiggestellten Versuchsdüne zeigt nur eine geringfügige Erosion des Objekts auf. Deutlich erkennbar – an der quadratischen Form in Orange in der Dünenmitte – ist die manuelle Nachbearbeitung der in der Dünenmitte vorgesehenen Sollbruchstelle für den geplanten Dünenbruch (Abb. 4).

Charakteristisch für die erste Epoche sind hohe Gesamtepochen-niederschläge von 62,6 mm und eine große Anzahl an Windstunden mit hohen Geschwindigkeiten von mehr als 10 m/s. Abb. 3 zeigt, dass

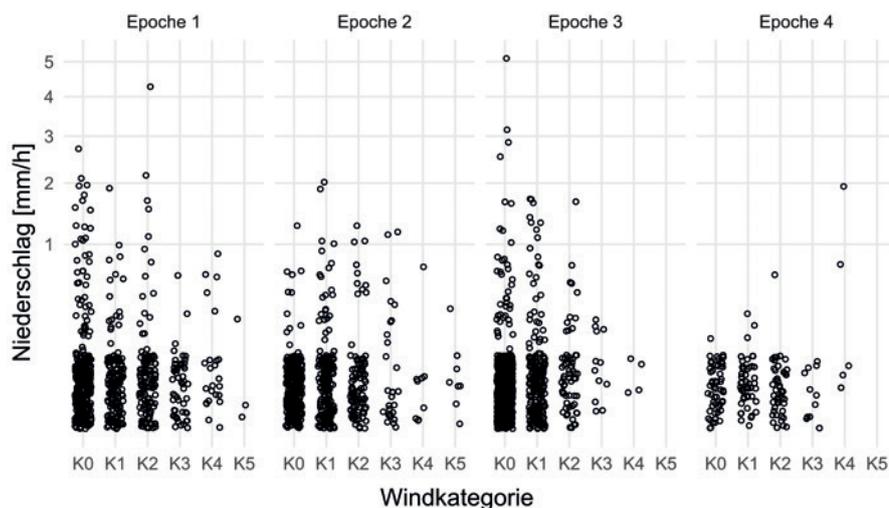


Abb. 3 | Quantitative Betrachtung der Niederschlagsmesswerte in den einzelnen Epochen

Stunden mit hohen Windgeschwindigkeiten überwiegend bei vernachlässigbaren Niederschlägen auftraten.

Trotz eines dreistündigen Westwinds mit Windgeschwindigkeiten über 12,0 m/s und kumulierten 24 Stunden mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 10,1 m/s aus West-Nordwest-Richtung vom 23. bis 24. Dezember (mit 1,2 mm/d Niederschlag) sowie am 3. Januar (20,7 mm/d) und 4. Januar (3,0 mm/d) blieb eine größere Materialverlagerung aus. Bei den Niederschlägen am 3. Januar handelt es sich – neben den Maxima von 23,2 mm/d bzw. 5,1 mm/h vom 12. März – um die Höchstwerte während der Dünenstandzeit (Abb. 2). Die Oberfläche des für Reparaturarbeiten errichteten und nicht verdichteten Sandlagers (westlich neben der Düne zu sehen) war hingegen deutlich windanfälliger und sank an vielen Stellen um 20 cm.

Deutlich erkennbar ist ein hohes Maß an Sandablagerung am Spülsaum der Düne. Aus nördlicher Richtung waren am 16. und 17. Dezember Windgeschwindigkeiten zwischen 8,0 m/s bis 10,0 m/s zu verzeichnen (Abb. 5). Gleichzeitig

zeigt die Ganglinie einen hohen Wasserstand vor der Düne von etwa 0,5 m über NHN (Abb. 6), bei der der Dünenfuß in Höhe von 0,6 m über NHN aber nicht erreicht wurde.

