

# **Entwicklung und Evaluation eines Mess- und Auswerteverfahrens zur Bestimmung einer Sanddünenverformung unter Wind- und Welleneinfluss**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

der Universität Rostock

Eingereicht am 04.02.2020 von  
Nils Koldrack, geb. am 04.10.1987 in Rostock  
Verteidigt am 16.09.2020

## **Gutachter:**

Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill  
Universität Rostock, Professur für Geodäsie und Geoinformatik

Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff  
Universität Rostock, Professur für Geotechnik und Küstenwasserbau

Prof. Dr.-Ing. Boris Resnik  
Beuth Hochschule für Technik Berlin, Bauingenieur- und Geoinformationswesen

Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach  
RWTH Aachen, Geodätisches Institut

# Danksagung

Herzlichst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Ralf Bill bedanken, der mich nicht nur maßgeblich bei dieser Arbeit engagiert betreut und mit seinen konstruktiven Hinweisen unterstützt hat, sondern mich schon früh im Studium gefördert und entscheidend dazu beigetragen hat, dass ich wissenschaftlich tätig werden konnte.

Herrn Prof. Dr. Fokke Saathoff danke ich nicht nur für die fachlichen Diskussionen im Projekt, sondern auch dafür, dass er maßgeblichen Anteil für die Entstehung des Forschungsprojekt PADO hatte, welches der Grundstein für diese Dissertation war.

Für die Begutachtung der Arbeit danke ich Herrn Prof. Dr. Boris Resnik und Herrn Prof Dr. Jörg Blankenbach.

Besonders möchte ich mich bei Dr. Robert Wagner und Dr. Fiete Winter für das Korrekturlesen sowie die vielen guten Kommentare und Diskussionen und nicht zuletzt für die schöne Zeit während meiner Arbeit bedanken.

Matthias Naumann danke ich für die energische Hilfe bei jeglichen Messaufgaben, Andreas Schenkel und Enrico Daum für die informationstechnische Unterstützung, sowie der gesamten Arbeitsgruppe, die bei Fragen stets ein offenes Ohr hatte.

Bei unserer studentischen Hilfskraft Patrick Postert bedanke ich mich für seine wissenschaftliche Zuarbeit im Bereich der Kamerakalibrierung.

Neben meiner Familie, die mich tatkräftig unterstützt hat, möchte ich meinen größten Dank meiner Frau Lara aussprechen, die mir in allen Lebenslagen beisteht und mir täglich zeitliche Freiräume zum Arbeiten und Schreiben verschafft hat.

# Zusammenfassung

Eine große ingenieurwissenschaftliche Herausforderung besteht darin, die Bauwerke des Küstenschutzes für zukünftige Herausforderungen, wie z.B. durch den Klimawandel, zu ertüchtigen, denn im Zusammenhang mit dem Anstieg des Meeresspiegels müssen diese neu dimensioniert werden.

Die Dissertation stellt die Entwicklung einer Methode vor, ein Küstenbauwerk während einer Sturmflut temporal und räumlich hochauflösend zu vermessen. Die generierten Daten sollen zu wesentlichen Erkenntnissen über die Dünendynamik und das Verhalten von Dünen in Durchbruchsituationen beitragen. Damit soll das Bemessungskonzept für Dünen und kombinierte Küstenschutzsysteme verbessert werden. Hierfür wurde in zwei Untersuchungszeiträumen je ein für ein jährliches Sturmflutereignis bemessenes großmaßstäbliches Dünenbauwerk am Strand von Rostock-Warnemünde errichtet.

Im ersten Zeitraum wurde die Verformung des Dünenkörpers durch Wind und Niederschlag über ein halbes Jahr hinweg analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass primär der Wind für die Erosion der Düne verantwortlich war und der Niederschlag nur ein sekundärer Einflussfaktor war.

Im zweiten Untersuchungszeitraum wurde das Bauwerk durch ein auftretendes Hochwasser bis zum Versagen belastet und dabei durch eine umfangreiche Instrumentierung in Echtzeit überwacht. Mit einem 3D-Messkonzept, bestehend aus einem terrestrischen Laserscanner, Unmanned Aerial Vehicle und Kameras, konnte die Dünenoberfläche kontinuierlich vermessen werden. In den 16 Stunden, in denen die Düne durch das Hochwasser belastet war, erodierte der Dünenkörper um 68,82 %. Dabei entstanden in zwei Bereichen der Düne Breschen, durch die das Wasser in die Polderfläche eindringen konnte.

Ebenso wie die Dünendynamik sind die Mechanismen für den Sedimenttransport und die Ausbildung des strandnahen Profils bisher nur wenig erforscht. Für ein besseres Verständnis wurde die topographische Gestalt des Vorstrandes über Monate hinweg vermessen und Oberflächenveränderungen des Meeresbodens wurden analysiert. Die Untersuchungen zeigen einen ständigen Wandel der topographischen Gestalt des Vorstrandes.

Die gewonnenen Geodaten dienen unter anderem als Grundlage für die Kalibrierung numerischer Modelle, sowie für weiterführende Untersuchungen langfristiger Folgen eines Dünendurchbruchs für das Hinterland.

# Abstract

A major engineering challenge is to strengthen coastal protection structures to meet future challenges such as climate change, as they will have to be re-dimensioned in the context of sea-level rise.

The dissertation presents the development of a method to survey a coastal structure during a storm surge with high temporal and spatial resolution. The generated data should contribute to essential knowledge about dune dynamics and the behaviour of dunes in breakthrough situations. This should improve the design concept for dunes and combined coastal protection systems.

For this purpose, a large-scale dune structure dimensioned for an annual storm surge event was constructed on the beach of Rostock-Warnemünde in two investigation periods.

In the first period the deformation of the dune body by wind and precipitation was analysed over a period of half a year. The results show that wind is primarily responsible for the erosion of the dune and that precipitation is only a secondary factor.

In the second period, the structure was loaded to failure by an occurring flood and was monitored in real time by extensive instrumentation. Using a 3D measurement concept consisting of a terrestrial laser scanner, Unmanned Aerial Vehicle and cameras, the dune surface could be continuously surveyed. In the 16 hours during which the dune was loaded by the flood, the dune body eroded by 68,82 %. This created breaches in two areas of the dune through which the water could flow into the polder area. Just like dune dynamics, the mechanisms for sediment transport and the formation of the beach-like profile have been little studied. For a better understanding, the topographic shape of the foreshore has been surveyed over months and surface changes of the seafloor have been analysed. The investigations show a constant change in the topographic shape of the foreshore.

The obtained geodata serve, among other things, as a basis for the calibration of numerical models, as well as for further investigations of long-term consequences of a dune breakthrough for the hinterland.

# Abkürzungsverzeichnis

<b>ADCP</b>	Acoustic Doppler Current Profiler
<b>ATR</b>	Automatic Target Recognition
<b>AWAC</b>	Acoustic Wave and Current Profiler
<b>BSH</b>	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
<b>BHW</b>	Bemessungshochwasser
<b>BMBF</b>	Bundesministerium für Bildung und Forschung
<b>CKAN</b>	Comprehensive Knowledge Archive Network
<b>DGM</b>	Digitales Geländemodell
<b>DGPS</b>	Differentielles Globales Positionierungssystem
<b>DHM</b>	Digitales Höhenmodell
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>DOM</b>	Digitales Oberflächenmodell
<b>DOP</b>	Digitales Orthofoto
<b>DWD</b>	Deutscher Wetterdienst
<b>EAK</b>	Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzbauwerken
<b>EN</b>	Europäische Norm
<b>EVN</b>	Europäische Vornorm
<b>HY</b>	Professur für Hydrologie und angewandte Meteorologie
<b>GG</b>	Professur für Geodäsie und Geoinformatik
<b>GIS</b>	Geo-Informationssystem
<b>GK</b>	Professur Geotechnik und Küstenwasserbau
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GSD</b>	Ground Sample Distance
<b>IMK</b>	Internes Messnetz Küste
<b>IÖW</b>	Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH

<b>KüNO</b>	Küstenforschung Nord-Ostsee
<b>Lidar</b>	Light Detection and Ranging
<b>MLS</b>	Mobile Laser Scanning
<b>MV</b>	Mecklenburg-Vorpommern
<b>NHN</b>	Normalhöhennull
<b>OSM</b>	OpenStreetMap
<b>PADO</b>	Prozesse und Auswirkungen von Dünendurchbrüchen an der deutschen Ostseeküste
<b>StALU</b>	Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern
<b>RAAdOst</b>	Regionale Anpassungsstrategien für die deutsche Ostseeküste
<b>RTK</b>	Real Time Kinematic
<b>RWTH</b>	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
<b>TIN</b>	Triangulated Irregular Network
<b>TLS</b>	Terrestrischer Laserscanner
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle
<b>WSV</b>	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung . . . . .	2
1.2	Aufbau der Arbeit . . . . .	3
1.3	Stand der Forschung und Technik . . . . .	4
1.4	Küstenschutz an der südlichen Ostsee . . . . .	6
1.4.1	Landesküstenschutzdünen . . . . .	7
1.4.2	Landesküstenschutzdeiche . . . . .	8
1.4.3	Buhnen . . . . .	8
1.4.4	Ingenieurbiologische Bauweisen . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Projekt, Ziele und Versuchsdünen</b>	<b>10</b>
2.1	Das Projekt PADO . . . . .	10
2.2	Interessengebiete . . . . .	11
2.3	Untersuchungsgebiet Warnemünde . . . . .	11
2.3.1	Teiluntersuchungsgebiet Bathymetrie . . . . .	12
2.3.2	Teiluntersuchungsgebiet Düne . . . . .	13
2.3.3	Bemessung der Versuchsdünen . . . . .	14
2.4	Versuchsdünen . . . . .	16
2.4.1	Untersuchungszeitraum - Winter 2017/2018 . . . . .	16
2.4.2	Untersuchungszeitraum - Winter 2018/2019 . . . . .	17
2.5	Umweltdaten im Untersuchungsgebiet . . . . .	19
2.6	Forschungsdateninfrastruktur . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Messkonzept und Voruntersuchungen</b>	<b>22</b>
3.1	Messkonzept . . . . .	22
3.1.1	Messsystem . . . . .	22
3.2	Messgeräte . . . . .	24
3.2.1	Unmanned Aerial Vehicles . . . . .	24
3.2.2	Terrestrisches Laserscanning . . . . .	25
3.2.3	Kameras . . . . .	27
3.2.4	GNSS . . . . .	30
3.2.5	Tachymeter . . . . .	31
3.2.6	Acoustic-Doppler-Current-Profiler . . . . .	31
3.3	Messpfahl . . . . .	31
3.4	Messvorrichtung . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Parameter und Methodik</b>	<b>37</b>
4.1	Geometrische Modelle . . . . .	37
4.2	UAV-Parameter . . . . .	38

4.3	Laserscanparameter . . . . .	39
4.4	Videoparameter . . . . .	40
4.5	Optischer Fluss zur Bewegungsfeldgenerierung . . . . .	40
4.6	Punktwolkenverarbeitung mit Cloud Compare . . . . .	41
4.7	Geo-Informationssysteme zur Datenanalyse und Visualisierung . . . . .	41
4.8	Visuelle Auswertung der Videoaufnahmen . . . . .	42
4.9	Bathymetrie-Daten . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>45</b>
5.1	Teiluntersuchungsgebiet Düne Saison 2017/2018 . . . . .	45
5.2	Teiluntersuchungsgebiet Düne Saison 2018/2019 . . . . .	53
5.2.1	Randbedingungen . . . . .	53
5.2.2	Breschenentwicklung . . . . .	56
5.2.3	Dünenabschnitt Ost . . . . .	57
5.2.4	Dünenabschnitt Mitte . . . . .	62
5.2.5	Dünenabschnitt West . . . . .	66
5.2.6	Dünenerosion - Volumenbestimmung . . . . .	69
5.2.7	Videoauswertung . . . . .	70
5.3	Teiluntersuchungsgebiet Bathymetrie . . . . .	74
5.3.1	Untersuchungszeitraum 2017 . . . . .	74
5.3.2	Untersuchungszeitraum 2018 . . . . .	78
5.3.3	Sturmflutbedingte Meeresbodenveränderung . . . . .	82
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>83</b>
6.1	Teiluntersuchungsgebiet Düne Saison 2017/2018 . . . . .	83
6.2	Teiluntersuchungsgebiet Düne Saison 2018/2019 . . . . .	83
6.3	Teiluntersuchungsgebiet Bathymetrie . . . . .	85
6.4	TLS-Daten . . . . .	86
6.5	Gleichgewichtsprofil . . . . .	89
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>91</b>
	<b>Literatur</b>	<b>93</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>104</b>



## Kapitel 1

# Einleitung

Zunehmend in den Fokus der gesellschaftlichen Debatte ist das Thema des anthropogenen Klimawandels gerückt. Die globale Erwärmung und die damit unmittelbar verbundenen Folgen treten deutlicher in Erscheinung. Die Folgen sind ein steigender Meeresspiegel, das Auftreten von Extremwetterereignissen und Sturmflutphänomenen, auf die insbesondere die Verantwortlichen für den Küstenschutz reagieren müssen. Im gesamten 18. Jahrhundert erhöhte sich der Meeresspiegel weltweit um 2 cm, im 19. Jahrhundert hingegen um 6 cm (Grinsted et al., 2010). Messungen seit 1993 zeigen, dass der Meeresspiegel aktuell jährlich um 3,3 mm steigt. Wenn der antarktische Schild weiterhin so viel Eis verliert und die Kohlenstoffdioxidemissionen nicht dramatisch sinken, könnte bis zum Jahr 2100 das Wasser im globalen Durchschnitt um bis zu 1,1 m ansteigen (IPCC, 2019). Daraus ergeben sich für die tiefer liegenden Küstenzonen neue Herausforderungen. Hierzu gehören zum einen die Erosion von Küstengebieten und zum anderen ein höheres Auflaufen von Sturmfluten und die damit verbundene mögliche Versalzung von Grundwasser durch das Eindringen von Meerwasser. Dabei hängt die Gefährdung nicht zuletzt von den Küstenformen ab. Steile Felsküsten sind durch Erosion weniger gefährdet als sandige Küsten. Flache Küsten und Deltagebiete sind daher besonders Gefahren ausgesetzt und darüber hinaus bevorzugte Siedlungsgebiete.

Die durch Sturmfluten verursachten Überschwemmungen des besiedelten Küstenraums stellen eine stetige Gefahr für Küstenbewohner dar. Allein an der deutschen Ostseeküste können bis zu 89 000 Menschen von extremen Sturmfluten betroffen sein (Ostsee-Zeitung, 2019).

Entlang der Ostseeküste werden erst durch den Küstenschutz soziale und wirtschaftliche Nutzungen in den Küstenniederungen ermöglicht bzw. können langfristig nur unter der Voraussetzung eines funktionierenden Küstenschutzes stattfinden. Bedingt durch die unterschiedlichen Rahmenbedingungen und die von Region zu Region abweichende Geschichte der Sturmflutkatastrophen gibt es heute unterschiedliche Küstenschutzstrategien in den betroffenen Ländern (Hofstede et al., 2009). An der deutschen Ostseeküste eingesetzte Hochwasserschutzbauwerke sind Hochwasserschutzdünen, Deiche, Hochwasserschutzmauern und Verwallungen. Hinzu kommen weitere technische Vorsorgeeinrichtungen wie Küstenschutzdünen, Bühnen, Wellenbrecher, Ufermauern, Deckwerke und Sandaufspülungen (Koppe, 2002).

Aufgrund der hohen Bedeutung des Küstenschutzes in Zusammenhang mit dem Anstieg des Meeresspiegels ist es von enormer Wichtigkeit, diese Bauwerke zu ertüchtigen.

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Bis Mitte des 20. Jahrhunderts waren Dünen häufig das einzig vorhandene Mittel gegen die Folgen von Sturmfluten an der Ostseeküste. Um die Schutzwirkung von Dünen, insbesondere vor dem Hintergrund der durch den Klimawandel zu erwarteten Zunahme von Extremereignissen, prognostizieren und planen zu können, ist es erforderlich, sowohl die Prozesse der Dünenerosion und des Dünendurchbruchs, als auch die dem Dünendurchbruch nachfolgenden Überflutungsprozesse zu verstehen. Denn trotz weltweiter Küstenforschung fehlt es bislang an belastbaren Aussagen, wie eine Düne im Belastungsfall bricht, wie Polderflächen durch eine Dünenbresche geflutet werden und wie sie sich nach Absinken einer Hochwasserwelle entleeren. Unbekannt ist auch, wie der Bemessungsseegang für dahinter liegende Deiche durch das überströmte Dünensystem beeinflusst wird. Existierende Dünenerosionsmodelle lösen diese Fragestellungen nicht zufriedenstellend, was nicht zuletzt auf die geringe empirische Datenlage zurückzuführen ist (Saathoff, 2016).

In der Praxis sollte eine Vollschuttdüne grundsätzlich sofort nach einem Extremereignis wiederhergestellt werden, was durch die derzeitige rechtliche Situation bezüglich der marinen Sandlagerstätten verzögert werden kann. In der Folge könnte eine zweite Sturmflut vor der Instandsetzung (Bsp. 1872/74, 1913/14) zu einem Durchbruch führen. Die Standsicherheit des Sicherheitsteils der Düne ist ebenfalls unbekannt. System-schuttdünen werden daher so bemessen, dass sie im Extremfall vollständig erodieren und der dahinterliegende Deich Seegang und Hochwasser zurückhält. Allerdings ist die tatsächlich anzusetzende Belastung z.B. für die regelmäßigen Überprüfungen der Bemessungswasserstände und Wellenbelastungen durch die für die Deiche an der deutschen Ostseeküste zuständigen Behörden nicht bekannt. Im Kontext des Klimawandels besteht daher die Notwendigkeit, die existierenden Annahmen für die Dünendimensionierung neu zu bestimmen (StALU, 2009).

Um diese wesentlichen Erkenntnisse zur Dünendynamik und zum Verhalten von Dünen in Durchbruchssituationen zu gewinnen, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zwei für ein jährliches Sturmflutereignis bemessene Dünenbauwerke am Strand von Warnemünde dimensioniert und in zwei Zeiträumen großmaßstäblich errichtet.

Aus Sicht der Geoinformatik soll eine ereignisgesteuerte Methode entwickelt werden, die mit einer umfangreichen Instrumentierung und Vermessung wesentliche Prozesse an dieser Versuchsdüne während einer Sturmflut im Realmaßstab erfasst, um so den Prozess, wie sich eine Bresche in einer Sanddüne während einer Sturmflut in Längs- und Querrichtung entwickelt, zu dokumentieren. Des Weiteren sollen natürliche Erosionseffekte an einer Forschungsdüne über eine Wintersaison hinweg erforscht werden, um so den Einfluss von rauen Wetterverhältnissen zu analysieren.

Um bei einem Sturmflutereignis die Schuttdüne kontinuierlich zu vermessen, wurde eine Fusion der beiden Verfahren terrestrisches Laserscanning und Kamerasysteme konzipiert. Die Hauptkomponente besteht aus einer ereignisbezogenen Oberflächenvermessung mit einem terrestrischen Laserscannern (TLS). Da der Laserscanner nicht dafür ausgelegt ist, unter dem Einfluss derart extremer Bedingungen zu messen, ist es notwendig, eine Schutzhülle zu entwickeln, die den äußeren Einflüssen einer Sturmflut standhält.

Die Mechanismen für den Sedimenttransport und die Ausbildung des strandnahen Profils sind bisher nur wenig erforscht. Darüber hinaus ist die Datengrundlage von Bathymetrien meist nicht aktuell. Für ein besseres Verständnis der Veränderungen der topographischen Gestalt des Meeresbodens über die Zeit ist es somit notwendig, die Seegrundbeschaffenheit des Vorstrandes regelmäßig zu erfassen. Diese Daten werden als Basis für den Aufbau von numerischen Modellen für die Untersuchung des Einflusses der Veränderungen der topographischen Gestalt des Meeresbodens auf die sturmflutbedingte Dünenerosion eingesetzt.

Die folgende Arbeit setzt an der Entwicklung und Evaluation einer Methode zur ganzheitlichen Erfassung von Erosion (fluvial und äolisch) sowie zur Dynamik eines Dünen durchbruchs infolge einer Sturmflut am Beispiel eines großmaßstäblichen Küstenschutzbauwerks an. Die erzeugten Daten sollen die Basis für die Kalibrierung numerischer Modelle bilden, um neue Grundlagen für ein neues integriertes Bemessungskonzept für Küstenschutzbauwerke zu generieren.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Um die strukturierte Herangehensweise bei den Versuchen auch in der Dokumentation darzustellen, wird im Folgenden der Aufbau der Arbeit umrissen. Einführend wird in Abschnitt 1.3 eine Zusammenfassung über den Stand der aktuellen Forschung im Zusammenhang mit der Vermessung von Küstenschutzbauwerken gegeben. Im Abschnitt 1.4 wird ein Überblick über den Küstenschutz an der südlichen Ostsee gegeben und auf die Küstenschutzaktivitäten in der Geschichte Mecklenburg-Vorpommerns eingegangen. Darüber hinaus werden in den Unterabschnitten 1.4.1 bis 1.4.4 typische Bauwerksarten näher erläutert.

Im Abschnitt 2.1 wird das Projekt PADO vorgestellt, in dessen Rahmen diese Arbeit erstellt wurde. Die für das Projekt relevanten Standorte werden im Abschnitt 2.2 präsentiert. Im anschließenden Abschnitt 2.3 wird das Untersuchungsgebiet Warnemünde vorgestellt, in welchem die Versuchsdünen (Abschnitt 2.4) errichtet wurden. Eine essentielle Grundlage für die späteren Analysen sind die Umweltdaten, die von verschiedenen Behörden zur Verfügung gestellt werden. Diese sind im Abschnitt 2.5 aufgezeigt. Die für das Projekt entwickelte Dateninfrastruktur (Abschnitt 2.6) stellt die generierten Forschungsdaten langfristig bereit.

Das Messkonzept und die nötigen Voruntersuchungen zur Vorbereitung der Messkampagne werden in Kapitel 3 vorgestellt. Das Messkonzept (Abschnitt 3.1) wird dabei in ein periodisches Monitoring (Unterabschnitt 3.1.1), welches das Untersuchungsgebiet wiederkehrend vermisst und in ein dynamisches Eventmonitoring, das ereignisbezogen die Oberflächenvermessung durchführt, unterteilt. Anschließend werden die dafür nötigen Messkomponenten näher erläutert (Abschnitt 3.2). Um die Versuchsdüne während einer Sturmflut vermessen zu können, musste die Messvorrichtung (Abschnitt 3.4) auf einem Messpfahl (Abschnitt 3.3) installiert werden, der so ausgerichtet wurde, dass der gesamte Dünenkörper erfasst werden konnte.

Während der Messkampagne wurde eine Vielzahl von Daten generiert. Im Kapitel 4 wird auf die Parameter der einzelnen Messkomponenten eingegangen und der Prozess der Datenaufarbeitung und Datenverarbeitung erläutert.

Die Ergebnisse werden im Kapitel 5 präsentiert. Nachdem die Veränderung der Versuchsdüne über fast ein halbes Jahr analysiert wurde (Abschnitt 5.1), wird in Abschnitt 5.2 eine Analyse zur Deformation der Versuchsdüne während einer Sturmflut durchgeführt. Der Fokus der Auswertung liegt dabei auf der Erosion des Dünenkörpers aufgrund des steigenden Wasserspiegels und durch Sog- und Wellenschlag. Ein weiteres Hauptaugenmerk liegt darüber hinaus auf der Herausbildung von Breschen an zwei verschiedenen Bereichen der Versuchsdüne während der Sturmflut (Unterabschnitt 5.2.2).

Gefolgt werden die Ergebnisse von der kritischen Betrachtung und Diskussion derselbigen (Kapitel 6). Im Mittelpunkt steht die Durchführung der Messkampagne mit den aufgenommenen Messdaten. Die TLS-Daten werden dabei auf Messfehler geprüft (Abschnitt 6.1). Darauf folgt ein Vergleich der Messdaten mit theoretischen Gleichgewichtsprofilen (Abschnitt 6.2).

Beendet wird der Hauptteil mit der Zusammenfassung und einem Ausblick (Kapitel 7).

### 1.3 Stand der Forschung und Technik

Nach bisherigem Forschungsstand ist nicht ausreichend bekannt, wie eine Düne im Belastungsfall durch eine Sturmflut erodiert und bricht. Weiterhin bestehen Wissensdefizite darüber, wie Polderflächen durch eine Dünenbresche geflutet werden und wie sie sich nach Absinken der Hochwasserwelle wieder entleeren (Saathoff, 2016). Im Folgenden werden Ansätze präsentiert, wie der Prozess der Erosion von Küstenschutzbauwerken mithilfe geodätischer Methoden messtechnisch erfasst und mithilfe theoretischer Grundlagen zur Beobachtung von Deformationen beschrieben werden kann.

Łabuz (2016) vergleicht die Nutzung von verschiedenen Vermessungsmethoden wie optische Messungen, TLS und DGPS-Werkzeugen (Differentielles Globales Positionierungssystem) in Bezug auf morphologische Langzeituntersuchungen, die seit 1997 an der polnischen Ostseeküste periodisch durchgeführt werden. Die Vermessungsmethoden sowie deren Charakteristika und Genauigkeit werden untereinander verglichen und ausgewertet. Die Reliefdynamik des Untersuchungsgebiets der jeweiligen Jahre wird analysiert und die Veränderungen dargestellt.

Andrews et al. (2002) untersuchten an den Outer Banks von North Carolina ein  $150\text{ m} \times 40\text{ m}$  großes Gebiet über einen Zeitraum von einem Jahr zwischen Mai 1997 und Mai 1998, um die topographische und volumetrische Veränderung eines Küstendünensystems mit verschiedenen GIS-Analysen (Geo-Informationssystem) nachzuweisen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Dünensystem aufgrund von Sturmaktivitäten erodiert und der Volumenverlust teilweise durch die Akkumulation an der Rückseite der Primärdüne kompensiert wird.

Donker et al. (2018) testeten die Anwendbarkeit eines mobilen Laserscanners (MLS) für die Messung der Veränderung in der Vordünen-Topographie. Das Dünensystem wurde an einem  $3,5\text{ km}$  langen Strandabschnitt mit einem fahrzeugmontierten MLS-System mit integrierter Trägheitsnavigation 13-mal über einen Zeitraum von zwei Jahren aufgenommen. Die Resultate zeigen, dass das Dünenvolumen mit einer Genauigkeit von  $0,25\text{ m}^3/\text{m}$  bestimmt werden konnte. Gebiete, in denen die Dünen von

Strandhafer bedeckt sind, wurden von der Analyse jedoch ausgeschlossen, da es die hohen Pflanzen dem MLS unmöglich machten, den Boden zu scannen.

Den Einfluss verschiedener Arten von Küstenvegetation auf die Genauigkeit von Lidar-Höheninformationen (Light Detection and Ranging) untersucht Göpfert (2006). Hierfür werden terrestrische Kontrollmessungen mit den Lidar-Daten verglichen. Ausgehend von den Höhenunterschieden wird der Einfluss verschiedener Vegetationsattribute, z.B. Pflanzenart, Höhe und Dichte analysiert. Dabei wird deutlich, dass die Genauigkeit stark von den jeweiligen Vegetationstypen abhängt. Für das üblicherweise gepflanzte Strandgras werden beispielsweise Höhenverschiebungen von 19,3 cm festgestellt.

Welchen Einfluss eine dichte Vegetation im Uferbereich auf die Generierung von Geländemodellen aus TLS-Daten hat, erläutern Grenzdörffer und Beyer (2018). Hierbei ist die korrekte Unterscheidung in Boden- und Nichtbodenpunkte maßgeblich von der Bestandsdichte und der Entfernung vom Laserscanner abhängig.

Mittels multitemporaler Lidar-Daten untersuchen Richter et al. (2013) die geomorphen Veränderungen in Bezug auf die Dünendetektion und Strandbreitenmessung an den nördlichen und südlichen Nehrungen sowie an der Westküste von Sylt. Seit 1999 werden jährlich die Küstenabschnitte der Insel vermessen, um das Potenzial der Laserdaten zur Beschreibung und Erklärung der Veränderungen zu nutzen. Die langjährigen Untersuchungen zeigen signifikante Einschnidungen in die Dünen und Klippenverschiebungen.

Wie sich eine Düne bei Sturm- und Hurrikanbedingungen verändert, modellieren Roelvink et al. (2009). Es wird in Querschnitten gezeigt, wie der Sand einer Düne während eines Hochwassers erodiert und der Dünenkörper neu geformt wird.

Roelvink et al. (2009) validierten Modellierungsergebnisse mit Daten von Feldmessungen zur Dünendeformation von Jiménez et al. (2007). Auch hier werden Querschnitte zur Visualisierung genutzt, wie sich der Dünenkörper während eines Hochwassers verformt und erodiert. Dem werden die Resultate der numerischen Modellierung gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die in *XBeach*, einer Modellierungssoftware für u.a. Wellenausbreitung, Sedimenttransport und morphologische Veränderungen, berechneten Profiländerungen weitgehend mit den Messdaten zur Beschreibung der Dünenentwicklung übereinstimmen.

Analog dazu analysierten Bugajny et al. (2013) den Sturmfluteinfluss an Strand- und Dünenmorphologie im sandigen Gebiet der Dziwnow-Nehrung im westlichen Teil der polnischen Ostseeküste. Ebenso wurden die *XBeach*-Modellierungen mit den gemessenen Küstendaten verglichen. Dabei wird aufgezeigt, dass das Modell mit den Messdaten überwiegend übereinstimmt und die Modellierung ein effektives Werkzeug für mögliche Gefahrenvorhersagen sein kann.

Im Beitrag von van Rijn (2009) werden Ergebnisse der experimentellen und mathematischen Modellierungen der Strand- und Dünenerosion unter Sturmereignissen vorgestellt. Die durch den Wellenaufprall verursachte Dünenerosion wurde durch ein Cross-Shore-Profilmodell (CROSMOR-Modell) modelliert, das auf einem „Welle für Welle“-Modellierungsansatz basiert, der die Wellenenergiegleichung für jede einzelne Welle löst. Die einzelnen Wellen sollten so lange laufen, bis ein empirisches Kriterium für das Brechen erfüllt ist. Die Ergebnisse des mathematischen Modells wurden zur Entwicklung einer neuen Dünenerosionsregel (DUNERULE-Modell)

verwendet. Diese Dünenerosionsregel schätzt die Dünenerosion in Bezug auf einen Basis-Referenzfall, der einen Sturm von fünf Stunden Dauer mit einer konstanten Wellenhöhe simuliert. Die Dünenerosion nimmt ab, wenn jeweils kleinere Sturmflutpegel, Wellenhöhen, Wellenperioden, kürzere Sturmdauern und grobkörniger Sand auftreten. Darüber hinaus wird im Modell aufgezeigt, dass je kürzer die Sturmdauer ist, desto mehr Material im Bereich des Dünenfußes abgelagert wird.

Um Deformationen von aufgeschütteten Buhnen quantitativ zu beschreiben, entwickelten Tschirschwitz et al. (2016) ein TLS-Monitoringsystem. Mit diesem System ist eine hochfrequente, automatische und flächenhafte Erfassung und Auswertung von Verformungen an Wasserbauwerken möglich. Der Kern des Messsystems ist ein IMAGER 5010 Laserscanner von Zoller + Fröhlich. Um das Monitoringsystem über viele Monate betreiben zu können, war ein wetterfestes Gehäuse, welches auf einem 12 m hohen Messpfahl installiert wurde, notwendig. Die Messzeitpunkte wurden auf Basis der vorkalkulierten Zeitpunkte für das Niedrigwasser der Elbe festgelegt. 30 Minuten vor und 10 Minuten nach Niedrigwasser wurde der freigelegte Buhnenkörper jeweils vier Mal gescannt. Dadurch wurden Deformationen im Bereich einiger Dezimeter an den Buhnen nachgewiesen.

Naumann et al. (2014b) analysierten die an einem bewachsenen Deichbauwerk innerhalb eines Jahres aufgetretenen Verformungen. Für die Datenaufnahme bei diesem Verfahren kamen neben zwei UAV (Unmanned Aerial Vehicle) auch ein terrestrischer Laserscanner zum Einsatz.

Ebenso haben Naumann et al. (2014a) untersucht, ob die mittels UAV erzeugten photogrammetrisch ausgewerteten Bilddaten geeignet sind, digitale Oberflächenmodelle (DOM) zu generieren, mit denen der Nachweis von Formänderungen von Küstenbauwerken über die Zeit gelingen kann. Zusätzlich wurde analysiert, inwieweit TLS und UAV vergleichbare Ergebnisse erbringen, bzw. in welchen Situationen dies nicht der Fall ist, bspw. aufgrund der Sicht- und Schnittbedingungen.

Newe (2013) erstellte ein Dünenabbruchmodell, welches auf den Abschätzungen der Abbruchmengen der Theorien von Bruun (1954) bzw. Dean (1977) basiert, wonach sich ein Strandprofil bei konstantem Wasserstand und gleichbleibenden Seegangbedingungen im Laufe der Zeit einem Gleichgewichtsprofil der Form  $h = Ax^{2/3}$  annähert (Abbildung 1.1). Dabei bezeichnet  $h$  die Wassertiefe im Abstand  $x$  von der Küstenlinie.  $A$  ist der Gleichgewichtsprofilparameter, dessen Wert von den Korngrößenverteilung des vorhandenen Sediments abhängig ist.

## 1.4 Küstenschutz an der südlichen Ostsee

Küstenschutzaktivitäten an der südlichen Ostsee sind seit dem 15. Jahrhundert überliefert. Zumindest seit dieser Zeit wurden die Dünen als Schutzwall vor Sturmfluten genutzt. Lange wurde mit unterschiedlichen Pflanzen zur Befestigung des Strandsandes experimentiert. Im 18. Jahrhundert setzte sich die Bepflanzung der Dünen mit Strandhafer durch. Auch Uferbefestigungen wie Pfahlwände und Buhnen wurden bereits vor der Sturmflut von 1872 oft gebaut. Der ihnen zugeordneten Aufgabe, den Küstenrückgang aufzuhalten, waren sie aber kaum gewachsen. Meist wurden sie bereits nach kurzer Zeit durch Sturmfluten wieder zerstört (Kramer und Rohde, 1992).

Erst nach der verheerenden Sturmflut von 1872 kam es an der deutschen Ostseeküste

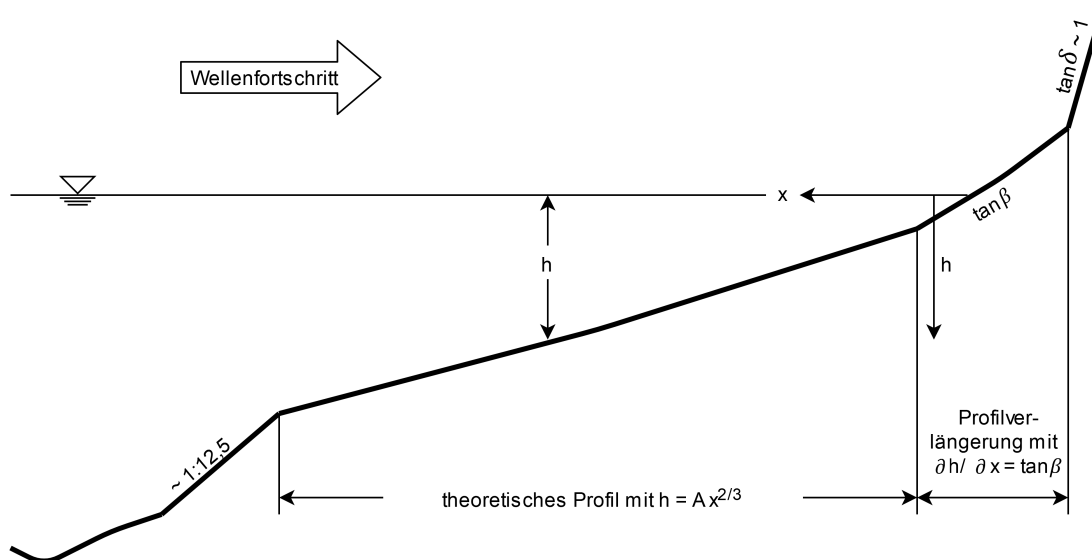


ABBILDUNG 1.1: Gleichgewichtsprofil nach Bruun (1954) bzw. Dean (1977).

zu einer deutlichen Intensivierung der Küstenschutzaktivitäten und auch zu neuen funktionellen Lösungen. Sowohl im damals zu Preußen gehörenden Vorpommern, als auch in Mecklenburg, wurde mit dem Bau von Deichen begonnen. Sie wurden gebaut, um bei schweren Sturmfluten Küstenliniendurchbrüche zu verhindern und das Hinterland vor Überflutungen zu sichern. Damit ergänzten sie die Dünen, deren Leistungsfähigkeit als nicht mehr ausreichend eingeschätzt wurde. Seit Anfang des 20. Jahrhunderts, insbesondere nach der Sturmflut von 1904, wurden verstärkt Steinwälle gebaut, wie z.B. vor Neuendorf (Hiddensee), am Süd- und Nordperd (Rügen) oder auf der Greifswalder Oie. Sie sollten, ähnlich wie Pfahlwerke, den Küstenrückgang von Steilufern und Dünen aufhalten. Daneben kam es insbesondere entlang der vorpommerschen Boddenküste im Bereich von landwirtschaftlich genutzten Küstenüberflutungsstandorten zum Bau von Sommerdeichen. Zum Teil wurden diese Standorte bereits durch Windschöpfwerke entwässert (Jeschke, 2003). Auf die einzelnen Bauwerksarten wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

#### 1.4.1 Landesküstenschutzdünen

Küstenschutzdünen werden als Sturmflutschutzanlage an der südlichen Ostseeküste eingesetzt. Unterschieden werden nach ihrer Funktion Systemschutzdünen und Vollschutzdünen. Systemschutzdünen gewährleisten den Sturmflutschutz nur in Kombination mit anderen Bauwerken für den Küstenschutz, wie z.B. Ufermauern oder Deichen. Im Gegensatz zu den Vollschutzdünen ist ihre Dimensionierung geringer und sie können bei schweren Sturmfluten überspült werden. Für den Schutz gegen die Überflutung des Hinterlandes müssen die landwärtigen Schutzbauwerke sorgen. Dagegen müssen die Vollschutzdünen so dimensioniert sein, dass sie alleine den Sturmflutschutz gewährleisten, sodass sie auch bei schwersten Sturmfluten nicht vollständig abgetragen werden. Sie bestehen prinzipiell aus einem Verschleiß-, einem Reserve- und einem Sicherheitsteil (Abbildung 1.2) (StALU, 2009).

Der Verschleißteil wird durch das normale Sturmflutgeschehen umgeformt und liefert

so Sand für Strand, Schorre (eine flach zum Meer hinabfallende, von Brandung geformte Fläche in der Uferzone eines Meeres) und den Sedimenttransport. Wenn dieser Teil vollständig abgetragen ist, besteht akuter Handlungsbedarf zur Verstärkung der Düne. Die Dimension des Verschleißteils bestimmt somit den Zeitabstand zwischen den erforderlichen Wiederholungsaufspülungen, um den Dünenkörper wiederherzustellen. Der Reserveteil wird so dimensioniert, dass er das Volumen besitzt, das durch die Bemessungssturmflut umgelagert wird. Landseitig schließt an ihn der Sicherheitsteil an, der verhindern soll, dass die Sturmflut nach der Umlagerung des Reserveteils die Düne überspült und das Hinterland erreicht.

Aktuell übernehmen an der Küste von Mecklenburg-Vorpommern (MV) Vollschutzdünen auf circa 60 km Länge den Schutz gegen Sturmfluten. Dies entspricht etwa 20 % der Außenküste von MV. Systemschutzdünen sind dagegen auf ungefähr 46 km der Küstenstrecke vorhanden. Um die negative Sedimentbilanz an Landesküstenschutzdünen auszugleichen, werden jährlich rund 500 000 m<sup>3</sup> Sand benötigt (StALU, 2009).

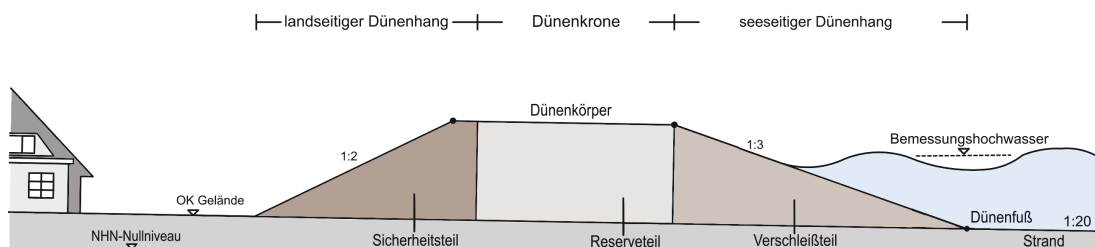


ABBILDUNG 1.2: Schema eines Regelprofils einer Vollschutzdüne nach StALU (2009).

## 1.4.2 Landesküstenschutzdeiche

Landesküstenschutzdeiche sind künstlich aufgeschüttete Erddämme an Außen- und Boddenküsten, um primär zusammenhängend bebaute Gebiete und landwirtschaftliche Nutzflächen zu schützen. Die Dimensionierung des Deiches ist vom örtlich geltenden Bemessungshochwasser (BHW), der Höhe des Wellenaufbaus sowie den Vorlandverhältnissen abhängig. Insgesamt sind in Mecklenburg-Vorpommern 218 km der Küste mit Küstenschutzdeichen gesichert.

## 1.4.3 Buhnen

Seewärts gerichtete Querbauwerke werden Buhnen genannt. Sie sollen den uferparallelen Sedimenttransport einschränken. Durch die Strömungsberuhigung wird die Akkumulation von Sand im Buhnenfeld unterstützt. Dadurch verringert sich die Wassertiefe und ein Teil der Wellenenergie wird bereits vor dem Erreichen der Küste umgeformt. Somit dienen sie der Stabilisierung der Uferlinie. Auf 79 km Küstenlänge in Mecklenburg-Vorpommern haben sich vor allem einreihige Holzpfahlbuhnen etabliert. Dies entspricht circa 21 % der gesamten Außenküstenlänge. Für den Bau werden bohrwurmresistente Harthölzer aus den Tropen verwendet, wie z.B. Acariquara und Eukalyptus rostrata (StALU, 2009).