An beiden Tagen fielen nur geringe Niederschlagsmengen von 0,2 mm/d mit geringer Intensität. Im Zeitraum vom 5. Januar bis zum 7. Januar lagen ebenfalls vereinzelt Nordwinde mit vergleichbarer Windgeschwindigkeit vor. Ferner sind mit einer maximalen Tagesmenge von 4,6 mm/d und einer maximalen stündlichen Intensität von 1,9 mm/h Niederschlagsereignisse in diesem Zeitraum verortet. Hierbei wurde der Wasserstand von 0,5 m über NHN nicht überschritten, sodass eine Erosion aufgrund von Wellen ausgeschlossen werden kann (Abb. 6).

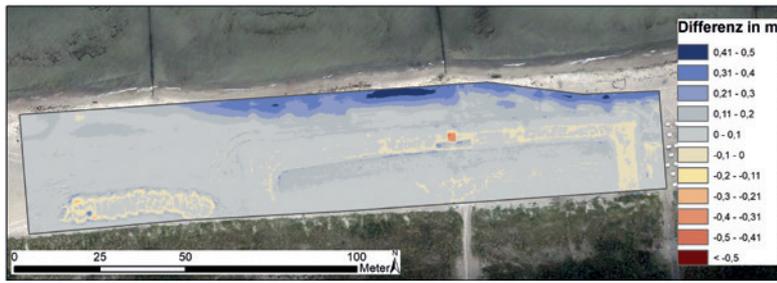


Abb. 4 | Differenzmodell des Untersuchungsgebiets, abgeleitet aus DGM 1 und DGM 2

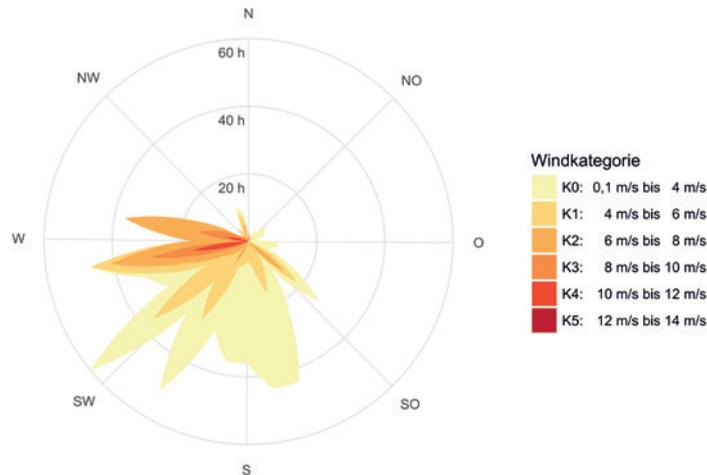


Abb. 5 | Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit der ersten Epoche von DGM 1 zu DGM 2

In der ersten Epoche ist im Gebiet der Kerndüne eine Sandablagerung von circa 45 m³ gegenüber der in DGM 1 betrachteten Ausgangsgestalt festzustellen (Tab. 2).

5.2 Epoche 2 (Januar bis Februar)

Das Differenzmodell der Versuchsdüne zeigt eine zur ersten Epoche vergleichbare Erosion der Kerndüne (Abb. 7) bei einem Volumenverlust von etwa 29 m³. Festzustellen sind Sandablagerungen nördlich der Versuchsdüne und an der östlichen Flanke.

Abb. 3 zeigt auch für diese Epoche eine hohe Anzahl an Windstunden der Kategorien K4 und K5 mit Geschwindigkeiten von mehr als 10 m/s auf. Erkennbar ist, dass die Niederschläge geringer ausfallen und mit einer Gesamtepochenmenge von 29,3 mm deutlich unter der vorherigen Epoche liegen.