#### **1.4.4 Ingenieurbiologische Bauweisen**

Unter ingenieurbiologischen Bauweisen werden generell biologisch ausgerichtete Bauweisen verstanden, die für alle Erd- und Wasserbauverfahren zur Oberflächen-sicherung dienen. Die Ingenieurbiologie ist ein Arbeitsgebiet des Naturschutzes mit der Zielsetzung, durch Bauverfahren mit Pflanzen als lebende Baustoffe Nutzungen zu fördern und sie im Sinne der Naturschutzgesetzgebung umweltverträglich zu gestalten (Bloemer, 2012). Für den Küstenschutz in Mecklenburg-Vorpommern kommen vorwiegend die beiden nachfolgenden Maßnahmen zum Einsatz.

##### **Strandhafer**

Die Bepflanzung der Landesküstenschutzdünen mit Strandhafer ist ein unverzichtbarer Bestandteil des Küstenschutzes. Sie verringert die durch Winderosion abgetragenen Sandmengen und damit auch die Sandverwehungen ins Hinterland. Ebenso fördert sie die Anlagerung von Sand und somit das Wachstum der Düne und erhöht durch die Verwurzelung die innere Stabilität der Deckschicht und dadurch den Abtragungswiderstand bei Sturmflut (MBLU, 1993). Darüber hinaus wird mit der Bepflanzung die natürliche Besiedlung durch standorttypische Tierarten gefördert, wie z.B. Vögel und Gliederfüßer (Athropoden).

##### **Küstenschutzwald**

Die primäre Aufgabe der Küstenschutzwälder ist der Schutz des Hinterlandes vor Schäden auf landwirtschaftlichen Nutzflächen und in Siedlungsbereichen sowie vor Sandeinwehungen von Düne und Strand. Sie dienen der Verbesserung des Mikroklimas und des Dünenbodens durch Humusanreicherung. Ein weiterer positiver Effekt ergibt sich aus der intensiven und tiefen Durchwurzelung durch die Vegetation und der damit verbundenen mechanischen Festigung des Bodens.

## Kapitel 2

# Projekt, Ziele und Versuchsdünen

### 2.1 Das Projekt PADO

Um die Schutzwirkung von Dünen, insbesondere vor dem Hintergrund der durch den Klimawandel zu erwarteten Zunahme von Extremereignissen, prognostizieren und planen zu können, ist es erforderlich, sowohl die Prozesse der Dünenerosion und des Dünendurchbruchs als auch die dem Dünendurchbruch nachfolgenden Überflutungsprozesse zu verstehen. Dieses Ziel hat sich das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Verbundprojekt „Prozesse und Auswirkungen von Dünendurchbrüchen an der deutschen Ostseeküste“ (PADO) gestellt, welches von der Professur Geotechnik und Küstenwasserbau (GK) initiiert und geleitet wurde (PADO, 2019c). PADO ist eines von zwölf Verbundprojekten im Förderschwerpunkt „Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee“ (KüNO) und wird von drei Forschungseinrichtungen (Universität Rostock mit den Professuren GK, Hydrologie und Angewandte Meteorologie (HY) und Geodäsie und Geoinformatik (GG), Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH (IÖW)) sowie drei assoziierten Partnern (Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg (StALU MM), Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein, Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V.) bearbeitet. Im Mittelpunkt des Projekts stehen vier Arbeitspakete, die von fünf Partnern gemeinsam bearbeitet werden:

- i In einem großmaßstäblichen Feldexperiment werden die Versagensmechanismen von Sanddünen am Ostseestrand untersucht (GK). Hierfür wird ein 3D-Messkonzept für die Oberflächenbeschreibung einer Versuchsdüne unter Beanspruchung im Genauigkeitsbereich von wenigen Millimetern entwickelt (GG).
- ii Bei der numerischen Analyse von Dünendurchbrüchen und Überflutungen wird mit Hilfe des Open-Source-Programmes *XBeach* die sturmflutbedingte Erosion an Dünen simuliert (RWTH).
- iii Die Hydrologie untersucht die längerfristigen Folgen eines Dünendurchbruchs auf das Hinterland insbesondere im Hinblick auf die damit verbundene Versalzung und den anschließenden Aussüßungsprozess exemplarisch für das Ribnitzer Moor und den Darßer Wald (HY).

- iv In der sozioökonomischen Auswertung werden technische, hydrologische und ökonomische Bewertungen der durch Dünen geschützten Küstenregionen durchgeführt (IÖW).

## 2.2 Interessengebiete

Im Rahmen des PADO-Projekts werden drei Interessengebiete betrachtet: Graal-Müritz, Ahrenshoop und Warnemünde. Die Standorte Graal-Müritz und Ahrenshoop dienen als Grundlage für die Analyse der Hydrologie und Versalzung des Hinterlandes sowie für die sozioökonomischen Untersuchungen. Graal-Müritz befindet sich etwa 20 km nordöstlich von Rostock im Landkreis Rostock (Abbildung 2.1). Die Gemeinde erstreckt sich über eine Länge von vier Kilometern entlang der Mecklenburger Bucht. Ahrenshoop liegt 15 km nord-östlich von Graal-Müritz. Gewählt wurden die beiden Gebiete, da bereits eine Vielzahl an Gebietsinformationen, wie beispielsweise Landnutzung, Bodenbeschaffenheit sowie geologische und hydrologische Verhältnisse an diesen Standorten zur Verfügung stehen.

Für den Standort der zu errichtenden Versuchsdünen wurde nach Prüfung verschiedener Standortkriterien der Strand von Warnemünde als drittes Interessengebiet gewählt (Abschnitt 2.3). Für die weiteren Untersuchungen dieser Dissertation wird ausschließlich das Untersuchungsgebiet Warnemünde betrachtet.

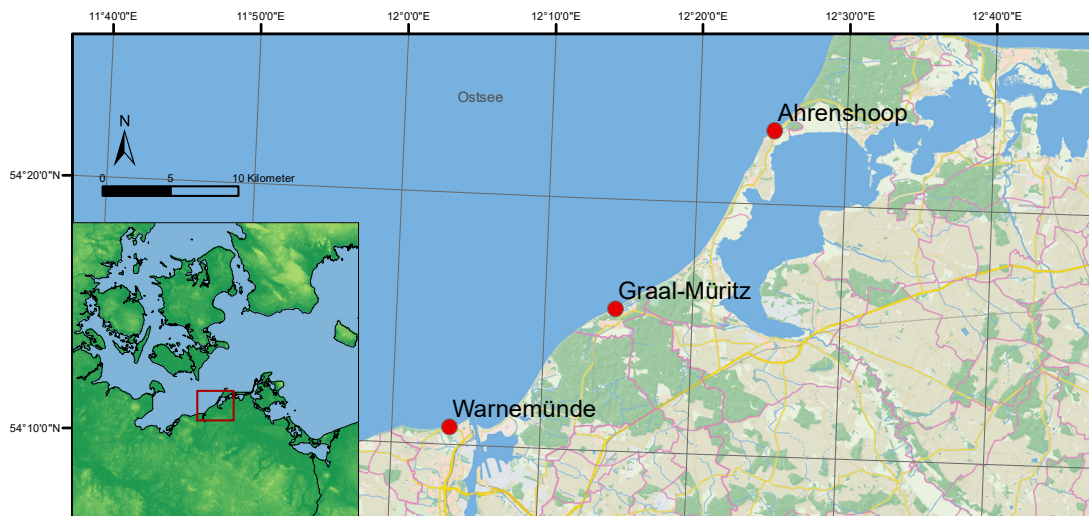


ABBILDUNG 2.1: Interessengebiete in PADO (Datengrundlage: (OSM, 2019)).

## 2.3 Untersuchungsgebiet Warnemünde

Bei der Auswahl des Standortes Warnemünde für die Versuchsdüne mussten verschiedene Randbedingungen und Faktoren berücksichtigt werden. Die unmittelbare Nähe der Forschungsdüne zu der Messkette des Internen Messnetzes Küste (IMK) war dabei ein wesentlicher Faktor. Die im Belastungsfall erhobenen Daten können nach der Messkampagne zu den gemessenen hydrodynamischen Daten der IMK-Station in Beziehung gebracht werden.

IMK-Stationen sind gleichmäßig über die Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern

verteilt und erheben an sechs Küsten- und vier Boddenabschnitten kontinuierlich hydrologische und meteorologische Messparameter (StALU MM, 2018). Eine der Stationen steht am 23. Dünenaufgang im Küstenschutzwald vor Warnemünde.

Neben dieser wichtigen Voraussetzung steht durch die in den Sommermonaten genutzte Rettungsstation *Turm 6* ganzjährig elektrischer Strom am Standort zur Verfügung. Der nahegelegene Parkplatz *Park and Ride Strand Mitte* bietet darüber hinaus eine gute Erreichbarkeit. Diese Rahmenbedingungen sorgen dafür, dass der Standort (Abbildung 2.2) für die Untersuchungen sehr gut geeignet ist.

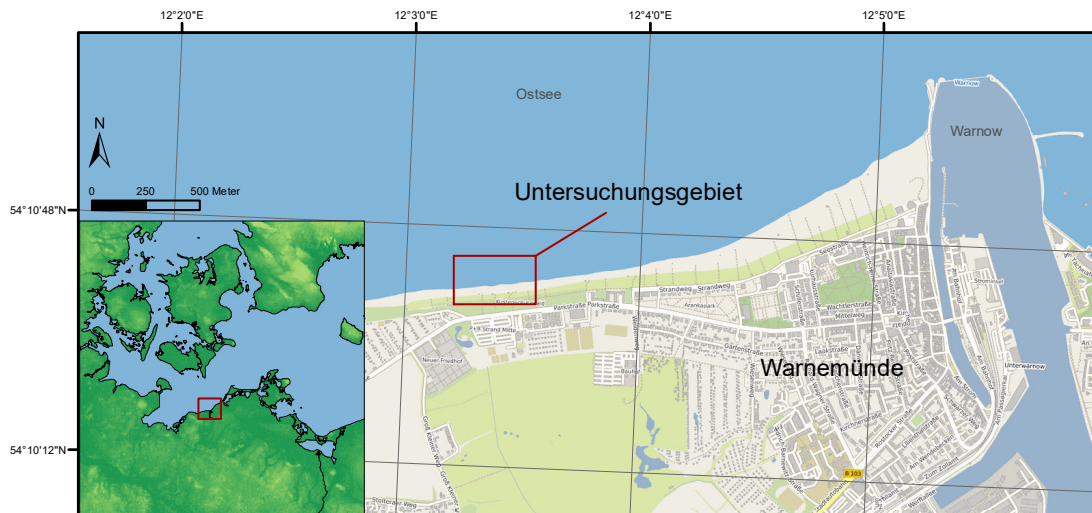


ABBILDUNG 2.2: Standort des Untersuchungsgebiets Warnemünde (Datengrundlage: (OSM, 2019)).

### 2.3.1 Teiluntersuchungsgebiet Bathymetrie

Die Vermessung der topographischen Gestalt der Meeresböden und Gewässerbetten wird als Bathymetrie bezeichnet. Für die Vermessung der deutschen Nord- und Ostsee ist das BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) zuständig. Die Vermessungsergebnisse werden in Form von Digitalen Geländemodellen (DGM) über das GeoSeaPortal bereitgestellt (GeoSeaPortal, 2019).

Um große Flächen in kurzer Zeit zu erfassen, werden Echolote eingesetzt, welche Schallsignale zum Gewässerboden senden. Anhand der Laufzeit des Impulses wird die Wassertiefe berechnet. Hierbei wird in Fächer- und Flächenecholot unterschieden (Heimerl und Kohler, 2015). Ebenso kann das Gewässerbett aus der Luft unter Einsatz von Airborne Hydromapping (Aufleger et al., 2015) oder UAV vermessen und dabei Messtiefen mit 1,5-facher Sichttiefe erzielt werden (Mandlbürger et al., 2017). Darüber hinaus sind auch Tiefenberechnungen für die küstennahen Regionen aus frei verfügbaren und leicht zugänglichen Landsat 8 Satellitenbildern möglich (Pacheco et al., 2015). Allerdings sind weniger als 18 % der Weltmeere durch diese Verfahren vermessen worden (Mayer et al., 2018). Zudem werden Untersuchungen hinsichtlich der Veränderungen der topographischen Gestalt des Grund des Meeres, wie bspw. von Thompson et al. (2015) für die Küste vor Cape Canaveral, äußerst selten durchgeführt. Das im Rahmen dieser Arbeit bathymetrisch betrachtete Teiluntersuchungsgebiet umfasst eine Fläche von circa  $360\text{ m} \times 120\text{ m}$  und liegt zwischen den Strandaufgängen

22b und 26 am Strand von Warnemünde (Abbildung 2.3). In diesem wurde ab Juli 2017 einmal monatlich die Brandungszone mit Hilfe kombinierter Tachymetrie und Real-Time-Kinematic GNSS (Global Navigation Satellite System) vermessen, welche Punktaufnahmen mit  $\pm 1,5$  mm Messgenauigkeit möglich machen. Im September 2017 kam darüber hinaus vom Boot aus ein Acoustic-Doppler-Current-Profiler (ADCP) zum Einsatz. Die Daten der unterschiedlichen Vermessungsmethoden werden für den jeweiligen Zeitabschnitt zu einem DGM verrechnet und verglichen. Weiterhin werden die Daten als Basis für den Aufbau der numerischen Modelle verwendet. In dem Arbeitspaket wird im Rahmen einer 2D-numerischen Studie der Einfluss der küstennahen topographischen Gestalt des Meeresbodens auf die Dünenerosion untersucht. Der Fokus liegt dabei auf der Sensitivität des numerischen Modells gegenüber einer veränderten initialen topographischen Gestalt hinsichtlich der hydrodynamischen Belastung und der resultierenden Erosion der Versuchsdüne.

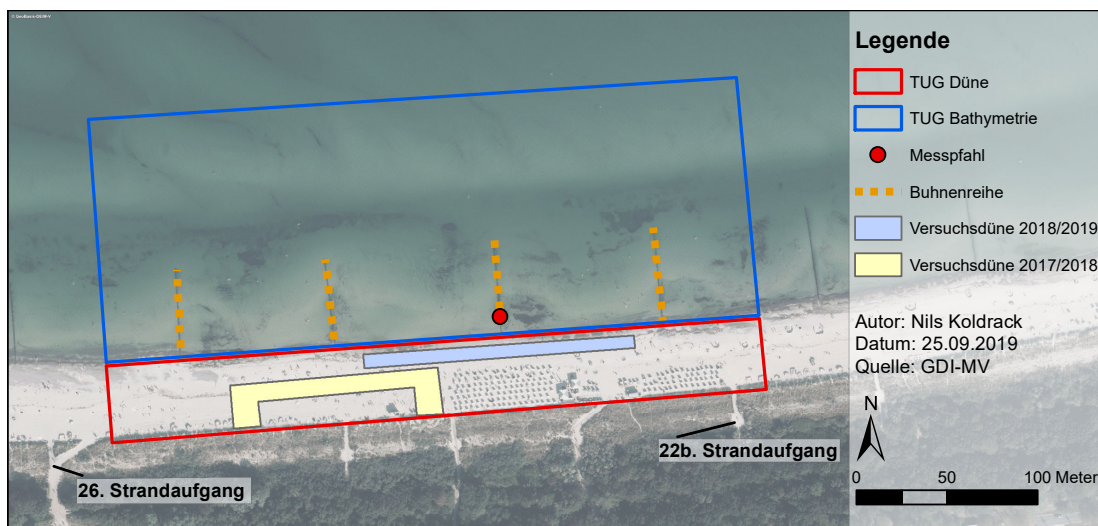


ABBILDUNG 2.3: Untersuchungsgebiet der Bathymetrie in Warnemünde.

### 2.3.2 Teiluntersuchungsgebiet Düne

Für die aus Sicht der Geodäsie entwickelten Messverfahren sind im Versuchsaufbau jeweils zwei Teiluntersuchungsgebiete und Untersuchungszeiträume zu unterscheiden:

**Untersuchungszeitraum Winter 2017/2018:** Ein prognostiziertes Bemessungshochwasser trat nicht ein. Eine Verformung der Sanddüne fand dennoch statt, jedoch in geringem Maße durch Wind und Niederschlag. Hier wird die Veränderung der Düne über fast ein halbes Jahr analysiert.

**Untersuchungszeitraum Winter 2018/2019:** Das prognostizierte Bemessungshochwasser fand unmittelbar nach Errichtung des Dünenkörpers statt. Die Verformung der Sanddüne war nach 16 Stunden abgeschlossen. Der Fokus der Auswertung liegt auf dem Wellenangriff und dem stattfindenden Durchbruch.

Der Standort der ersten Versuchsdüne befand sich in der Saison 2017/2018 unmittelbar vor dem 25. Strandaufgang mit einem Abstand zur Küstenlinie von circa 17 m

(Abbildung 2.3). Die zweite Versuchsdüne in der Saison 2018/2019 lag eine Bühnenreihe weiter östlich. Die Gründe und die Planung hierfür sind in Abschnitt 2.4.2 erläutert.

Die Bemessung und der Bau der Versuchsdünen, die durch die GK durchgeführt wurden, werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### 2.3.3 Bemessung der Versuchsdünen

Untersuchungsgegenstand sind Sturmfluten, welche an der deutschen Ostseeküste vor allem in den Wintermonaten auftreten. Für eine Sturmflut existieren in der Literatur mehrere Definitionen (DIN, 1994),(BSH, 2012). Zusammengefasst wird unter einer Sturmflut ein hydrologisches Ereignis verstanden, bei dem sich der Wasserstand unter Einwirkung stürmischer Winde an einem Ort über einen definierten Grenzwert erhöht (Sztobryn et al., 2005). Je nach Land, Region oder Behörde sind diese Grenzwerte unterschiedlich definiert. An der deutschen Ostseeküste liegt dieser Grenzwert bei einem Meter über Normalmittelwasser (BSH, 2019). Für das Auftreten einer Sturmflut im Ostseeraum sind dabei wesentlich zwei Faktoren ausschlaggebend: starke, in der Regel stürmische, auflandige Winde und ein hoher Referenzwasserstand an einem bestimmten Küstenabschnitt. Am häufigsten treten diese Wetterlagen in der kalten Jahreszeit von November bis Februar auf (Brasseur et al., 2017). Das BSH hat verschiedene sturmflutauslösende Luftdrucklagen untersucht und festgestellt, dass diese nur schlecht klassifiziert werden können (BSH, 2005). An den Küsten der südlichen Ostsee führen Stürme aus den Richtungen West-Nordwest bis Ost-Nordost am häufigsten zu erhöhten Wasserständen. Neben der Windlauflänge sowie der Stärke des Windes werden die küstennahen Wasserstände maßgeblich von den hydrologischen und morphologischen Bedingungen vor Ort beeinflusst (Sztobryn et al., 2005). Ziel der Bemessung war es, die Versuchsdüne so zu dimensionieren, dass sie bei einer jährlichen Sturmflut bis zu einem Durchbruch belastet wird, damit die nötigen Messdaten erhoben werden können. Grundlage für die Bemessung war eine nachgebildete Bemessungsganglinie auf der Basis von Wasserständen der Pegelmessreihe Warnemünde über den Zeitraum 1953 bis 2013. Die Ganglinie soll dabei einem typischen Verlauf einer Sturmflut mit einem Wiederkehrintervall  $T$  von einem oder mehreren Jahren nachempfunden werden (Saathoff und Kaehler, 2018).

Die jährlichen maximalen Wasserstände  $W_{st,J,max}$  in Warnemünde sind in Abbildung 2.4 veranschaulicht. 50 % der jährlichen Maxima liegen zwischen 0,69 m ü. NHN und 0,96 m ü. NHN. Die Regression bestätigt, dass, wie einleitend beschrieben, die Wasserstände der jährlichen Maxima kontinuierlich steigen. Die empirischen Eintrittswahrscheinlichkeiten können Abbildung 2.5 entnommen werden. Der höchste gemessene Wasserstand in diesem Zeitraum liegt bei 1,91 m ü. NHN (1914). Im Mittel kann ein maximaler Wasserstand von etwa 1,0 m ü. NHN im Jahr bei Sturmflutereignissen erwartet werden.

Die in Tabelle 2.1 dargestellte Häufigkeitsverteilung macht deutlich, dass 79,7 % aller Sturmfluten in den Monaten November bis Februar auftreten. Ereignisse in den Monaten März (5 % aller Ereignisse) und Oktober (8 % aller Ereignisse) sind ebenfalls möglich, wenn auch deutlich unwahrscheinlicher. Erhöhte Wasserstände treten in den Monaten April bis September nur vereinzelt auf und können für die Bemessung der

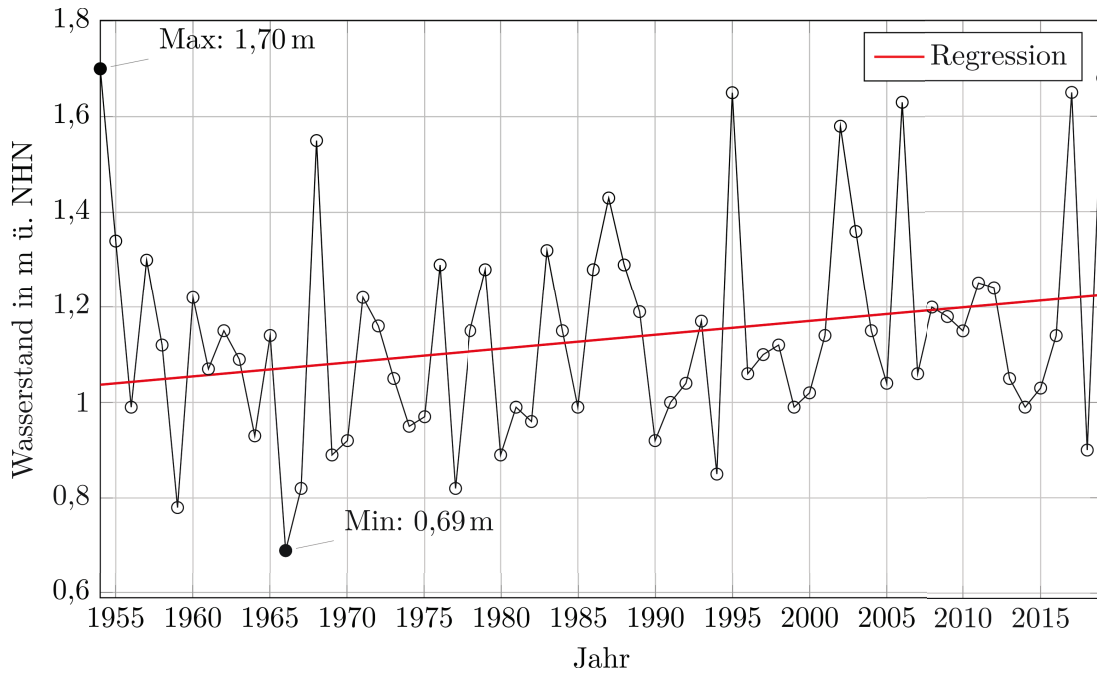


ABBILDUNG 2.4: Maximale jährliche Wasserstände von 1954 bis 2019 am Wasserspiegel War-nemünde (modifiziert nach Saathoff und Kaehler (2018), Datengrundlage: (WSV, 2019)).

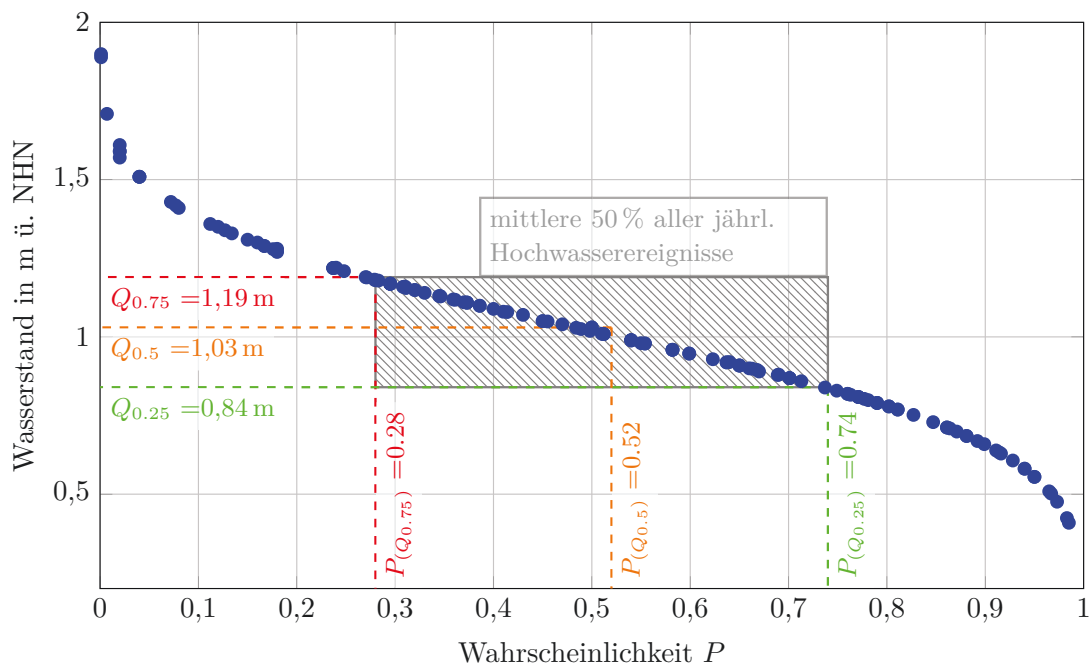


ABBILDUNG 2.5: Empirische Eintrittswahrscheinlichkeiten für die mittleren 50% aller maxi-malen jährlichen Ereignisse von 1855 bis 2019 (modifiziert nach Saathoff und Kaehler (2018), Datengrundlage: (WSV, 2019)).

Versuchsdüne vernachlässigt werden. Mit etwa 89% dominieren erhöhte Wasserstän-de mit Scheitelwerten bis zu 0,85 m ü. NHN.

TABELLE 2.1: Monatliche Häufigkeitsverteilung der Hochwasserereignisse von 1855 bis 2017 nach Saathoff und Kaehler (2018), Datengrundlage: (WSV, 2019).

	Scheitel [m ü. NHN]	0,45-0,65	0,65-0,85	0,85-1,0	>1,0	$\Sigma$
Relative monatliche Häufigkeit in %	Januar	15,03	6,86	2,29	0,98	25,16
	Februar	9,48	2,94	1,31	0,33	14,05
	März	3,27	1,63	0,33	0,00	5,23
	April	1,96	0,65	0,33	0,00	2,94
	Mai	0,00	0,33	0,00	0,00	0,33
	Juni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Juli	0,33	0,00	0,00	0,00	0,33
	August	0,33	0,33	0,33	0,00	0,99
	September	1,63	0,33	0,00	0,00	1,96
	Oktober	5,88	2,29	0,33	0,00	8,50
	November	13,07	4,90	1,96	0,65	20,59
	Dezember	12,09	5,56	1,96	0,33	19,93
	$\Sigma$	63,07	25,82	8,82	2,29	100

## 2.4 Versuchsdünen

Während Deiche, Deckwerke und andere Küstenschutzanlagen in allen deutschen Küstenländern auf der Grundlage allgemeiner Richtlinien wie der EAK (Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken), ergänzt durch zutreffende Teile aus Normen wie DIN (Deutsches Institut für Normung), EN (Europäischen Normen) und EVN (Europäische Vornormen) bemessen werden, stellt die Bemessung von Dünen eine Besonderheit dar. Dünen sind an den Küsten Mecklenburgs-Vorpommerns prägende Landschaftselemente und auf 106 km Küstenlänge gleichzeitig zentrale Anlage des Küstenschutzsystems. Während früher die Dünendimensionierung auf Erfahrungswerten beruhte, liegen seit 2004 Solldünendimensionen für alle Landesküstenschutzdünen vor. Sie wurden durch die Technische Universität Braunschweig auf der Basis von numerischen Modellierungen mit einem Quertransportmodell berechnet (Hofstede et al., 2009).

Die Neigung und die Form der Düne sind davon abhängig, welchen Kräften die Düne standhalten muss, welches Material verwendet wird und wie viel Platz zur Verfügung steht. Generell gilt: Eine steile Hangneigung führt zu einer verstärkten Erosion. Bei geringeren Böschungsneigungen wird mehr Feuchtigkeit zurückgehalten und die Bauwerke können in der Regel leichter bearbeitet werden. In Mecklenburg-Vorpommern wird ein seeseitiges Böschungsverhältnis von 1:3 angestrebt (StALU, 2009).

### 2.4.1 Untersuchungszeitraum - Winter 2017/2018

Am 14. Dezember 2017 wurde der Bau der ersten Forschungsdüne, unter Leitung der GK, abgeschlossen. Hierfür wurden etwa 1200 m<sup>3</sup> Sand aus dem Bereich östlich der Warnemünder Mole zum Standort der Düne transportiert und das Bauwerk mit einer Gesamtlänge von 120 m (Abbildung 2.6) und 1,1 m Höhe sowie mit einer seeseitigen Kronenbreite von 3 m geformt (Abbildung 2.7). Das Objekt wurde ohne Vegetation gebaut, da die Standzeit der Düne bis Ende März begrenzt war. Grund dafür



war die Tourismus-Saison, welche im April beginnt und an diesem Standort darüber hinaus mit dem Verleih von Strandkörben ab Mai einhergeht. Hier war es von Vorteil, dass sich die touristenarme Zeit mit dem Aufkommen von Sturmflutereignissen deckt. Weiterführend war das Projekt an die Auflage der Stadt Rostock gekoppelt, die Düne bei einer ausbleibenden oder zu schwachen Sturmflut im Mai zurückzubauen.

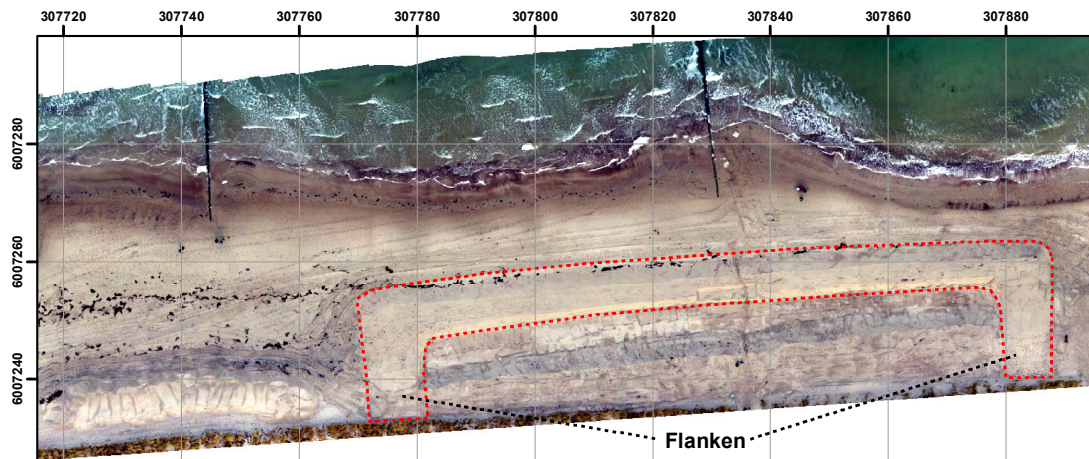


ABBILDUNG 2.6: Orthofoto der ersten Versuchsdüne.

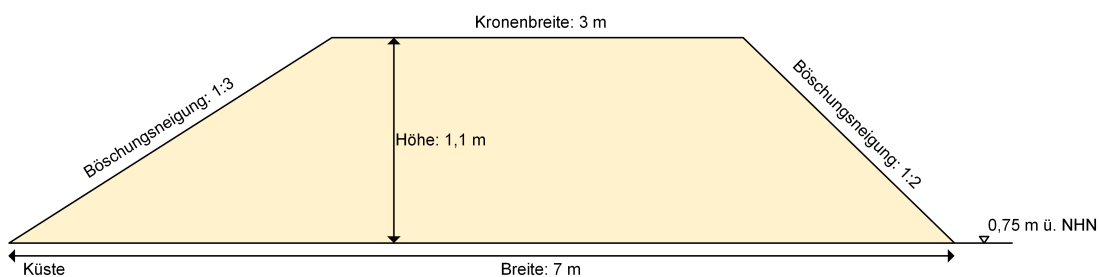


ABBILDUNG 2.7: Querschnitt der ersten Versuchsdüne (modifiziert nach Saathoff et al. (2019)).

### 2.4.2 Untersuchungszeitraum - Winter 2018/2019

Um den Standort der Versuchsdüne für die Sturmflutsaison 2018/2019 zu planen, wurde das Untersuchungsgebiet einmal monatlich bei gleichem Wasserstand beflogen, da in der Saison 2017/2018 festgestellt wurde, dass es zu einer seewärtigen Verschiebung der Uferlinie und einer Erhöhung des Strandprofils kam. Im ersten Untersuchungszeitraum (Winter 2017/2018) wurde die Düne noch vor der Bühnenreihe „2“ aufgeschüttet (Abbildung 2.8).

Eine Analyse für die Monate Juli 2018 bis Oktober 2018 zeigt, dass sich vor allem bei den beiden westlich gelegenen Bühnenreihen die Küstenlinie deutlich alternierend nach Norden und Süden bewegte (Tabelle 2.2). Bei den beiden östlichen Bühnenreihen war nur eine geringe Nord-Süd-Verlagerung zu verzeichnen. Ebenso hatte sich die Geländehöhe an der Wasserkante in dem Zeitraum stark verändert. So lag die Differenz aufgrund von Akkumulation an den Bühnenreihen zwischen 9 cm (Bühnenreihe „4“) und 33 cm (Bühnenreihe „1“).

Basierend auf dieser Analyse sowie den Erkenntnissen und Erfahrungen aus dem Vorjahr wurde das Konzept des zweiten Feldversuches teilweise geändert. Durch eine seewärtige Verschiebung des Standorts vor die Bühnenreihe „3“ erhöhte sich die Erfolgswahrscheinlichkeit einer hydrodynamischen Belastung signifikant.

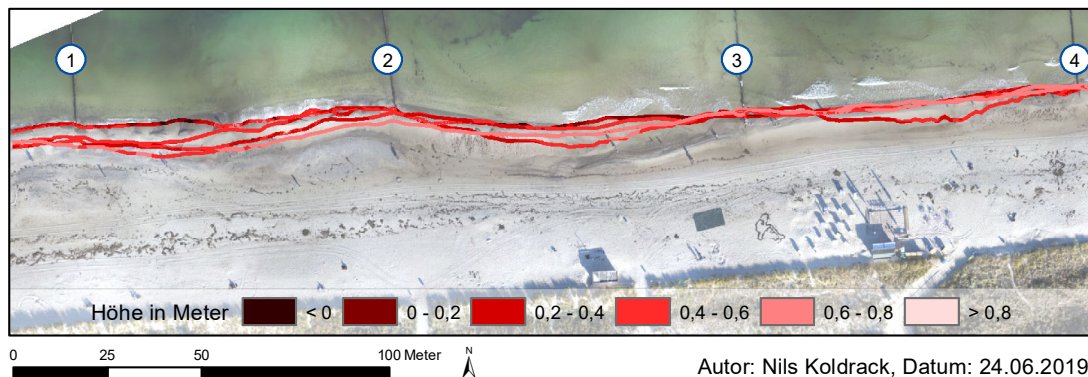


ABBILDUNG 2.8: Analyse der Küstenlinie für die Monate Juli 2018 bis Oktober 2018.

TABELLE 2.2: Maximale Geländeänderungen in Lage und Höhe an den jeweiligen Bühnenreihen innerhalb der untersuchten Monate.

Bühnenreihe	Nord-Südausdehnung [m]	Höhenunterschied [cm]
1	6,0	33
2	3,5	28
3	1,9	11
4	0,9	9

Der Bau der Düne begann am 05.11.2018. Nachdem der Sand, der aus dem Akkumulationsbereich im Bereich der Mole in Warnemünde entnommen und in das Untersuchungsgebiet angefahren wurde, wurde die Düne profiliert. Dabei wurde sie lagenweise (Lagenstärke 30 cm) bewässert und mit einer Rüttelplatte verdichtet, um eine Lagerungsdichte vergleichbar der Landesküstenschutzdünen zu erhalten. Zehn Tage später wurde die Düne fertiggestellt, so dass am 16.11.2018 Sensoren der GK zur Messung der Temperatur, des Wassergehalts und der Leitfähigkeit installiert werden konnten (Saathoff et al., 2019).

Der Dünenfuß wurde mit einer Höhe von 0,5 m ü. NHN eingemessen und lag damit 25 cm unter der Höhe vom Vorjahr. Grund für die niedrigere Geländehöhe des Dünenfußes ist die daraus resultierende Steigerung der Belastungswahrscheinlichkeit. Die Kronenhöhe lag bei 1,0 m (Abbildung 2.9). Das 150 m lange Bauwerk besaß eine Kronenbreite von 2 m und hatte aufgrund des Küstenverlaufs ein Offset von  $-4^\circ$  zur Nordrichtung. Hinter der Forschungsdüne wurde ein Planum hergestellt (Abbildung 2.10). Anders als bei der ersten Düne wurde beim zweiten Versuch auf seitliche Flanken verzichtet, damit Wasser, welches durch die Bresche in die Polderfläche drückt, seitlich zurückströmen kann. Zwar wurde eine Böschungsneigung von 1:3 angestrebt, jedoch wurde diese Anweisung bei den Baumaßnahmen nicht umgesetzt, so dass die Neigung dem Verhältnis 1:2 entsprach. In der Mitte der Düne wurde eine Sollbruchstelle in der Dünenkrone erzeugt, indem 25 cm der oberen Schicht über eine Länge von 5 m abgetragen wurde.

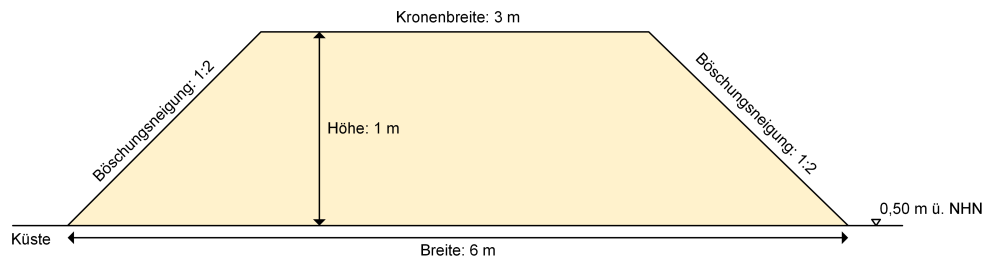


ABBILDUNG 2.9: Querschnitt der zweiten Versuchsdüne (modifiziert nach Saathoff et al. (2019)).

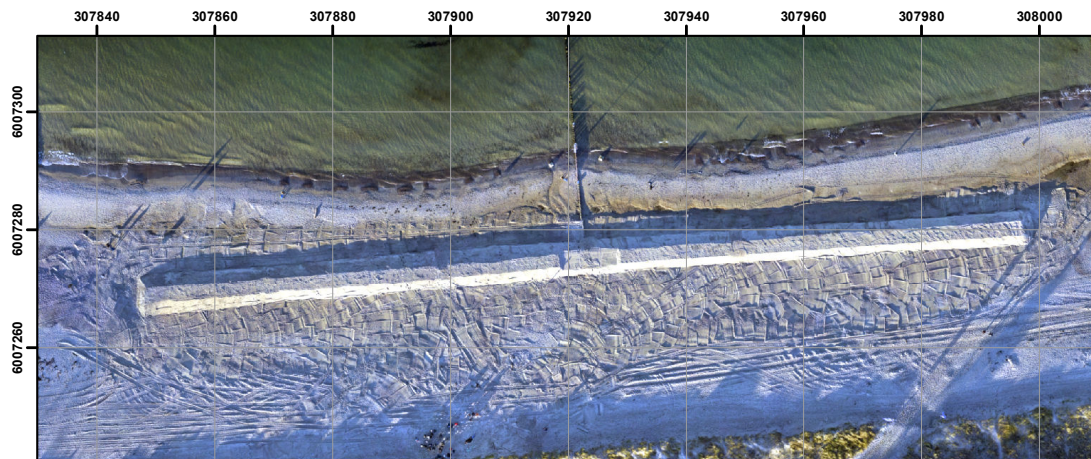


ABBILDUNG 2.10: Orthofoto der zweiten Versuchsdüne.

## 2.5 Umweltdaten im Untersuchungsgebiet

Das Staatliche Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg (StALU MM) erhebt mit dem IMK seit 1997 kontinuierlich Wasserstands-, Seegangs- und Winddaten in Rostock-Warnemünde sowie an fünf weiteren Küstenabschnitten in MV. Neben der Information über hydrodynamische Parameter ist es Aufgabe des IMK Küstenprozesse bei Sturmfluten auf Grundlage der gemessenen Umweltparameter (Tiepolt, 2018) zu bewerten. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde in Abstimmung mit dem StALU MM eine automatisierte Übertragung der Umweltdaten in das vom Steinbeis-Transferzentrum Geotechnik und Küstenwasserbau betriebene Messdatenverarbeitungs- und Analysesystem *Haddock* aufgebaut. So können hydrodynamische und meteorologische Messdaten zentralisiert in einer Datenbank langfristig gespeichert werden. In regelmäßigen Abständen wird die Datenbank durch Messdaten der GK sowie durch Messdaten verschiedener Behörden und Institutionen aktualisiert. Neben den Umweltdaten des IMK stehen Daten anderer Institutionen im Untersuchungsgebiet zur Verfügung. Ein Überblick ist in Tabelle 2.3 gegeben (Saathoff et al., 2019).

TABELLE 2.3: Übersicht über die verfügbaren Umweltdaten nach Saathoff et al. (2019).

Datenart	Quellen	Zeitliche Auflösung [min]
Wind	DWD	60
Wind	IMK	10
Seegang	IMK	10
Wasserstand	WSV	10/60
Wasserstand	IMK	10

## 2.6 Forschungsdateninfrastruktur

Die Notwendigkeit von querschnittsorientiertem Geodatenmanagement mit breitem Gesamtnutzen wird in aktuellen Forschungsprojekten immer stärker ersichtlich und ist eine Aufgabe, der sich die Professur GG der Universität Rostock seit vielen Jahren sowohl in der Forschung als auch der unterstützenden Dienstleistung für Forschungsprojekte widmet (Koldrack et al., 2019a). Um die in dem Projekt generierten Forschungsdaten frei und überregional zugänglich, sowie langfristig verfügbar bereitzustellen, wurde ein Datenportal konzipiert und implementiert (Abbildung 2.11). Auf Basis der Open Source-Software CKAN (Comprehensive Knowledge Archive Network) wurde das Meta-Informationssystem umgesetzt. Diese webbasierte Datenkatalog-Software wird weltweit in vielen Open Data-Projekten genutzt.