Hohe Windgeschwindigkeiten aus westlicher Richtung

waren insbesondere am 29. und 30. Januar zu verzeichnen. In diesem Zeitraum wurde auch die höchste Windgeschwindigkeit der Dünenstandzeit von 14,0 m/s erreicht. Die Niederschläge fielen in dieser Zeit mit 3,3 mm/d und 0,1 mm/d vergleichsweise gering aus. Abb. 8 zeigt ferner hohe Windgeschwindigkeiten von bis zu 12,3 m/s aus nördlichen Richtungen bei gleichzeitig mäßigem Niederschlag von 6,8 mm/d bzw. einer Niederschlagsspitze von 2,3 mm/h am 18. Januar, die dem Sturm Friederike zuzuordnen sind. Der im Rahmen des Orkantiefs erreichte Wasserstand von etwa 0,4 m über NHN liegt deutlich unter dem Stand von 0,5 m über NHN in der ersten Epoche. Hingegen erzielte der Wasserstand die Höhe des Ausgangsdünenfußes von 0,6 m über NHN am 3. Februar bei einem Seewind von bis zu 9,0 m/s sowie einer maximalen Niederschlagsintensität von 1,5 mm/h und einem Gesamtniederschlag von 2,9 mm/d an diesem Tag. Die Sturmflut Anfang Februar könnte ausschlaggebend dafür gewesen sein, dass die Höhe des Spülsaums nördlich und nordöstlich der Versuchsdüne sich bis zu 50 cm verringert hat.

5.3 Epoche 3 (Februar bis März)

Das Differenzmodell der dritten Epoche zeigt nur geringe Veränderungen der Kerndüne auf (Abb. 9). Während keine Erosion im betrachteten Strandausschnitt erkennbar ist, erfolgt ein leichtes Maß an Sandablagerung am Spülsaum der Versuchsdüne. Der in dieser Epoche durchgängig vergleichsweise niedrige Wasserstand (Abb. 6) zeigt, dass eine durch einen höheren Wasserstand induzierte Sedimentation als Ursache für die Sandablagerungen vor der Düne ausgeschlossen ist. Gleichzeitig sind in dieser Epoche

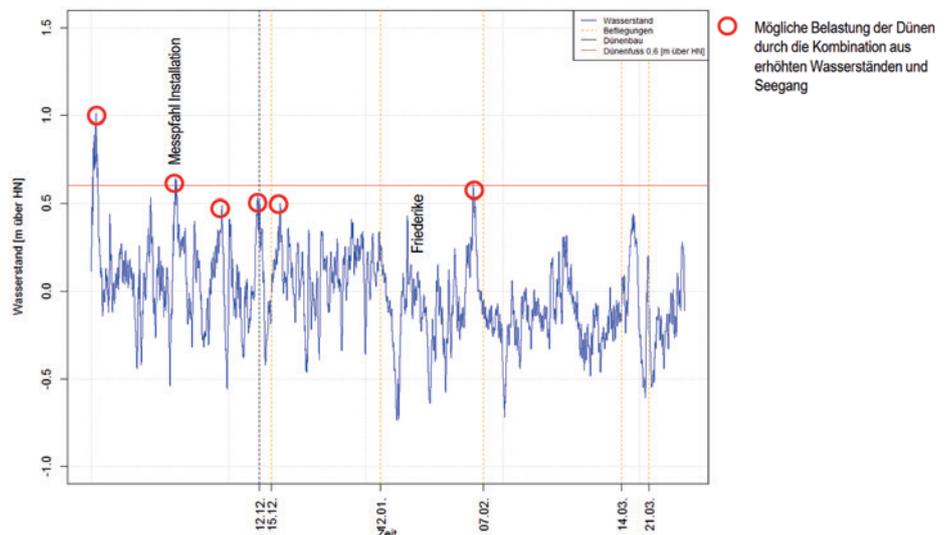


Abb. 6 | Verlauf der Wasserstände und hierdurch induzierte Belastungen der Versuchsdüne /Kaehler 2018/