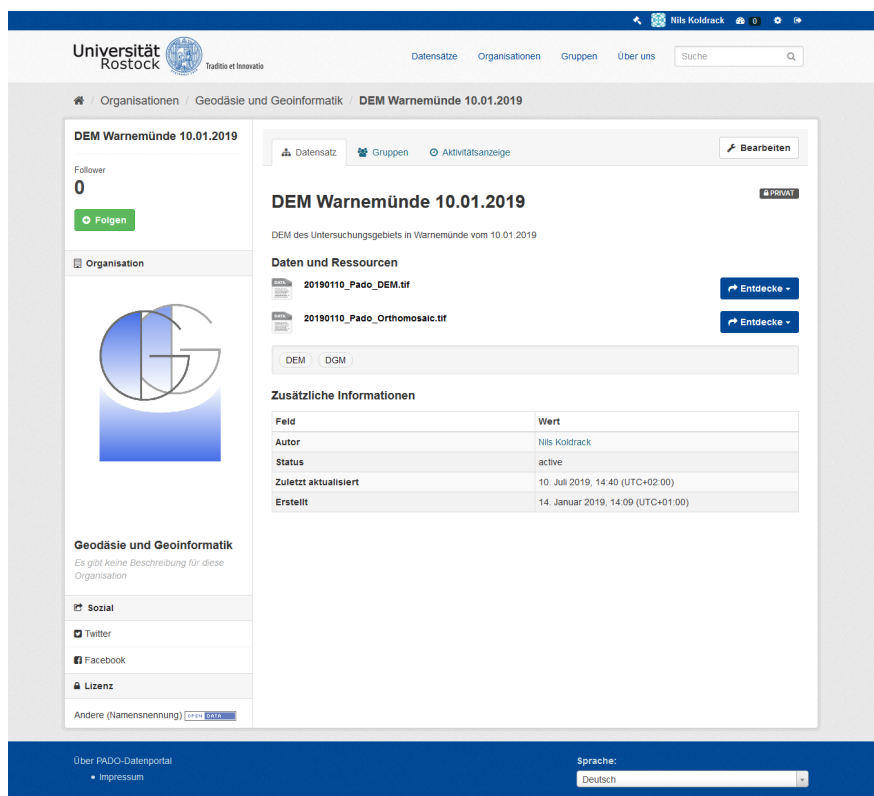


ABBILDUNG 2.11: Metadatensatz in der Forschungsdateninfrastruktur.

Das Backend von CKAN, dem Teil der auf dem Webserver läuft, ist hauptsächlich in *Python* geschrieben. Das Frontend hingegen, auf welches die Benutzer zugreifen, basiert auf *JavaScript*. Das Datensatzmanagement verwaltet CKAN über eine *PostgreSQL*-Datenbank, auf die die Suchmaschine *Solr* zugreift.

Nachdem die fachspezifischen Belange des PADO-Projektverbundes angepasst wurden, steht das Portal jedem Projektpartner über die Projekthomepage zur Verfügung (PADO, 2019b). Innerhalb der Projektlaufzeit haben ausschließlich die Projektpartner Zugang zum Portal, um Messdaten und Ergebnisse hochzuladen und zu teilen. Hierfür stehen entsprechende Templates zur Verfügung. Diese Daten sollen nach Absprache am Projektende der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden, um eine Weiter-nutzung der Projektdaten zu ermöglichen.

Die Datengrundlagen sowie Ergebnisse dieser Dissertation sind über das Datenportal bereitgestellt, um eine Basis für weitere Forschungen zu bilden.

## Kapitel 3

# Messkonzept und Voruntersuchungen

Zur Erfassung des Erosionsprozesses muss ein Verfahren entwickelt werden, dass in zeitlich hoher Auflösung Erosions- und ggf. Akkumulationsprozesse in einer räumlichen Auflösung von wenigen Millimetern erlaubt. Da die zu erwartenden Umweltbedingungen während einer Sturmflut als sehr harsch angenommen werden können, ergeben sich hieraus besondere Anforderungen an die Installation und Präparation der erforderlichen Messtechnik. Auch Aspekte der Energieversorgung spielen hierbei eine wichtige Rolle, um eine kontinuierliche Messwerterfassung über mehrere Stunden zu gewährleisten. In Hinblick auf die Zugänglichkeit und Harmonisierung des gesamten Versuchsaufbaus müssen geeignete Methoden zur Fernwartung bzw. Fernauslösung einzelner Systemkomponenten entwickelt und evaluiert werden. Dies betrifft sowohl den Laserscanner, als auch die Kameras zur videophotogrammetrischen Erfassung des Dünenkörpers. In diesem Zusammenhang ist auch die Gewährleistung einer hinreichenden Beleuchtung ein wichtiges Kriterium, da davon auszugehen ist, dass die natürlichen Umgebungsbedingungen während einer Sturmflut eine künstliche Beleuchtung erforderlich machen.

### 3.1 Messkonzept

Der Feldversuch für die Überwachung und Deformationsanalyse der Versuchsdüne (dynamisches Eventmonitoring) sowie der Oberflächenvermessung der Teiluntersuchungsgebiete (periodisches Monitoring) beruht messtechnisch auf der Fusion mehrerer Verfahren. Das mit Tachymetrie vermessene geodätische Netz (Resnik und Bill, 2018) sichert über die gesamte Laufzeit des Projekts die Wiederholbarkeit der Vermessungen in einer Genauigkeit von wenigen Millimetern ab. Dazu sind im rückwärtigen landseitigen Bereich und auf den Bühnen Messpunkte dauerhaft vermarktet.

#### 3.1.1 Messsystem

Die erste Komponente des Messsystems ist die periodische bzw. ereignisgesteuerte Erfassung des Teiluntersuchungsgebiets als 3D-Punktwolke durch UAV-Technik. Die daraus abgeleiteten DGM sowie die digitalen Orthofotos beschreiben über die Projektlaufzeit wiederkehrend das gesamte Teiluntersuchungsgebiet der Düne. Ebenso wird monatlich die topographische Gestalt des Meeresbodens unter Einsatz von GNSS

und Tachymetrie vermessen. Die eingemessenen Standpunkte des geodätischen Netzes helfen dabei, die UAV-Aufnahmen zu georeferenzieren und die Tachymeterstandpunkte zu verorten.

Die zweite Komponente besteht aus einer ereignisbezogenen Oberflächenvermessung mit einem TLS, der während einer Sturmflut die gesamte Düne mit Millionen von Punkten abtastet und ein Bruchereignis räumlich und temporal aufzeichnet. Um die volle Dünenlänge zu scannen, wird der TLS im Wasserbereich vor der Düne auf einer Bühnenreihe auf einem Messpfahl, der einen Abstand zur Forschungsdüne von 15 m besitzt, montiert (Abbildung 3.1). Der TLS kann als aktives Fernerkundungsverfahren sowohl zu Tages- als auch Nachtzeiten betrieben werden, wodurch eine kontinuierliche Datenerfassung ermöglicht wird.

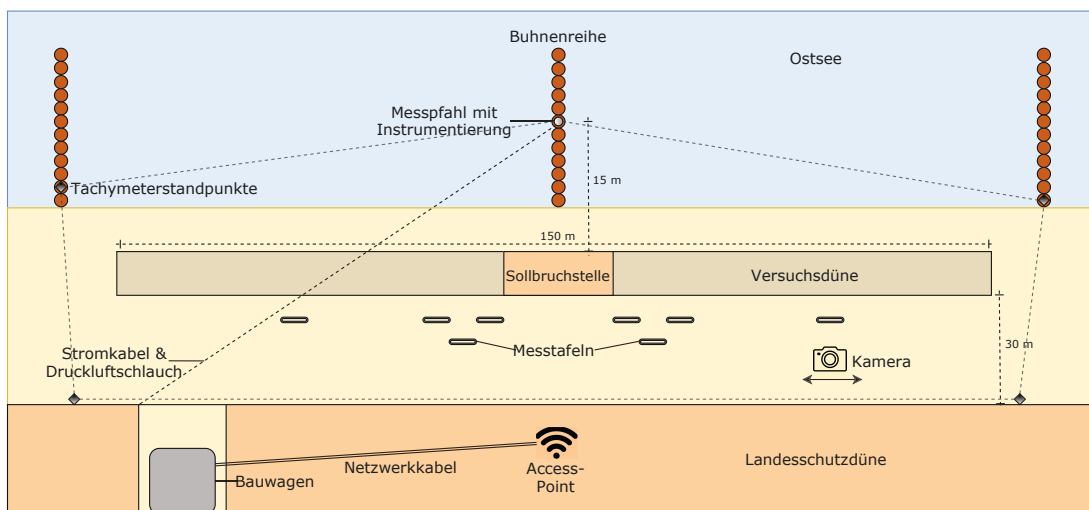


ABBILDUNG 3.1: Schematischer Aufbau des Messsystems.

Zur Bilddokumentation der Ereignisse an der Forschungsdüne wird zusätzlich als dritte redundante Komponente ein Kamerasystem ebenfalls auf dem Messpfahl installiert. Um auch diese Instrumentierung vielseitig nutzen zu können, wurde die Kombination von zwei *GoPro*-Kameras gewählt. Die Kameras können sowohl in einem Videomodus (zur Bilddokumentation), als auch in einem Bildmodus betrieben werden, in dem Einzelbilder im Intervall fotografiert und gespeichert werden. Darüber hinaus wird eine Kamera auf der Rückseite der Düne positioniert, um diese im Falle eines Durchbruchs aufzunehmen. Durch die Befestigung auf einem Stativ kann sie in der Polderfläche frei ausgerichtet werden.

Um die beiden Komponenten auf dem Messpfahl mit Strom zu versorgen, wurde ein Stromkabel über eine Länge von 80 m unter der Strandoberfläche (0,5 m) beim Bau der Düne durch die GK verlegt und an die Stromquelle angeschlossen, die für den Rettungsturm 6 installiert wurde.

Gesteuert wird das gesamte Messsystem über WLAN. Hierfür wird ein WLAN Access Point auf der Landesschutzdüne aufgebaut, welcher mit einem Netzwerkanschluss an das lokale Netzwerk, bestehend aus einem PC, angebunden ist. Zum Schutz vor Witterung ist der PC in einem Bauwagen platziert. Somit können der Scanvorgang sowie die Aufnahmen der Kameras durchgehend überwacht und gesteuert werden. Um die aufgenommenen 3D-Punktwolken des TLS im Nachhinein zu georeferenzieren, werden Messtafeln hinter der Düne aufgestellt und zum Laserscanner ostseeseitig

ausgerichtet. Die Messtafeln sind an Kanthölzern der Dimension  $7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$  in etwa  $1,55\text{ m}$  Höhe über dem Gelände befestigt und weisen ein Schachbrettmuster auf (Abbildung 3.2).

Die einzelnen Komponenten des Messsystems und deren Einbindung in das Gesamtkonzept werden nachfolgend beschrieben.

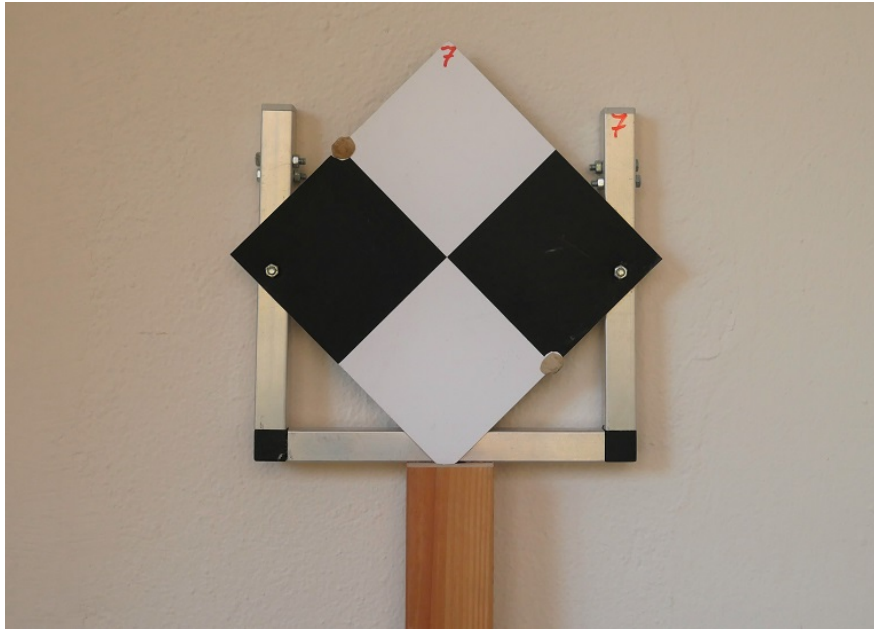


ABBILDUNG 3.2: Messtafel mit Schachbrettmuster.

## 3.2 Messgeräte

### 3.2.1 Unmanned Aerial Vehicles

UAV haben sich in den letzten Jahren zu einem weit verbreiteten Standardwerkzeug in der 3D-Geodatenerfassung entwickelt und die Lücke zwischen der terrestrischen und der flugzeug- und satellitengetragenen Geodatenerfassung geschlossen. Aufgrund der geringen Kosten einer Befliegung und der flexiblen Anwendbarkeit können Prozesse und Veränderungen von Oberflächen dokumentiert, ausgewertet und analysiert werden (Grenzdörffer, 2016). Durch einen hohen Grad an Automation in der Datenerfassung und in der Auswertung großer Datenmengen können die stetig steigenden Anforderungen an aktuelle Geodaten durch UAV effizient erfüllt werden. Aufgrund der hohen Bodenauflösung der Messbilder und der hohen erzielbaren 3D-Genauigkeiten von wenigen Zentimetern können UAV auch für eine Vielzahl von Vermessungsaufgaben eingesetzt werden (Zurhorst und Zurhorst, 2015). Die Bodenauflösung ist dabei unter anderem von der Flughöhe und der eingesetzten Kamertechnik abhängig. Die UAV wurden wegen des flächenhaften Messverfahrens, der variablen Einsatzfähigkeit und der hohen Genauigkeit für die periodische 3D-Geodatenerfassung des Teiluntersuchungsgebiets Düne ausgewählt. Eingesetzt wurden dabei die beiden Multikopter *Phantom 4 Pro* und *AscTec Falcon 8* sowie der Flächenflügler *senseFly eBee+*.



### 3.2.2 Terrestrisches Laserscanning

TLS sind seit einigen Jahren in der Praxis etabliert und werden in der Vermessung eingesetzt. Die TLS vermessen ihre Umgebung mit einer hohen Auflösung in kürzester Zeit berührungslos. Sie bestehen aus einer Kombination von Streckenmess-einheit, Strahlableitungs- und Steuerungssystem (Mettenleiter et al., 2015). Um ein Objekt zu scannen, wird als Lichtquelle ein gebündeltes Laserlicht verwendet und über die Laufzeit oder Phasenverschiebung des vom Messobjekt zurückgeworfenen Lichts die Entfernung bestimmt. Dabei wird der Laserlichtstrahl zumeist über Spiegelsysteme schrittweise in der Horizontalen und Vertikalen abgelenkt. So wird die Umgebung des Scanners kontinuierlich durch Profile gitterförmig erfasst (Niemeier und Kern, 2001) (Abbildung 3.3). Als Ergebnis wird eine 3D-Punktwolke generiert, bestehend aus den gemessenen Entfernungen und den korrespondierenden Einstellwerten für die Horizontal- und Vertikalablenkung (Foppe, 2005). Die hohe resultierende Punktdichte von wenigen Millimetern und die damit hohe Informationsdichte bietet viele Vorteile und Chancen für Anwendungen bei wissenschaftlichen Fragestellungen, die mit konventionellen Messmethoden nicht zu bearbeiten wären. So ist es möglich, kleinste Reliefänderungen innerhalb weniger Minuten zu erfassen und damit die Veränderungen der Versuchsdüne in sehr hoher temporaler (wenige Minuten) und räumlicher Auflösung (Millimeter-Genauigkeit) form- und maßgetreu abzubilden. Ebenso ist der TLS durch die Vermessung der Umgebung mittels Laserstrahlen von Licht und Beleuchtung unabhängig.

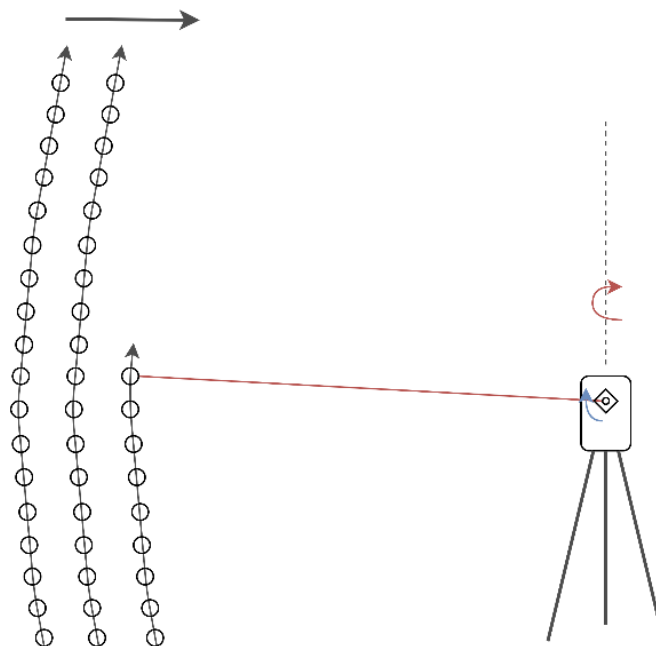


ABBILDUNG 3.3: Funktionsprinzip eines TLS nach Haring (2003).

#### FARO Focus3D X 130

Um die Dünenvermessung während eines Sturmflutereignisses in kurzen Zeitabschnitten durchzuführen, wurde der Laser-Scanner *FARO Focus3D X 130* gewählt. Der *FARO Focus3D X 130* mit einem Scanradius bis zu 130 m (Tabelle 3.1) ermöglicht die

schnelle und exakte Erfassung von Objekten. Dank der unbedenklichen Laserschutzklasse 1 ist der *FARO Focus3D* in allen öffentlichen Bereichen problemlos einsetzbar. Der integrierte GNSS-Empfänger erleichtert zudem die Zuordnung der Einzelscans bei der Nachbearbeitung und ist somit für Vermessungsarbeiten geeignet. Mit einer WLAN-Fernbedienung können Scans aus der Entfernung gestartet, angehalten und angezeigt werden. Ebenso können Parameter wie Qualität und Auflösung über die Fernsteuerung editiert werden. Die angegebene Akkulaufzeit beträgt 4,5 Stunden. Da davon auszugehen ist, dass die Messdauer eines Vermessungseinsatzes während einer Sturmflut deutlich über der Laufzeit liegt, ist eine externe Stromversorgung notwendig. Da die vom Hersteller angegebene Umgebungstemperatur zwischen 5 °C und 40 °C liegen sollte, ist es notwendig, bei niedrigeren Temperaturen eine Wärmezufuhr oder eine ausreichende Isolation zu gewährleisten. Die Datenspeicherung basiert auf einer SD-Karte, die in der Regel nach Benutzung des Scanners ausgelesen wird. Sollte der angestrebte Messvorgang dazu führen, dass die Speicherkapazität der Karte überschritten ist, können die Scan-Daten per WLAN auf ein Endgerät übertragen werden. Jedoch können in dieser Zeit keine Scans durchgeführt werden.

TABELLE 3.1: Technische Daten des *FARO Focus3D X 130*.

Eindeutigkeitsintervall	bei 122 bis 488 Kpts/s: 614 m; 976 Kpts/s: 307 m
Reichweite	0,6 m - 130 m im Freien mit senkrechtem Einfallswinkel
Messrate (Punkte/Sekunde)	122 000/244 000/488 000/976 000
Systematischer Distanzfehler	±0,09 mm
Sichtfeld (vertikal/horizontal)	300°/360°
Auflösung (vertikal & horizontal)	0,009° (40 960 3D-Pixel bei 360°)
Max. vertikale Scangeschwindigkeit	5,820 rpm/97 Hz
Sensoren	Höhensensor, Kompass, GNSS, Zweiachsenkompensator

### Schwingungsanalyse TLS

Da davon auszugehen ist, dass der Messpfahl durch Wind und Seegang induzierte Schwingungen vollzieht, wurden im Vorfeld Analysen zur Messgenauigkeit bei einem schwingenden Laserscanner durchgeführt.

Hierzu wurde der TLS auf einer Plattform installiert, die sich in der Waagerechten zu beiden Seiten in einem Intervall von einer Sekunde um 5° neigt. Dabei wurden drei Zielmarken mit Schachbrettmuster in einem Abstand von 5 m, 10 m und 15 m (Scangröße 5121 x 5064 Pkt, Punktabstand 3,068 mm/10 m, Messrate 488 Kpts/Sek) gescannt. Dies wurde 10-mal wiederholt und mit Scans, die in einem ruhigen Zustand aufgenommen wurden, verglichen. Dabei wurde jeweils der Mittelpunkt der Zielmarken als Ausgangspunkt gewählt.

Für die Messungen wurde der *FARO Focus3D X 130* genutzt, welcher mit einem Zweiachsenkompensator ausgestattet ist (Genauigkeit 0,015°, Messbereich ±5°) und somit geringe Neigungsänderungen während der Messung automatisch ausgleicht.