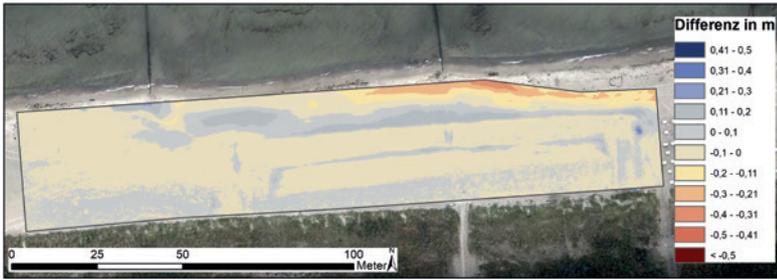


Abb. 7 | Differenzmodell des Untersuchungsgebiets, abgeleitet aus DGM 2 und DGM 3

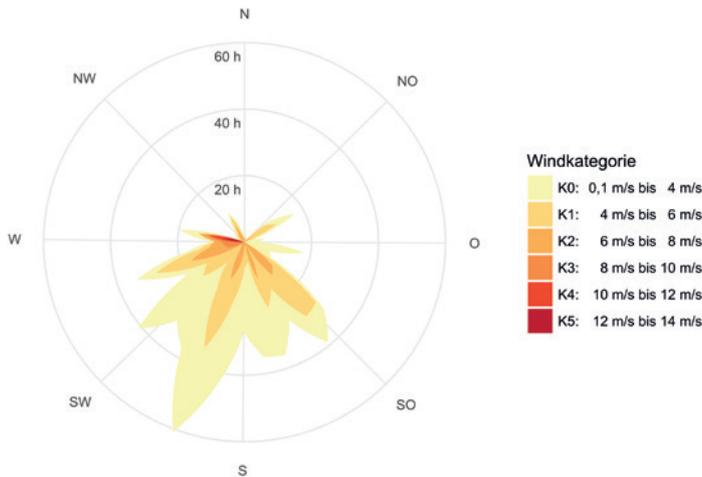


Abb. 8 | Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit der zweiten Epoche vom DGM 2 zu DGM 3

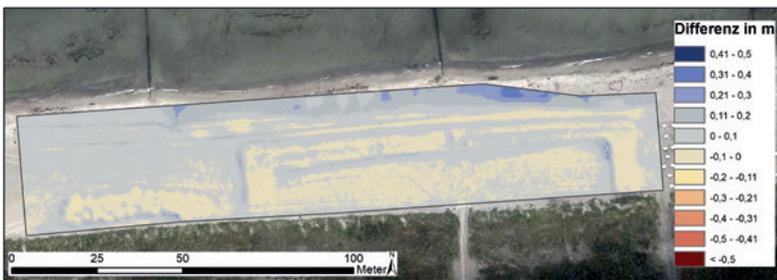


Abb. 9 | Differenzmodell des Untersuchungsgebiets, abgeleitet aus DGM 3 und DGM 4

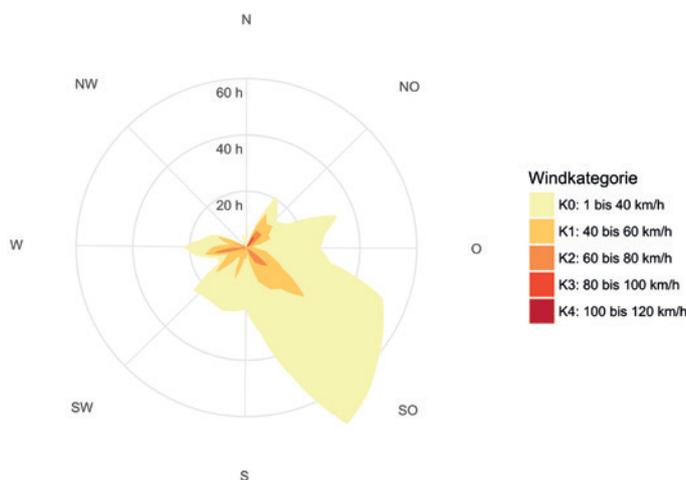


Abb. 10 | Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit der dritten Epoche vom DGM 3 zu DGM 4