Bei einem Abstand des Targets von 5 m zum TLS liegt die Differenz der Ergebnisse des TLS im Ruhe- und Schwingungszustand zwischen 0,64 cm und 0,83 cm (Abbildung 3.4). Die Standardabweichung liegt dabei bei 0,06 cm und der Median bei 0,73 cm. Die Differenz-Werte bei einem Targetabstand von 10 m sind dabei fast doppelt so groß wie bei einer Entfernung von 5 m. Die Werte liegen zwischen 1,15 cm und 1,44 cm (Standardabweichung 0,09 cm, Median 1,68 cm). Zur Zielmarke im Abstand von 15 m beträgt die Spannweite der Differenzen 0,42 cm (zwischen 1,59 cm und 2,01 cm) und damit im Schnitt 1,02 cm mehr als zum Abstand mit 5 m.

Da der TLS zur Düne einen Mindestabstand von 15 m besitzt, kann es somit bei starken Schwingungen des Messpfahls zu Ungenauigkeiten von wenigen Zentimetern in den Laserscans kommen. Eine absolute Abweichung von 1,8 cm bei dieser prototypischen Machbarkeitsstudie bei einem 150 m langen und 1 m hohen Bauwerk ist jedoch hinreichend genau. Jedoch ist es von großer Bedeutung, den Pfahl so unempfindlich wie möglich gegenüber Erschütterungen zu installieren (Abschnitt 3.3).

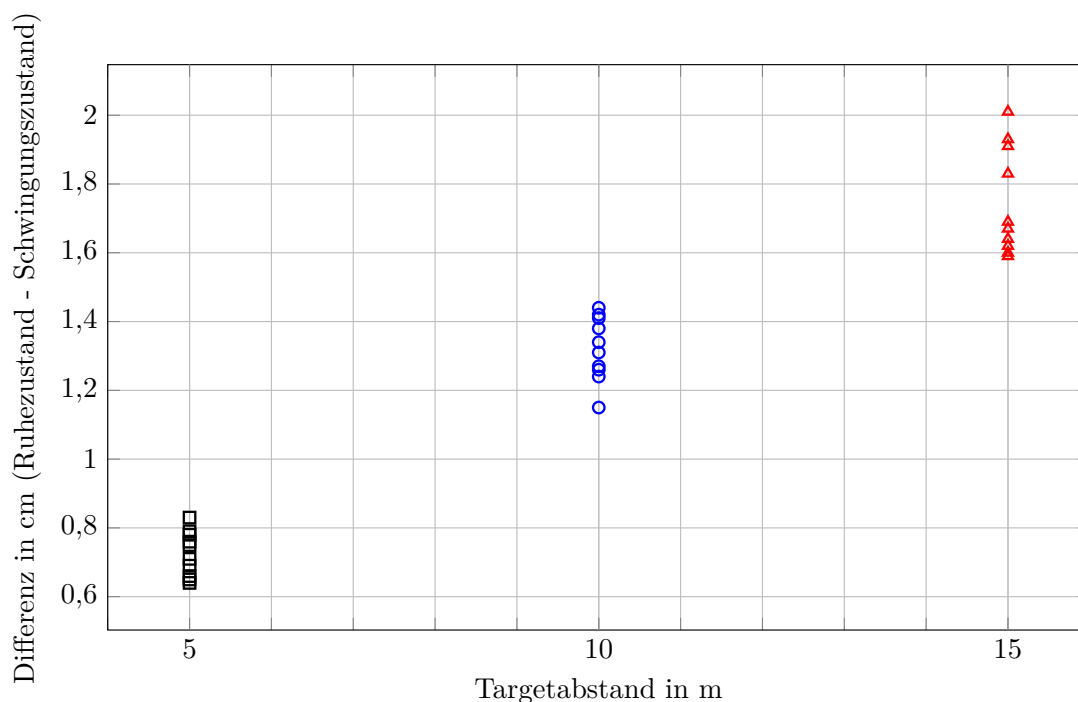


ABBILDUNG 3.4: Differenz der Messungen zwischen Ruhe- und Schwingungszustand.

### 3.2.3 Kameras

Für die Dokumentation des Dünendurchbruchs wurden drei Kameras der Firma *GoPro Inc.* verwendet. Auf der Landseite wurde eine *GoPro Hero3+ Black Edition* mit dem werkseitig montierten Weitwinkelobjektiv und auf der Seeseite zwei *GoPro Hero4 Black* mit einem nicht-werkseitigen Objektiv eingesetzt. Letztere verfügen über eine physikalische Brennweite von 5,4 mm. Beide Kameraoptiken besitzen eine Festbrennweite. Bauartbedingt kommen in Action-Kameras in der Regel Fixfokus-Objektive zum Einsatz, sodass keine Änderung der inneren Orientierung der Kameras durch die nur softwareseitig durchführbare Auswahl der Kamerakonfiguration zu erwarten ist. Aufgrund der wasserfesten Hülle, des geringen Gewichts und der Robustheit eignen

sich die Kameramodelle für die optische Erfassung von Objekten auch unter Feldbedingungen. Darüber hinaus werden die Aufnahmen auf Speicherkarten gesichert, daher sind Bildaussetzer durch heftige Erschütterungen ausgeschlossen. Die großen Kameraöffnungswinkel erleichtern dazu die Ausrichtung der Kameras. Die Funktion, per WLAN die Aufnahmen über das Smartphone bzw. Laptop zu steuern, vereinfacht die Justierung und ermöglicht ebenso Änderungen in den Einstellungen.

### Kamerakalibrierung

Da das Sturmflutereignis mittels Videophotogrammetrie aufgezeichnet werden soll, wurden die Kameras vorab kalibriert. Die Ermittlung der Kalibrierwerte wurde jeweils mit der maximalen Bildauflösung von 12 Megapixeln ( $4000 \times 3000$ ) sowie für die UHD- ( $3840 \times 2160$  Pixel) und 1080p-Videoauflösung ( $1920 \times 1080$  Pixel) durchgeführt. Hierzu wurden mit beiden Kamera-Objektiv-Kombinationen Aufnahmen auf einem Kalibrierstand der Professur für Geodäsie und Geoinformatik der Universität Rostock erstellt. Dieser an einer Raumdecke angebrachte Stand verfügt über 50 codierte Targets, bestehend aus acht retroreflektierenden Punkten mit einem Durchmesser von 6 mm (Abbildung 3.5). Mit einem Abstand von zwei Metern wurden für jede Kamerakonfiguration vom Stand 14 Aufnahmen erstellt. Ebenso wurden mit beiden Systemen Feldaufnahmen ohne Targets mit einem Motivabstand von 20 m ausgewertet.



ABBILDUNG 3.5: Kalibrierstand der Professur für Geodäsie und Geoinformatik.

Tabelle 3.2 und 3.3 zeigen die mit der Software *Australis* ermittelten Parameter zur Bildkorrektur. Bei beiden Kameramodellen ist eine nur geringe Abweichung der Angaben der physikalischen Brennweite erkennbar. Diese konnten mit jeweils sehr geringen Standardfehlern ermittelt werden. Dies gilt ebenso für die Werte der Fehlerabschätzungen der Hauptpunktverschiebung von  $< 0,001$  mm. Ferner zeigt der quadratische Mittelwert (root mean square, RMS), welcher die Pixelabweichung beschreibt, höhere Werte bei den Feldaufnahmen gegenüber denen des Kalibrierstandes auf und weist damit auf eine geringere Genauigkeit hin.

TABELLE 3.2: Kalibrierungsparameter für die *GoPro Hero3+* ( $c$ ,  $x_p$ ,  $y_p$  = interne Kameraorientierung;  $K1$  -  $K3$  = radiale Verzerrung;  $P1$ ,  $P2$  = tangentielle Verschiebung;  $RMS$  = Pixelabweichung).

	12 MP (Wide)		UHD (Wide)		1080p (Wide)	
	Kalibrierst.	Feld	Kalibrierst.	Feld	Kalibrierst.	Feld
$c$ [mm]	2,73	2,74 mm	2,73	2,74	2,73	2,75
$x_p$ [mm]	$-6,36 \cdot 10^{-2}$	$-6,39 \cdot 10^{-2}$	$-1,5 \cdot 10^{-3}$	$-3,4 \cdot 10^{-3}$	$-6,22 \cdot 10^{-2}$	$-6,29 \cdot 10^{-2}$
$y_p$ [mm]	$2,43 \cdot 10^{-2}$	$2,49 \cdot 10^{-2}$	$2,40 \cdot 10^{-2}$	$2,58 \cdot 10^{-2}$	$2,28 \cdot 10^{-2}$	$2,36 \cdot 10^{-2}$
$K1$	$3,82 \cdot 10^{-2}$	$3,75 \cdot 10^{-2}$	$3,86 \cdot 10^{-2}$	$3,47 \cdot 10^{-2}$	$3,81 \cdot 10^{-2}$	$3,56 \cdot 10^{-2}$
$K2$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$3,76 \cdot 10^{-3}$	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$2,51 \cdot 10^{-3}$
$K3$	$7,21 \cdot 10^{-5}$	$6,08 \cdot 10^{-5}$	$1,89 \cdot 10^{-4}$	$-9,37 \cdot 10^{-4}$	$7,64 \cdot 10^{-5}$	$-2,68 \cdot 10^{-4}$
$P1$	$5,81 \cdot 10^{-5}$	$7,58 \cdot 10^{-5}$	$3,59 \cdot 10^{-5}$	$9,34 \cdot 10^{-5}$	$3,58 \cdot 10^{-5}$	$6,81 \cdot 10^{-5}$
$P2$	$1,82 \cdot 10^{-4}$	$1,89 \cdot 10^{-4}$	$1,92 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-4}$
$RMS$	0,12	0,39	0,1	0,58	0,09	0,31

TABELLE 3.3: Kalibrierungsparameter für die *GoPro Hero4* ( $c$ ,  $x_p$ ,  $y_p$  = interne Kameraorientierung;  $K1$  -  $K3$  = radiale Verzerrung;  $P1$ ,  $P2$  = tangentielle Verschiebung;  $RMS$  = Pixelabweichung).

	12 MP (Wide)		UHD (Wide)		1080p (Wide)	
	Kalibrierst.	Feld	Kalibrierst.	Feld	Kalibrierst.	Feld
$c$ [mm]	5,43	5,44	5,43	5,43	5,43	5,42
$x_p$ [mm]	$-9,5 \cdot 10^{-3}$	$-1,07 \cdot 10^{-2}$	$-1,21 \cdot 10^{-2}$	$-1,20 \cdot 10^{-2}$	$-1,21 \cdot 10^{-2}$	$-1,37 \cdot 10^{-2}$
$y_p$ [mm]	$-5,51 \cdot 10^{-2}$	$-5,24 \cdot 10^{-2}$	$-5,18 \cdot 10^{-2}$	$-4,93 \cdot 10^{-2}$	$-6,53 \cdot 10^{-2}$	$-6,10 \cdot 10^{-2}$
$K1$	$3,14 \cdot 10^{-3}$	$2,99 \cdot 10^{-3}$	$3,15 \cdot 10^{-3}$	$2,71 \cdot 10^{-3}$	$3,19 \cdot 10^{-3}$	$2,56 \cdot 10^{-3}$
$K2$	$-1,21 \cdot 10^{-4}$	$-1,24 \cdot 10^{-4}$	$-1,21 \cdot 10^{-4}$	$-7,15 \cdot 10^{-5}$	$-1,26 \cdot 10^{-4}$	$2,42 \cdot 10^{-5}$
$K3$	$-1,96 \cdot 10^{-6}$	$-1,33 \cdot 10^{-6}$	$1,67 \cdot 10^{-6}$	$-4,68 \cdot 10^{-6}$	$-1,65 \cdot 10^{-6}$	$-1,46 \cdot 10^{-5}$
$P1$	$-1,28 \cdot 10^{-5}$	$-9,40 \cdot 10^{-6}$	$1,40 \cdot 10^{-5}$	$-3,18 \cdot 10^{-6}$	$6,61 \cdot 10^{-6}$	$1,72 \cdot 10^{-5}$
$P2$	$-2,89 \cdot 10^{-5}$	$-4,16 \cdot 10^{-5}$	$-2,81 \cdot 10^{-5}$	$-3,24 \cdot 10^{-5}$	$-3,14 \cdot 10^{-5}$	$-4,03 \cdot 10^{-5}$
$RMS$	0,08	0,49	0,07	0,47	0,06	0,41

Tabelle 3.2 mit den ermittelten Kalibrierparametern für die *GoPro Hero3+* mit werkseitigem Standardobjektiv zeigt, dass die Parameter der physikalischen Brennweiten bei allen Kamerakonfigurationen der Feldaufnahmen über denen des Kalibrierstandes liegen. Auch die Hauptpunktverschiebungen fallen bei den UHD-Konfigurationen deutlich geringer aus als bei den anderen Konfigurationen. Dass die berechneten physikalischen Brennweiten bei allen Feldaufnahmen geringfügig über den konfigurationsgleichen Werten der Kalibrierstandaufnahmen liegen, kann als Indikator für eine nicht stabile innere Orientierung angeführt werden. Zu beachten ist hierbei, dass die Spannweite der Werte mit 0,0168 mm gering ausfällt.

Auch bei der *GoPro Hero4* mit nicht-werksseitigem 5,4 mm-Objektiv sind Abweichungen bei den Werten der physikalischen Brennweite erkennbar. Die anhand der Feldaufnahmen ermittelten Werte liegen jedoch einerseits deutlich oberhalb der Konfigurationsgleichen Werte des Kalibrierstands, unterschreiten diese jedoch bei der 1080p-Konfiguration mit dem Blickfeld *mittel* im gleichen Maß. Ebenso wie bei der *GoPro Hero3+* weichen die anhand der Aufnahmen des Kalibrierstandes bestimmten Hauptpunktverschiebungen einheitlich von denen der Feldaufnahmen ab.

Aufgrund der gleichförmigen Unterschiede der Hauptpunktverschiebung zwischen den Aufnahmen des Kalibrierstandes und den Feldaufnahmen sind für das Projekt grundsätzlich die Werte der Kalibrierstands-Kalibrierung vorzuziehen. Dies gilt in besonderem Maße, da die durch *Australis* bestimmten physikalischen Brennweiten der *GoPro Hero3+* mit werksseitigem Objektiv bei den Kalibrierungen anhand der Feldaufnahmen bei allen Konfigurationen höhere Werte aufweisen.

Trotz der Auswahl unterschiedlicher Kameraeinstellungen ergeben sich vergleichbare Kalibrierparameter. Die Betrachtung der Konfigurationsgleichen Kalibrierungen zeigt gleichförmige Unterschiede zwischen den Feldaufnahmen mit einem Motivabstand von etwa 20 m und den Kalibrierstandsaufnahmen mit einem Abstand von etwa 2 m. Ob bei beiden Kamera-Objektiv-Kombinationen von einer Stabilität der inneren Orientierung ausgegangen werden kann, ist nur durch weitere Aufnahmen mit anderen Abständen zum verwendeten Motiv und einem einheitlich targetbasierten oder nicht-targetbasierten Prozess abschätzbar.

### 3.2.4 GNSS

Globale Satellitennavigationssysteme (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) werden bei der Erfassung von Positions-, Navigations- und Zeitdaten in der Geodäsie standardmäßig genutzt.

Für die Punktmessungen in den Teiluntersuchungsgebieten wurde das *Leica Viva GS08plus* verwendet, sogenannte *GNSS Smart Antenna* als RTK-Rover (Real Time Kinematic). Die Echtzeitkinematik mit differentiellen GNSS-Korrekturen aus Netzwerk-RTK wie z.B. SAPOS-HEPS (Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung-Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service) oder *Leica SmartNet* und Korrekturübertragung via mobiler Internetverbindung (NTRIP) ermöglicht hohe Messgenauigkeiten (horizontal 10 mm + 0,5 ppm / vertikal 20 mm + 0,5 ppm) (Leica, 2012). Somit ist es möglich, einzelne Punkte in der Genauigkeit von wenigen Millimetern einzumessen und damit Veränderungen ebenfalls auf dieser Skala zu detektieren. Darüber hinaus werden die Punkte innerhalb von Sekunden erfasst. Durch diesen geringen zeitlichen Aufwand ist es möglich, auch eine hohe Anzahl von Punkten in einem Gebiet aufzunehmen, was vor allem bei der Bathymetrie sowie der Einmessung der Passpunkte für die Georeferenzierung der UAV-Bilder von großem Vorteil ist.

### 3.2.5 Tachymeter

Um das geodätische Netz und die topographische Gestalt des Gewässerbettes zu vermessen, wurde ein motorisierter Robotik-Tachymeter (*Leica TCRP 1205* mit Radio-Handle) verwendet. Mit hochgenauen Winkelmessungen und präzisen Distanzmessungen, unterstützt durch automatische Feinanzielung und Reflektorsuche, ist eine schnelle Einmessung von Punkten möglich. Die hohe Reichweite von bis zu 3 km bei hoher Genauigkeit (1 mm + 1,5 ppm Streckengenauigkeit und einer Winkelgenauigkeit von 0,3 bis 1,5 mgon) ermöglicht darüber hinaus die Erfassung von Zielen über eine große Entfernung (Leica, 2015).

Der Vorteil der Nutzung eines Tachymeters bei der Vermessung des Gewässerbettes ist, dass das elektronische Gerät vom Strand aus bedient werden kann und nur der 360°-Reflektor auf einem Stab mit bekannter Höhe im Wasser bewegt werden muss. Mit Hilfe der automatischen Zielerfassung (ATR - Automatic Target Recognition) des Tachymeters wird das Anzielen des Reflektors erleichtert und beschleunigt. Dabei genügt es, das Fernrohr des Tachymeters grob auf den Reflektor auszurichten. Auf Knopfdruck wird darauf die Feinzielung, die Winkel- und Distanzmessung sowie die Registrierung aller Messwerte durchgeführt.

### 3.2.6 Acoustic-Doppler-Current-Profiler

Mit einem akustischen Dopplermessgerät (ADCP) ist es möglich, das dreidimensionale Strömungsverhalten, die Geometrie des gemessenen Gewässerabschnitts und daraus abgeleitet den Durchfluss eines Gewässers zu ermitteln. Um die Wassertiefen zu ermitteln, wird das Strömungsgerät nach der *moving-boat-Methode* eingesetzt. Dabei wird das Gerät an ein Boot montiert, welches sich entlang von Transekten auf dem Gewässer bewegt und kontinuierlich die Wassertiefe und die Bootsgeschwindigkeit registriert. Mit der Verbindung zu einem GNSS-Gerät wird darüber hinaus stetig die Position der Messtechnik auf dem Gewässer gemessen. Das eingesetzte *SonTek RiverSurveyor S5* besitzt einen Messbereich von 0,06 m bis 5 m bei einer Auflösung von 0,001 cm/s und einer Genauigkeit von  $\pm 0,2$  cm/s (SonTek, 2015).

## 3.3 Messpfahl

Um den Dünenkörper während einer Sturmflut zu vermessen, ist es nötig, die ausgewählte Messtechnik (TLS und Kameras) so zu positionieren, dass sie den Dünenkörper komplett erfasst. Zudem sollte sie so installiert werden, dass sie gegen mögliche Umwelteinflüsse wie Regen, Eis und Spritzwasser weitgehend geschützt ist. Dabei muss der Technikaufbau folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Einfache Installation der Technik bei widrigen Bedingungen,
- ein ausreichender Abstand zu der Forschungsdüne,
- Minimierung der Schwingungen durch Wind und Seegang,
- Energieversorgung der Messtechnik,
- Beständigkeit gegen Salzwasser und

- jederzeit wiederherstellbare Position (Saathoff und Kaehler, 2018).

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien, entwickelte die GK eine klappbare Messpfahl-Konstruktion, welche auf der im Strandbereich vorhandenen Bühnenreihe aufgesetzt wird. Durch die Möglichkeit, den Pfahl zu klappen, wird die Installation der Messtechnik, die auf der am oberen Ende des Messpfahls befindlichen Plattform angebracht wird, deutlich erleichtert (Abbildung 3.6, 3.7).



ABBILDUNG 3.6: Installation der Messtechnik am geklappten Messpfahl (Foto: Christian Kaehler).

Der Pfahl wurde hinsichtlich der möglichen Belastungen durch Wind und Wellen durch die Professur GK bemessen und anschließend durch die Rosoma GmbH gefertigt. Zur Minimierung der Schwingungen wird der Pfahl im Einsatzfall durch drei Stahlseile, die an der Bühne bzw. an zwei 500 kg schweren Betongewichten befestigt sind, abgespannt (Abbildung A.1). Damit die geforderten videophotogrammetrischen Daten auch ohne Tageslicht erhoben werden können, ist der Messpfahl mit zwei Scheinwerfern ausgerüstet. Um hinreichende Bedingungen für die Beleuchtung, die Messgeräte und die Erreichbarkeit zu schaffen, wurde ein Abstand von 15 m zur Forschungsdüne gewählt. Die dauerhafte Anbringung der Konstruktion im Strandbereich wurde durch die Hansestadt Rostock und das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Stralsund in den Wintermonaten außerhalb der touristischen Saison genehmigt. Detaillierte Angaben zur Konstruktion sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst.





ABBILDUNG 3.7: Aufbau der Messtechnik während der Sturmflut (Foto: Christian Kaehler).

TABELLE 3.4: Angaben zur Messpfahl-Konstruktion nach Saathoff und Kaehler (2018).

Konstruktionselement	Daten
Höhe Messpfahl	4 m (ab Bühnenkopf)
Durchmesser Messpfahl	10 cm
Stärke Messpfahl	4 mm
Material Messpfahl	Edelstahl (1.4301)
Stärke Bühnenadapter	6 mm
Durchmesser Stahlseile	6 mm
Betongewichte	500 kg
Beleuchtung	2 x 100 Watt LED
Energieversorgung	220 V

Abbildung 3.8 zeigt den aufgebauten Messpfahl bei erhöhtem Wasserstand ohne installierte Messtechnik. Nachdem der Pfahl aufgerichtet und seitlich zu Betongewichten abgespannt ist, wird dieser durch einen Edelstahlbolzen gesichert. Die eingehauste Messtechnik ist auf einer Stahlkonsole vormontiert und wird am oberen Ende des Messpfahls durch Schrauben befestigt. Detaillierte Erläuterungen zur Funktionsweise und zum Schutz der Messtechnik gegen Umwelteinflüsse können Abschnitt 3.4 entnommen werden.



ABBILDUNG 3.8: Aufgerichteter Messpfahl ohne seitliche Abspannung und ohne Messvorrichtung.

### 3.4 Messvorrichtung

Da der Laserscanner *FARO Focus3D X 130* nicht dafür ausgelegt ist, unter widrigen Wetterbedingungen zu messen, wurde eine Schutzhülle entwickelt, die den extremen äußeren Einflüssen standhält. Die *GoPro*-Kameras hingegen besitzen eine wasserdichte Schutzhülle.

Da die Akkulaufzeit des TLS nicht für die gesamte Dauer des Messereignisses ausreicht, wurde der TLS über ein Kabel, welches mit dem TLS-Fuß (Abbildung 3.9) verbunden wurde, mit Strom versorgt. Da sich der Körper des TLS bei jedem Messdurchgang mindestens einmal um die eigene Achse dreht, muss der TLS-Körper unabhängig von dem TLS-Fuß geschützt werden, da sich sonst das Ladekabel um die Schutzhülle eindrehen würde. Daraus folgt, dass die Schutzhülle für den Körper an dem TLS befestigt und von diesem mitgedreht werden muss. Da der integrierte Motor für mindestens 60 N ausgelegt ist und das Eigengewicht des TLS bei 5,2 kg liegt, musste die Hülle leicht, aber gleichzeitig widerstandsfähig gebaut werden.

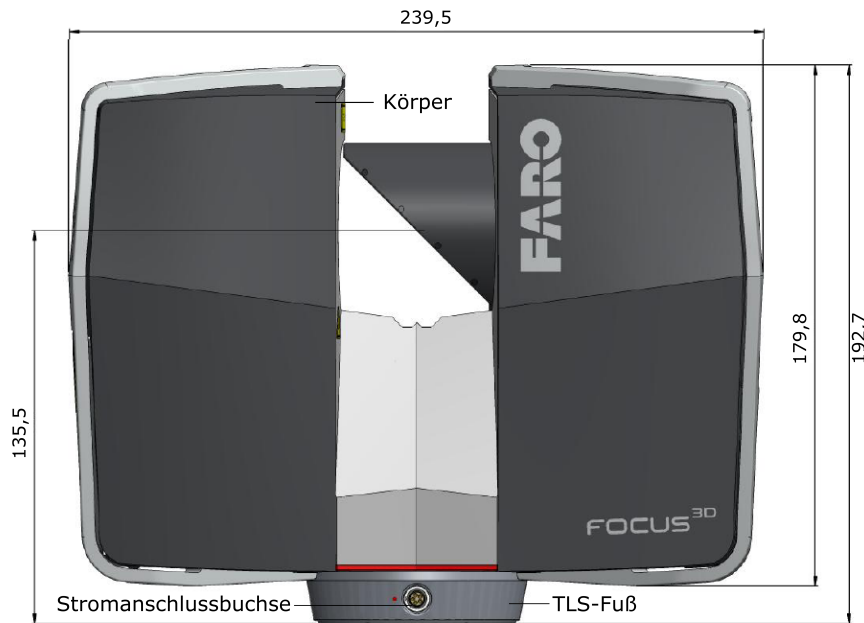


ABBILDUNG 3.9: FARO Focus3D X130 (Bemaßung in mm) nach FARO (2016).

Aus diesem Grund wurde eine Schutzhülle aus PLA (Polylactide) mit einem 3D-Drucker mit *Dual-Extruder* gedruckt (Abbildung 3.10). Die Schutzhülle ist mit dem TLS-Körper verschraubt und wird somit bei jedem Messdurchgang mitgedreht. Mit der Hülle wurde darüber hinaus ein Trichter verschraubt und verklebt, da diese Form nicht das Sichtfeld des TLS beschränkt und durch die Lamellen das Eindringen von Gischt und Sediment minimiert werden soll.

Im hinteren Teil der Hülle wurde Platz für einen *Raspberry Pi 1 Mod. B+* und eine Power Bank (20 000 mAh) gelassen. In den Werkseinstellungen des TLS ist die Option nicht gegeben, dass dieser ferngesteuert an- und ausgeschaltet werden kann. Deshalb wurde der AN/AUS-Schalter des TLS über einen Jumper mit dem *Raspberry Pi*, welcher mit einem *Edimax EW-7612UAN Wireless-LAN USB-Adapter* mit Antenne (300 Mbit/s) ausgestattet ist, verbunden. So kann im Störfall während einer Messung der TLS mit einem Empfänger neugestartet oder ausgeschaltet werden. Die Power Bank dient als Stromquelle für den *Raspberry Pi* während des Messversuchs. Um die einzelnen Komponenten austauschen und warten zu können, wurde auf der Hülle ein Deckel verschraubt.

Zum Schutz des Fußes des TLS wurde die gedruckte Hülle mitsamt dem TLS in ein 55,5 l Kunststoff-Weithalsfass gesetzt (Abbildung 3.11). In dem Fass wurde eine Holz-scheibe verklebt und verschraubt, um eine ebene Fläche zu schaffen. Darauf wurde der TLS platziert und verschraubt. In die Außenhaut des Fasses wurde eine Öffnung eingearbeitet, die dem TLS erlaubt, ein Gebiet von  $-15,5^\circ$  bis  $7^\circ$  vertikal, sowie  $0^\circ$  bis  $145^\circ$  horizontal zu scannen. Somit konnte die Versuchsdüne in Länge und Breite vollständig erfasst werden. Um die Öffnung in der Schutzhülle bestmöglich vor den äußeren Einflüssen zu schützen, wurde eine Vorrichtung für einen Luftvorhang entwickelt. Um diesen Luftvorhang während der Messkampagne aufzubauen, wurde ein Kompressor eingesetzt, der mit einem Druckluftschlauch, der parallel zum Stromkabel im

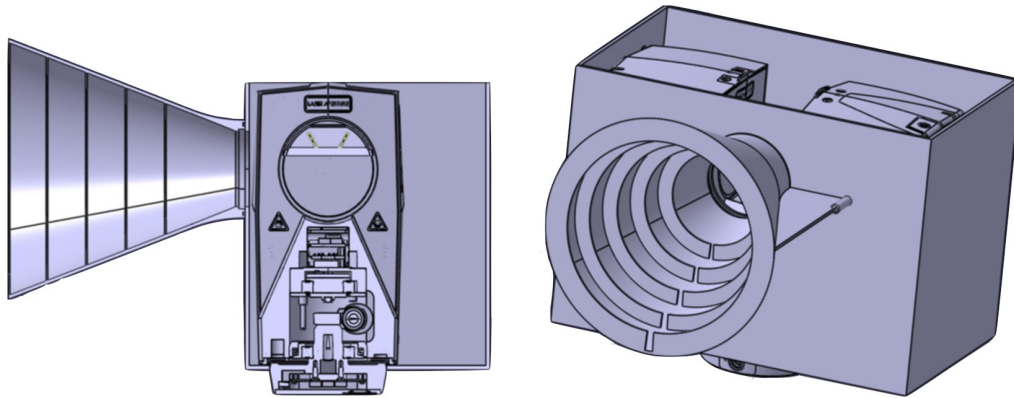


ABBILDUNG 3.10: Modell der gedruckten TLS-Schutzhülle (Koldrack, 2017).

Strandabschnitt vergraben wurde, mit dem Messsystem verbunden. Verschraubt wurde die äußere Schutzhülle auf einer Stahl-Plattform, die auf den Messpfahl gesetzt wurde, kurz bevor die Sturmflut eintrat. An der Unterseite der Plattform wurden zusätzlich die beiden *GoPro*-Kameras angebracht, die das Ereignis mittels Videophotogrammetrie aufzeichneten.



ABBILDUNG 3.11: Messvorrichtung, Weithalsfass mit eingesetzter TLS-Schutzhülle.

## Kapitel 4

# Parameter und Methodik

### 4.1 Geometrische Modelle

Für die nachfolgenden Betrachtungen in dieser Arbeit spielen folgende geometrischen Primitive eine zentrale Rolle.

**Punktwolke:**  $P \{x_i, y_i, z_i, \{r_i\}\} \forall i = 1, \dots, n$

Eine Punktwolke (point cloud) ist eine Menge von Punkten im dreidimensionalen Raum, die eine unorganisierte räumliche Struktur („Wolke“) aufweist (Otepka et al., 2013). Sie wird durch die in ihr enthaltenen Punkte definiert, die jeweils durch ihre Raumkoordinaten in einem zugeordneten Koordinatenreferenzsystem beschrieben sind. Zu den 3D-Koordinaten  $x_i, y_i, z_i$  können zusätzlich Attribute, wie z. B. Reflektionswerte  $r_i$  erfasst sein. Punktwolken können z.B. mit Laserscanning oder aus Bildern generiert werden. Sie stellen in der Arbeit den jeweiligen Eingabedatensatz für räumliche Analysen dar.

Eine Punktwolke wird charakterisiert durch die Anzahl der Punkte  $n$ , die i.d.R. sehr groß ist (üblich sind Millionen von Punkten). Zudem ist der durchschnittliche Punkt-Abstand ein gängiges Maß.

**Digitales Geländemodell:**  $DGM (P, I(k), S(j))$

Das DGM stellt eine Besonderheit hinsichtlich der geometrischen Modellierung an der Schnittstelle zwischen 2D und 3D dar. Das DGM ist eine Vereinfachung der realen Welt, die durch Idealisierung und Diskretisierung entstanden und für eine systematische Verarbeitung zugänglich ist (Bill, 2016).

In der Literatur finden sich die Begriffe Digitales Höhenmodell (DHM, im Englischen DEM) und Digitales Geländemodell (DGM, im Englischen DTM), die ungefähr gleich häufig und teilweise synonym Gebrauch finden. Nach Bill (2016) wird ein DHM als die Menge der digital gespeicherten Höhenwerte bezeichnet, die als Funktion der Lage der Punkte die Höhenstruktur des Objekts hinreichend repräsentieren. Das Digitale Situationsmodell (DSM) umfasst die digitale Speicherung der gemeinhin als Grundriss bezeichneten Information; jedem Grundrisselement ist eine ganz bestimmte Grundrissinformation zugeordnet. Im Zusammenhang mit dem DGM sind insbesondere die Grundrissinformationen relevant, die zur Strukturierung des Geländes dienen (Böschungskanten, Gerippelinien). Das DGM umfasst inhaltlich sowohl das DHM als auch das DSM, es enthält die digitale Speicherung sämtlicher Informationen über die Geländeoberfläche. Da im hier betrachteten Fall der Forschungsdünen keine

Situationsinformation enthalten ist, entspricht das DGM also dem DHM.

Zum DGM gehören zusätzlich zu den gespeicherten dreidimensionalen Koordinaten der oben definierten Punktwolke auch die Elemente zur Strukturierung des DGM  $S(j)$  und die Interpolationsalgorithmen  $I(k)$  zum Übergang von den diskreten Punkten auf Oberflächen.

Gängige Strukturierungsformen sind Dreiecksvermaschungen ( $j = 1$ : Triangular irregular network), Gitterstrukturen ( $j = 2$ : Grid) und hybride Formen ( $j = 3$ ). Während die Originalpunkte der Punktwolke bei der Dreiecksvermaschung die Dreieckspunkte bilden, wird bei Gitterstrukturen auf ein regelmäßiges Raster interpoliert, welches damit durch seine Rasterweite und die Rasterausrichtung definiert ist.

Für die Interpolation zwischen den Punkten der Punktwolke gibt es eine große Zahl an mathematisch definierten Interpolationsmöglichkeiten, wie z.B. Nearest neighbor ( $k = 1$ ), Inverse distance weighting ( $k = 2$ ), Spline ( $k = 3$ ), Kriging ( $k = 4$ ) u.v.a.

Zwischen Geländemodellen unterschiedlicher Zeitpunkte können Differenzen gebildet werden, die dann z.B. bezüglich der sich im Zeitlauf verändernden Höhenverhältnisse oder der Volumina verglichen werden können.

### Querprofil: Q (DGM, Ort, Richtung, Ebenengleichung)

Ein Querprofil (cross section) ist in der Ingenieurvermessung definiert als ein Profil in einer zum Grundriss der Längsachse eines Objekts senkrecht stehenden Ebene (Spektrum, 2020). Schneidet man die Erdoberfläche, im hier betrachteten Fall idealisiert durch das jeweilige DGM, an verschiedenen Orten mit senkrechten Ebenen, die rechtwinklig zur Achsrichtung des Objekts verlaufen, so erhält man als Schnittgeometrie Querprofile. Die Ausdehnung der Querprofile richtet sich nach der Art des Objekts und nach den Geländebeziehungen.

## 4.2 UAV-Parameter

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde ab 2016 regelmäßig das Teiluntersuchungsgebiet der Düne in Warnemünde mit UAV-Technik erfasst (Tabelle 4.1). Die Aufnahmen wurden mit den Multikoptern *Phantom 4 Pro* sowie der *AscTec Falcon 8* und dem Flächenflügler *senseFly ebee+* durchgeführt. Die UAV-Aufnahmen wurden anschließend auf Grundlage von ausgelegten Zielmarken und deren Einmessung als Passpunkte mit einem GNSS-Empfänger (*Leica Viva Net-Rover*) georeferenziert. Mit der Software *AgiSoft PhotoScan Professional Vers. 1.3.2* wurden anschließend die Bilddateien aufbereitet und 3D-Punktwolken sowie digitale Geländemodelle erstellt. Die *eBee+*-Drohne verfügt über eine RTK-Option, was eine hochgenaue Bestimmung der Projektionszentren ermöglicht. Im Postprocessing der Befliegung werden die aufgezeichneten GNSS-Daten mit den GNSS-Beobachtungen einer lokal aufgebauten und eingemessenen Referenzstation abgeglichen. Dadurch ist eine passpunktlose Aerotriangulation möglich. Anschließend werden die Daten mit der Software *Pix4D* prozessiert.

Durch die Nutzung verschiedener Drohnen und somit unterschiedlicher Kameras resultieren bei den Befliegungen verschiedene Parameter, die im Folgenden erläutert

TABELLE 4.1: Übersicht der UAV-Flüge während der Projektzeit.

Datum	Methode	Flughöhe [m]	GSD [cm]
03.11.2016	Falcon 8	25,4	0,33
07.11.2016	Falcon 8	15,6	0,21
12.01.2017	Falcon 8	61,9	0,77
31.08.2017	Falcon 8	63,4	0,79
17.11.2017	eBee+	92,3	1,90
15.12.2017	Falcon 8	61,7	0,78
12.01.2018	Falcon 8	62,3	0,79
07.02.2018	DJI P4	50,4	1,24
14.03.2018	Falcon 8	72,0	0,91
21.03.2018	Falcon 8	73,1	0,92
04.04.2018	Falcon 8	76,1	0,96
25.06.2018	eBee+	79,7	1,71
25.07.2018	DJI P4	67,1	1,74
17.08.2018	Falcon 8	84,0	1,79
13.09.2018	eBee+	68,7	1,48
12.10.2018	eBee+	68,4	1,46
05.11.2018	eBee+	70,7	1,52
16.11.2018	Falcon 8	68,2	0,88
19.11.2018	Falcon 8	68,7	0,89
10.01.2019	DJI P4	61,1	1,51

werden. Mit der *AscTec Falcon 8* wurde im Durchschnitt eine Flughöhe von 61 m gewählt. Die installierte Kamera war eine *Sony Alpha ILCE-7R* mit 35 mm Vollformat Exmor CMOS-Sensor mit 36,4 MP (Auflösung 7360 x 4912) ohne optischen Tiefpassfilter. So konnte eine mittlere Bodenauflösung (Ground sample distance, GSD) von 0,83 cm erreicht werden.

Der Flächenflügler *senseFly eBee+* besitzt eine *S.O.D.A.* (10,6 mm), eine Photogrammetriekamera, die für den professionellen Drohneneinsatz entwickelt wurde. Die mittlere Flughöhe betrug bei den Vermessungen 76 m und die GSD 1,61 cm.

Der Quadrocopter *Phantom 4 Pro* hat einen 1" CMOS-Sensor mit 20 Megapixeln im 35 mm-Format. Bei den Befliegungen wurde im Durchschnitt bei einer Flughöhe von knapp 60 m eine GSD von 1,49 cm erreicht.

### 4.3 Laserscanparameter

Um die gesamte Dünenlänge kontinuierlich zu scannen, wurden die in Tabelle 4.2 aufgeführten Parameter für den TLS festgelegt. So konnte die beste Scanauflösung in Abhängigkeit von der Scanzeit erreicht werden. Daraus resultiert eine Messdauer von jeweils 6:52 min. Wird der horizontale Scanbereich verringert, reduziert sich automatisch die jeweilige Messdauer. So konnte eine Scanfrequenz von 2,5 min für den östlichen Bereich der Düne beim Auftreten der ersten Bresche erreicht werden.

Die Qualitätsstufe verändert die Qualität der Scans, indem eine unterschiedlich starke Rauschkompensation oder bestimmte Messraten angewandt werden. Die Einstellung einer besseren Qualität vermindert somit das Rauschen, führt aber auch zu einer geringeren Scangeschwindigkeit.

TABELLE 4.2: Scaneigenschaften des TLS während der Messkampagne.

horizontale Ausdehnung	150°
vertikale Ausdehnung	22,5°
Auflösung	10,5 MPkte
Qualität	2x
Scangröße	8401 x 1254 Pkt

Mit den oben angeführten Messeigenschaften konnte auf 10 m Entfernung ein Punkt-  
abstand von 3,1 mm erreicht werden. Durchschnittlich wurden bei den 103 durch-  
geführten Scans 5,6 Millionen Punkte aufgenommen, die einen durchschnittlichen  
Punkt-  
abstand von 14 mm besaßen.

#### 4.4 Videoparameter

Für die *GoPro*-Kameras wurde eine Videoauflösung von 1080 p mit 30 fps gewählt, da  
Videos mit einer höheren Auflösung deutlich mehr Speicherkapazität benötigen. Für  
die *GoPro Hero3+ Black Edition* mit dem werkseitig montierten Weitwinkelobjektiv  
wurde ein enges Sichtfeld ausgewählt, um den „Fish-Eye-Effekt“ und die daraus fol-  
gende Verzerrung zu vermeiden. Für die *GoPro Hero4 Black*, bei der ein neues 5,4 mm-  
Objektiv eingesetzt wurde, kann dieser Effekt vernachlässigt werden.

#### 4.5 Optischer Fluss zur Bewegungsfeldgenerierung

Um die Videoaufnahmen der Versuchsdüne analysieren zu können, wurde im Rah-  
men einer Masterarbeit (Kraft, 2017) ein Programm zur visuellen Auswertung auf  
Grundlage des optischen Flusses geschrieben.

Der optische Fluss stellt ein Vektorfeld dar, welches für jeden Bildpunkt Bewegungs-  
informationen in Form von Bewegungsrichtung und Bewegungslänge angibt. Für die  
Berechnung wird eine Bildsequenz, bestehend aus mindestens zwei Bildern, benö-  
tigt. Werden zwei aufeinander folgende Bilder einer Sequenz betrachtet, entsteht bei  
der Bewegung von Objekten eine Verschiebung von Bildinformationen (Farb- oder  
Grauwertinformationen). Die Verschiebung für jeden einzelnen Bildpunkt wird durch  
einen Vektor  $\vec{v} = [u, v]^T$  beschrieben. Hierbei beschreibt  $u$  die Verschiebung in  $x$ -  
Richtung und  $v$  die Verschiebung in  $y$ -Richtung (Galvin et al., 1998). Als Funktion  
lässt sich das Vektorfeld in Abhängigkeit von Position  $x, y$  sowie der Zeit  $t$  folgend  
beschreiben:

$$\vec{v}(x, y, t) = [u(x, y, t), v(x, y, t)]^T \quad (4.1)$$

Für die Bildauswertung stützt sich das Programm auf den Algorithmus von Farne-  
bäck (2003). Der Algorithmus erkennt Verschiebungen von Objekten auf Bildsequen-  
zen, wobei die Technik für optische Flussdichten (*dense optical flow*) verwendet wird.  
Dies bedeutet, dass keine besonderen Punkte für die Bewegungserkennung betrachtet  
werden, sondern alle Punkte in einer Nachbarschaft.

Da eine Visualisierung aller Bewegungen von jedem Punkt des betrachteten Frames  
die Szene verdecken würde, wird nur bei einer Teilmenge der Punkte die Bewegung



analysiert. Vorzugsweise wird dafür ein gleichmäßiges Gitter von Trackern genommen (Abbildung 4.1).