mit 23,2 mm/d und 5,1 mm/h am 12. März die maximalen täglichen und stündlichen Niederschlagswerte während der betrachteten Dünenstandzeit zu verzeichnen. Demnach implizieren hohe Niederschlagsmengen und -intensitäten nicht das Auftreten von starker Dünenerosion. Auch ist nur eine geringe Erosion auf der Westseite festzustellen, obwohl am 16. Februar und auch am 9. März kurzzeitige Windgeschwindigkeiten von bis zu 8,5 m/s aus westlicher Richtung vorgeherrscht haben. Denkbar ist, dass die Winderosion durch den gleichzeitig vorliegenden geringen Niederschlag von 0,3 mm/d bzw. 3,2 mm/d bei niedriger stündlicher Regenintensität gehemmt wurde, ohne dabei selbst erodierend zu wirken.

Abb. 3 zeigt, dass die Niederschläge in dieser Epoche häufig zusammen mit niedrigen Windgeschwindigkeiten unter 8 m/s auftraten. Mit 57,8 mm liegt der Gesamtepochenniederschlag auf einem mit der kürzeren ersten Epoche vergleichbaren Niveau.

In Übereinstimmung mit den Erwartungen zeigt sich bei Betrachtung der Verteilung der Windhäufigkeiten (Abb. 10) eine Dominanz höherer Windgeschwindigkeiten bis 10,7 m/s aus nordöstlicher Richtung im Zeitraum vom 26. bis 27. Februar. Dies könnte auch Ursache für die Sandablagerungen an den Westseiten der Flanken der Versuchsdüne sein. Allerdings lag auch an diesen Tagen mit 1,5 mm/d bzw. 3,6 mm/d mäßiger Niederschlag bei gleichzeitig mit 0,3 mm/h bzw. 1,6 mm/h geringer maximaler Intensität vor. Ein möglicher Grund für das Ausbleiben von großflächigen Erosionen in dieser Epoche ist die Dominanz von sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten oder eine die Winderosion hemmende Wirkung von leichtem Niederschlag. Für diese Epoche wurde eine Volumenzunahme der Düne um etwa 24 m³ Sand ermittelt.

5.4 EPOCHE 4 (MÄRZ BIS MÄRZ)

Die im Differenzmodell für die vierte Epoche dargestellte Erosion der Düne übersteigt die epochenübergreifende Erosion vom 15. Dezember bis zum 21. März deutlich (Abb. 11). Die vierte Epoche weist mit 4,1 mm einen sehr geringen Gesamtepochenniederschlag auf. Auch die Windstunden mit hohen Geschwindigkeiten sind vergleichbar mit den Werten der vorherigen Epoche, liegen jedoch deutlich unter der Stundenzahl der ersten und zweiten Epoche (Abb. 3). Zu beachten ist, dass diese

Epoche erheblich kürzer ausfällt als die anderen.

Wird die Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten und dominierenden Windrichtungen in dieser Epoche betrachtet, wird deutlich, warum insbesondere hotspotartige Sandablagerungen westlich der Versuchsdünenflanken sowie des westlichen Sandhaufens zustande kommen. Der Küstenabschnitt war in dieser letzten Epoche vom 16. bis 17. März (0,6 mm/d Niederschlag) erstmals Ostwind mit einer Geschwindigkeit von bis zu 9,1 m/s für circa 16 h ausgesetzt (Abb. 12). Windgeschwindigkeiten von bis zu 11,6 m/s aus Nordrichtung, bei gleichzeitigem Niederschlag von 3,2 mm/d, drei Tage später am 20. März unterstützten die starke Erosion über den gesamten Dünenkörper. Die Volumenveränderung in dieser Periode übersteigt die der vorherigen Epochen deutlich. Um mehr als 283 m³ nahm das Volumen der Kerndüne in dieser vergleichsweise kurzen Zeit ab.