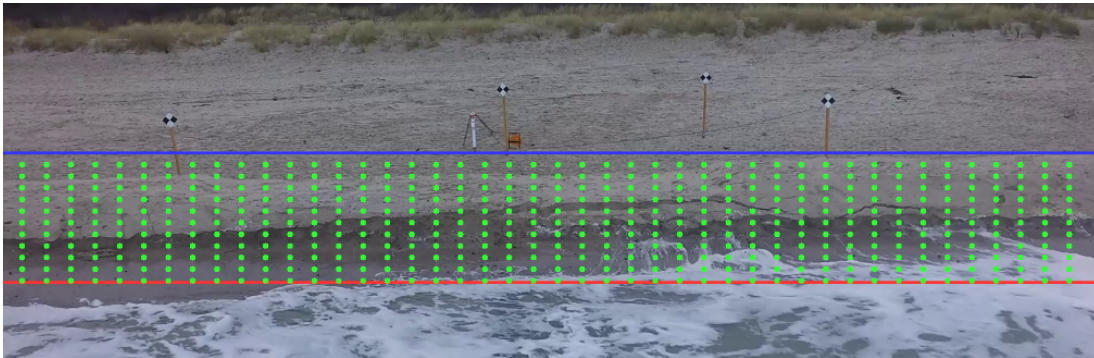


ABBILDUNG 4.1: Gleichmäßiges Gitter zur visuellen Auswertung.

## 4.6 Punktwolkenverarbeitung mit Cloud Compare

Die Open Source-Software *Cloud Compare* dient mit ihren zahlreichen Algorithmen zur Verarbeitung von Punktwolken und dreidimensionalen Geometrien. Für die Weiterverarbeitung der Laserscannerdaten wurde die Version 2.10 genutzt. Nach dem Hinzufügen der vom Laserscanner erzeugten Punktwolken in das Programm wurde das gescannte Gebiet grob beschnitten, um nicht benötigte Bereiche, wie z.B. den mit aufgenommenen Küstenschutzwald, herauszufiltern. Dadurch konnte die Scanpunktzahl in den jeweiligen Datensätzen deutlich verringert werden. Anschließend wurden die Punktwolken über die bereits eingemessenen Messtafeln halbautomatisch Georeferenziert. Dafür mussten mindestens drei Messtafeln in der Punktwolke registriert werden. Der daraus generierte Registrierungsreport beinhaltet, welche Punktgenauigkeit bei der jeweiligen Zuordnung erreicht wurde (Abschnitt 6.4). Abschließend wurden die bearbeiteten Punktwolken als Raster-Datensatz exportiert, um sie im GIS weiter bearbeiten zu können.

## 4.7 Geo-Informationssysteme zur Datenanalyse und Visualisierung

Für den weiteren Analyseprozess wurde *ArcMap* als Hauptkomponente der *ESRI-ArcGIS*-Serie verwendet. Die Software wird hauptsächlich zum Anzeigen, Bearbeiten, Erstellen und Analysieren von Geodaten verwendet und ermöglicht es dem Benutzer, geografische Informationen innerhalb eines Datensatzes abzuleiten und Karten zu erstellen.

Um die Lücken in den Rasterdatensätzen zu schließen, wird die Rasteroberfläche in eine Dreiecksvermaschung konvertiert, um es in der Oberflächenmodellierung zu verwenden. Um das DGM zu erhalten, werden die Punkte dreiecksvermascht und somit eine Netzstruktur geschaffen. Durch Triangulation werden daraufhin Kanten erzeugt und die generierten Dreiecke mit einer Flächenfüllung versehen. Durch diese Interpolation findet kein Genauigkeitsverlust statt, da die erzeugten Flächen durch eindeutig

definierte Punkte verlaufen. Anschließend werden die TIN-Daten wieder in Raster-Daten umgewandelt, um daraus lückenlose Höhenmodelle (Auflösung 1 cm) der Düne zu generieren, die als Grundlage für die weitere Analyse dienen (Abbildung 4.2).

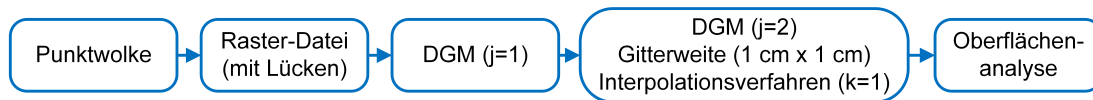


ABBILDUNG 4.2: GIS-Workflow.

Neben der Anwendung von *ArcGIS* wurde die neueste Komponente von *ESRI*, *ArcGIS Pro* verwendet, um Animationen aus einer Serie von Schlüsselbildern zu erstellen. So konnte beispielsweise die Differenz der einzelnen Höhenmodelle, also die Erosion der Düne, als gängiges Videoformat erstellt werden.

## 4.8 Visuelle Auswertung der Videoaufnahmen

Die visuelle Auswertung wurde auf Basis der von den Kameras aufgenommenen Videos durchgeführt. Da die genutzten Kameras typisch starke radialsymmetrische Verzerrungen besaßen, war eine Kalibrierung erforderlich (Abbildung 4.3). Mit der Visualisierung des optischen Flusses wurde die Auswertung der Ermittlung der Breschenbildung, trotz Bildrauschen und sich bewogender Partikel, deutlich vereinfacht. So konnte anhand von Referenzpunkten die Ausbreitung der Bresche in einer zeitlichen Auflösung von einer Minute festgehalten werden. Ebenso konnte die Wellenperiode aus den Aufnahmen abgeleitet und nach folgender Definition bestimmt werden: Die Periode  $T$  einer Welle bezeichnet den Zeitraum, nach dem sich der Wellenvorgang an einem festen Ort  $\vec{x} = (x, y)$  wiederholt (Mai et al., 2004). Der feste Ort war in diesem Fall das Erreichen des Dünenfußes.

Die Referenzpunkte des optischen Flusses halfen, die Wellenaufbauhöhe zu bestimmen. Hierfür wurde nach EurOtop (2018) der lotrechte Abstand des höchsten Punktes des Wellenaufbaus vom Ruhewasserstand bestimmt.

## 4.9 Bathymetrie-Daten

Während der Projektzeit wurde regelmäßig die topographische Gestalt des Teiluntersuchungsgebiets Bathymetrie vermessen (Tabelle 4.3). Bei guten Bedingungen (Wellenhöhe unter 30 cm und Windgeschwindigkeit unter 6 m/s bzw. ablandiger Wind), wurde in einem gleichmäßigen Raster der Vorstrand punktuell mit GNSS und Tachymetrie vermessen. Um das Einsinken und Abtreiben des Antennen- bzw. Reflektorstabs zu minimieren, wurde am Fuß des Stabs eine 5 mm starke Stahlplatte mit einer Kantenlänge von 15 cm installiert. Über die manuelle Punktvermessung hinaus kam im September 2017 ein ADCP zum Einsatz. Bei der Fahrt mit dem Ultraschallgerät (Unterabschnitt 3.2.6) konnten im Vergleich zu den anderen Zeitpunkten deutlich mehr Punkte im Teiluntersuchungsgebiet aufgenommen werden. So konnte im Schnitt eine Fläche von 26 134 m<sup>2</sup> mit einer durchschnittlichen Punktzahl von 3048 aufgenommen werden (ohne September 2017; 739 Punkte). Dabei betrug der durchschnittliche Punktabstand 8,32 m (ohne September 2017; 8,99 m).

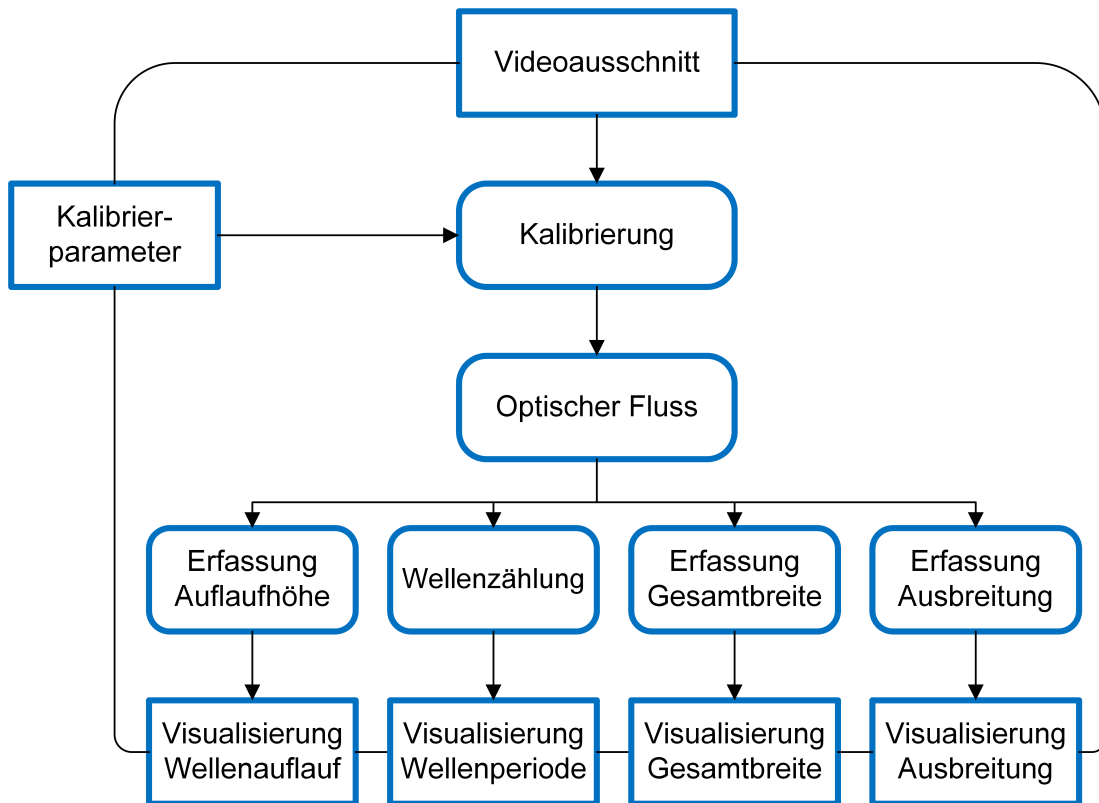


ABBILDUNG 4.3: Workflow des optischen Flusses.

TABELLE 4.3: Übersicht der Bathymetrie während der Projektzeit.

Datum	Flächengröße [m]	Punktzahl	Punktabstand [m]
14.07.2017	26 920	845	7,96
18.08.2017	22 708	642	8,84
22.09.2017	34 178	30 758	0,27
20.10.2017	26 982	831	8,11
20.11.2017	26 369	944	6,98
09.05.2018	25 915	802	8,07
07.06.2018	26 302	1187	5,53
03.07.2018	26 426	651	10,14
02.08.2018	26 657	583	11,43
05.09.2018	23 995	623	9,62
08.10.2018	24 541	577	10,63
07.11.2018	23 563	581	10,13
23.11.2018	25 187	599	10,51
Standardabw.	2890,72	8664,09	2,98
Median	26 302	651	8,84
Arith. Mittel	26 134,07	3047,92	8,32

In Abbildung 4.4 ist die mit GNSS aufgezeichnete Fahrt des Ultraschall-Geräts visualisiert. Die Bühnenfelder wurden bis etwa 25 m vor der Küstenlinie systematisch abgefahren. Aufgrund der geringen Wassertiefe war es nicht möglich, die direkte Uferzone mit dem Boot zu befahren. Die Flachwasserzone wurde daher mit GNSS und Tachymetrie manuell eingemessen.



ABBILDUNG 4.4: Sonarfahrt und GNSS-Punkte vom September 2017 im Teiluntersuchungsgebiet.

## Kapitel 5

# Ergebnisse

### 5.1 Teiluntersuchungsgebiet Düne Saison 2017/2018

Im ersten Feldversuch kam es zu keiner Breschenbildung im Dünenkörper. Dafür konnten drei wesentliche Gründe identifiziert werden: Zunächst wurde die Düne von den Hochwasserereignissen im ersten Zeitraum nur ungenügend belastet. Die Scheitelwerte der Ereignisse lagen unter den statistischen Pegelwerten für ein einjähriges Hochwasser bzw. erreichten diese nur knapp (Abbildung 5.1). Durch regelmäßige photogrammetrische Vermessungen des Untersuchungsgebietes konnte eine Erhöhung des Strandprofils durch den äolischen Sandtransport zwischen Dünenbauwerk und Uferlinie im Verlauf der Wintermonate um ca. 0,25 m nachgewiesen werden (Koldrack et al., 2019b). Durch diese Erhöhung kam es zu keinen nennenswerten Belastungen des Bauwerks durch Wasser und Wellen. Auf Grund des erhöhten Profils dissipierte ein Großteil der Seegangsenergie bereits im Vorfeld der Versuchsdüne.

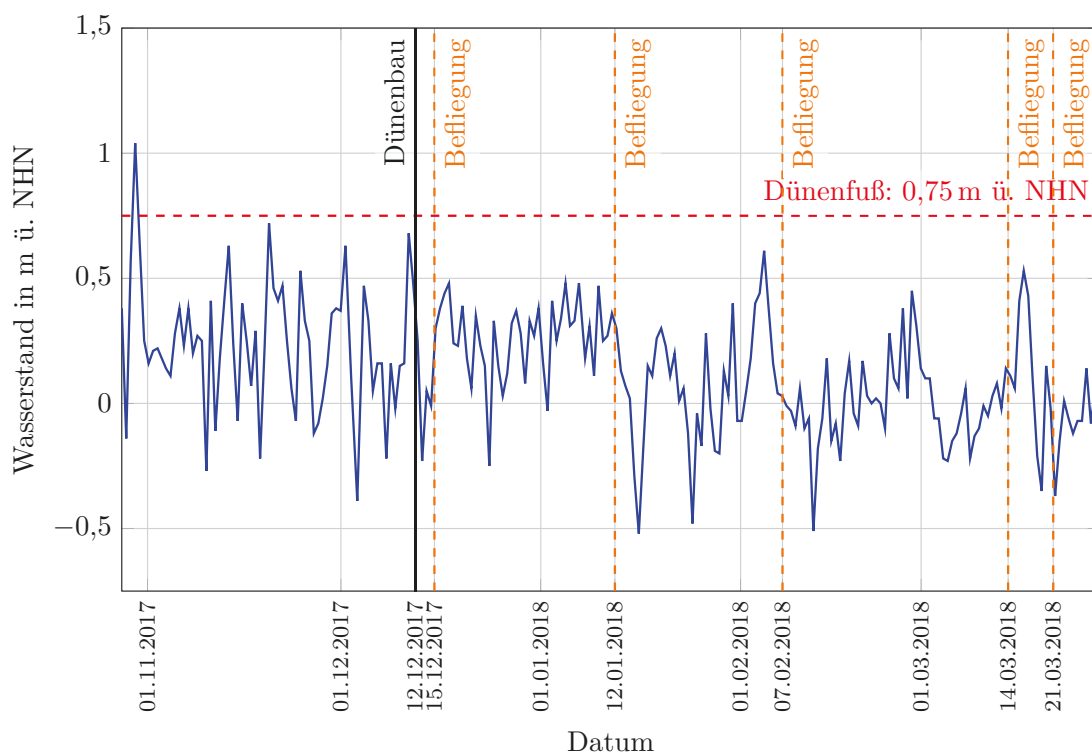


ABBILDUNG 5.1: Verlauf der Wasserstände und hierdurch induzierte Belastungen der Versuchsdüne in der Saison 2017/18 (modifiziert nach Kaehler (2018), Datengrundlage: (WSV, 2019)).

Um die Sand- und Materialablagerungen aufgrund von Sturmfluten und Wetterverhältnissen zu analysieren, wurde die Düne periodisch in der Wintersaison mit UAV befliegen (Abschnitt 4.1). Die aus den UAV-Bilddaten abgeleiteten DGM dienten der Bestimmung der Erosionseffekte, deren Ursachen durch Einbeziehung von offenen Wetter- und Pegeldata des DWD bzw. WSV ermittelt wurden. In Abbildung 5.2 ist der Initialzustand des Höhenmodells des Teiluntersuchungsgebiets Düne zu sehen. Im direkten Bereich nördlich der Versuchsdüne werden Geländehöhen von bis zu 1 m erreicht. Diese Höhen sinken in Richtung Küstenlinie bis unter 0,5 m.

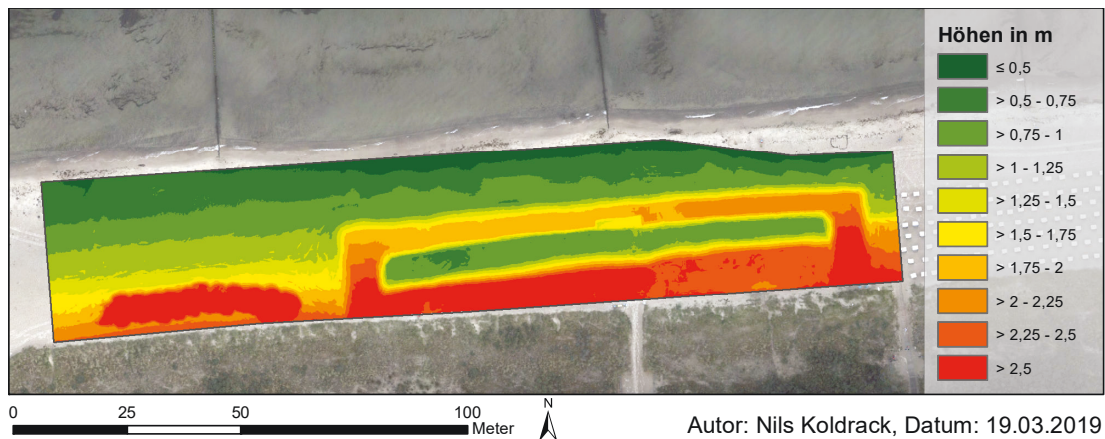


ABBILDUNG 5.2: Initial-Geländehöhenmodell des Teiluntersuchungsgebiets.

### Zeitraum 15. Dezember bis 12. Januar

Der Zeitraum zwischen der ersten und zweiten Befliegung nach Fertigstellung der Versuchsdüne zeigt nur eine geringfügige Erosion des Körpers (Abbildung 5.3). Deutlich in der Dünenmitte an der quadratischen Form in rot erkennbar ist die manuelle Nachbearbeitung der in der Dünenmitte vorgesehenen Sollbruchstelle für den geplanten Dünenbruch.



ABBILDUNG 5.3: Differenzmodell des Untersuchungsgebiets, zwischen 15. Dezember 2017 und 12. Januar 2018.

Charakteristisch für den Zeitabschnitt (Dezember 2017 bis Januar 2018) sind hohe Gesamtniederschläge von 33 mm und eine große Anzahl an Windstunden mit hohen Geschwindigkeiten von mehr als 10 m/s (Abbildung 5.4). Ebenso prägnant für den Zeitraum ist das Ausbleiben von Wind aus nördlicher Richtung, was mit ein Grund für die nicht zustande kommende Sturmflut ist.

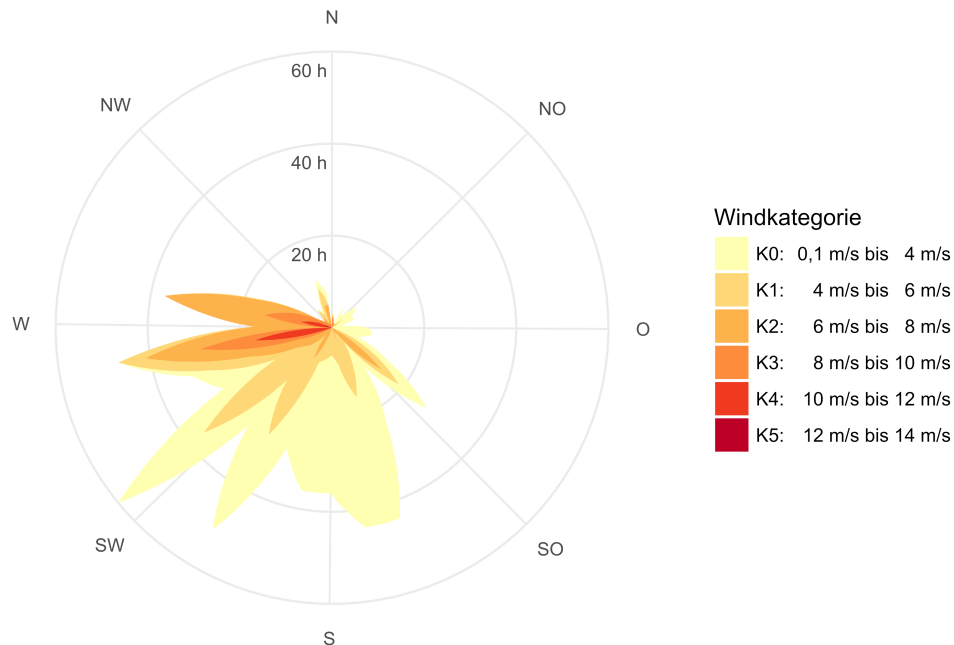


ABBILDUNG 5.4: Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit, 15. Dezember 2017 bis 12. Januar 2018.

Trotz eines dreistündigen Westwindes mit Windgeschwindigkeiten von über 12 m/s und kumulierten 24 Stunden mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 10,1 m/s aus West-Nordwest vom 23. bis 24. Dezember 2017 (mit 1,2 mm/d Niederschlag) sowie am 3. Januar 2018 (20,7 mm/d) und 4. Januar 2018 (3,0 mm/d), blieb eine größere Materialverlagerung aus. Bei den Niederschlägen am 3. Januar handelte es sich um die Höchstwerte während der Dünenstandzeit. Die Oberfläche des für Reparaturarbeiten errichteten und nicht verdichteten Sandlagers war