Ebenso war der Spülsaum den äußeren Bedingungen signifikant ausgesetzt. Größtenteils verringerte sich die Höhe um bis zu 40 cm. Die drei Schneisen mittig der Versuchsdüne resultieren aus der manuellen Bergung von vergrabenen Sensoren vor dem Rückbau der Düne.

5.5 Vergleich über den gesamten Zeitraum

Das Differenzmodell der über den gesamten Zeitraum wirkenden Erosion (Abb. 13) zeigt wie erwartet starke Höhenveränderungen an der Versuchsdüne. Es ist eine deutliche Sandabtragung in West-Richtung festzustellen. Dies gilt für die See- und Landseite der Düne. Ein besonderer Hotspot der Sandablagerung ist westlich in unmittelbarer Nähe zu den Flanken erkennbar. Aber auch entlang der Nord- und Südseite der Düne sind Ablagerungen von 10 cm bis 40 cm zu verzeichnen. Große Gebiete der östlichen Flanken sinken um mehr als 50 cm ab, die Flächen der gegenüberliegenden Seite hingegen um 10 cm bis 30 cm.

Die Volumenberechnung der Düne zeigt eine Gesamtabtragung von 243 m³ vom 15. Dezember 2017 (DGM 1) bis zum 21. März 2018 (DGM 5), was circa 20 % des gesamten Körpervolumens entspricht.

Wird die Häufigkeit der Windrichtungen und -stärken über den gesamten Untersuchungszeitraum betrachtet, wird deutlich, dass vor

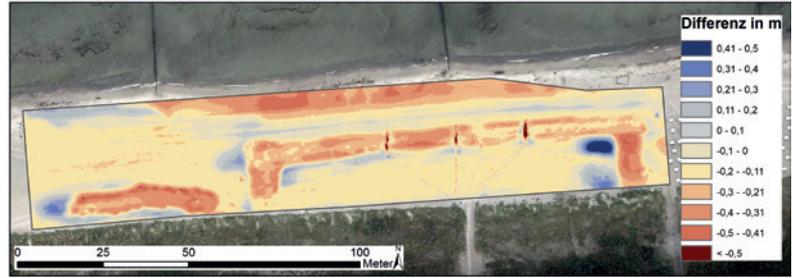


Abb. 11 | Differenzmodell des Untersuchungsgebiets abgeleitet aus DGM 4 und DGM 5

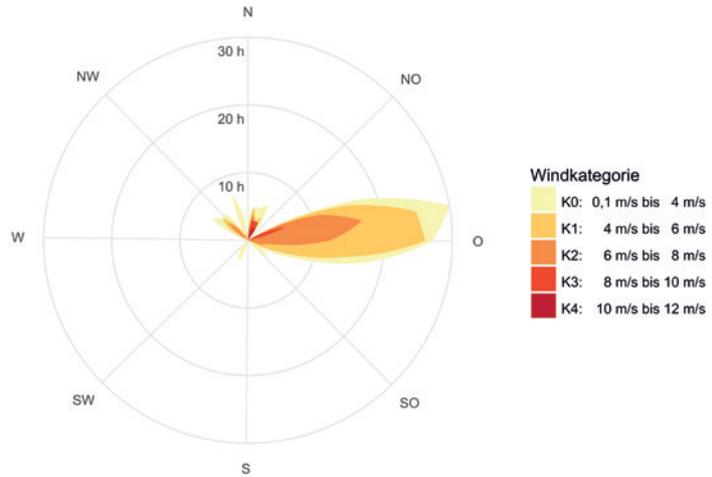


Abb. 12 | Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit der vierten Epoche vom DGM 4 zu DGM 5

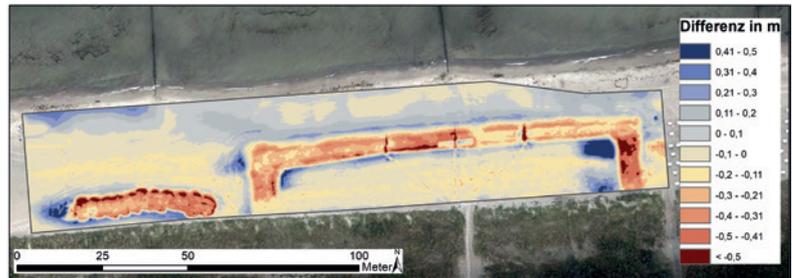


Abb. 13 | Differenzmodell des Untersuchungsgebiets abgeleitet aus DGM 1 und DGM 5

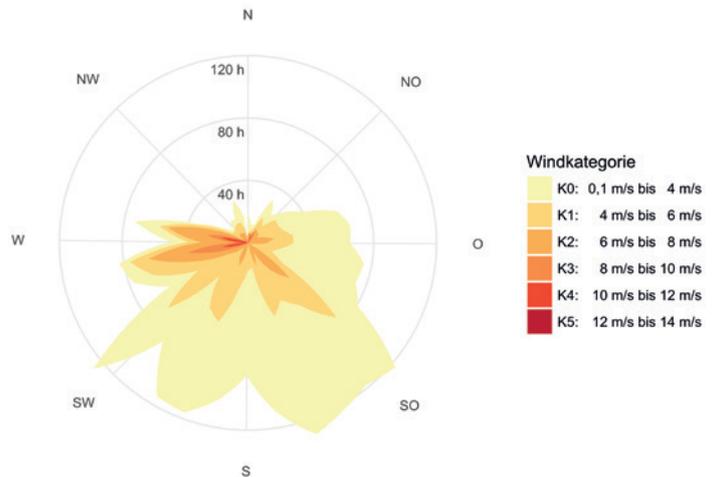


Abb. 14 | Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit, epochenübergreifend vom DGM 1 zu DGM 5

allem aus nördlicher Richtung kaum Winde über einen längeren Zeitraum mit hoher Geschwindigkeit wehten (Abb. 14). Dies trug womöglich auch zum Ausbleiben der erwarteten, für das Projekt relevanten Sturmflut bei (Abb. 6).

FAZIT

Die abgeleiteten Differenzmodelle zeigen im Allgemeinen hinsichtlich der Häufigkeit der dominierenden Windrichtung die erwarteten Erosions- und Sandablagerungstendenzen auf. In der ersten und dritten Epoche ist eine deutliche Sandablagerung vor der Versuchsdüne feststellbar. Deutlich ist in diesen Epochen die Verschiebung der Küstenlinie in Seerichtung zu erkennen, welche wahrscheinlich zum Ausbleiben einer zum Dünenbruch ausreichenden Sturmflut beigetragen hat. Für die ersten drei Epochen ist eine ähnliche Ausprägung der geringfügigen Erosion der Versuchsdüne feststellbar. In der zweiten Epoche führte der Nordwind als Wind mit höchster Windgeschwindigkeit zu Sandablagerungen überwiegend im Bereich der Dünenkanten bei gleichzeitig fast nicht vorhandener Erosion der Düne selbst. Trotz vergleichbarer Windintensitäten und Niederschlagsbedingungen zusätzlich gepaart mit Ostwind, dieser aber mit geringerer Stärke, kam es in der vierten Epoche zu großflächigen Erosionen der Düne und dem der Düne in Seerichtung vorgelagerten Gelände. Dieser Epoche ist der Großteil der Erosion der Versuchsdüne über den gesamten Untersuchungszeitraum zuzuordnen. Demgegenüber stehen die nur geringfügigen Erosionen in der ersten und dritten Epoche mit Starkregenereignissen Anfang Januar und Mitte März. Hohe Windgeschwindigkeiten oder hohe Niederschläge führen demnach nicht unmittelbar zu starken Erosionsprozessen.

Bei den ersten drei Epochen liegen die Anteile der Niederschlagsstunden an den Gesamtstunden der Epochen jeweils deutlich über dem der vierten Epoche. Dies ist als Indikator zu sehen, dass die häufigere Bodenbefeuchtung durch den Niederschlag in den ersten Epochen erosionshemmend gewirkt hat.

Der Prozess der Winderosion erfolgt gerichtet. Da die Erosions- und Sedimentationscharakteristik in vielen Fällen auf die dominierende Windrichtung zurückzuführen ist, wird deutlich, dass primär der Wind – und hier besonders der Wind aus Osten kommend – für die Dünenerosion verantwortlich ist und der Niederschlag nur ein sekundärer Einflussfaktor ist. Aufgrund der teils großen Zeitspannen zwischen den Befliegungen der Düne bleibt eine genauere Ursachenbestimmung für die Änderung der Dünengestalt in hinreichender Qualität nicht abschätzbar. Ein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen den Windverhältnissen und der vorherrschenden Dünenerosion und Sandablagerungen im Dünenumfeld ist dennoch feststellbar.

DANKSAGUNG

Die Verfasser danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung im Rahmen des Verbundprojekts PADO: „Prozesse und Auswirkungen von Dünendurchbrüchen an der deutschen Ostseeküste“ im Rahmen der Meeresforschung

(FKZ: O3F0760A). Zudem danken wir unseren Projektpartnern für die konstruktiven Diskussionen.

LITERATUR

Deutscher Wetterdienst (2018a): Wetter und Klima – Deutscher Wetterdienst – Leistungen – Qualitätsniveau der Klimadaten bei der Qualitätskontrolle. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/qualitaetsniveau.html?nn=16102>.

Deutscher Wetterdienst (2018b): Wetter und Klima – Deutscher Wetterdienst – Leistungen – Weiterführende Informationen zu den Klimadaten – Stundenwerte. https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/beschreibung_stundenwerte.html?nn=16102&lsblid=536016.

Deutscher Wetterdienst (2018c): KOSTRA DWD. https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/kostra_dwd_rasterwerte.html.

Deutscher Wetterdienst (2018d): Wetter und Klima – Deutscher Wetterdienst – Glossar – Starkregen. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html>.

Eitner, A.; Mulsow, C.; Maas, H.-G. (2013): Quantitative Measurement of Soil Erosion from TLS and UAV Data. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Band XL-1/W2, 119–124.

Kaehler, C. (2018): Probleme Versuchsdüne. Fehlendes Hochwasserereignis. PADO (unveröffentlicht).

Naumann, M.; Bill, R.; Niemeyer, F.; Nitschke, E. (2013): Deformation Analysis of Dikes Using Unmanned Aerial Systems (UAS). DredgDikes: Proceedings of the South Baltic Conference on dredged materials in dike construction. Rostock, Hohe Düne, 10.–11. April 2014.

Richter, A.; Faust, D.; Maas, H.-G. (2013): Dune cliff erosion and beach width change at the northern and southern spits of Sylt detected with multi-temporal Lidar. *Catena* 103(2013), 103–111.

Nils Koldrack

UNIVERSITÄT ROSTOCK
PROFESSUR FÜR GEODÄSIE
UND GEOINFORMATIK

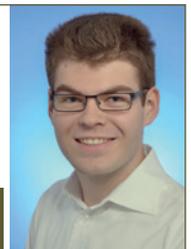
Justus-von-Liebig-Weg 6 | 18059 Rostock
nils.koldrack@uni-rostock.de



Patrick Postert

UNIVERSITÄT ROSTOCK
PROFESSUR FÜR GEODÄSIE
UND GEOINFORMATIK

Justus-von-Liebig-Weg 6 | 18059 Rostock
patrick.postert@uni-rostock.de



Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill

UNIVERSITÄT ROSTOCK
PROFESSUR FÜR GEODÄSIE
UND GEOINFORMATIK

Justus-von-Liebig-Weg 6 | 18059 Rostock
ralf.bill@uni-rostock.de



Manuskript eingereicht: 31.01.2019 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet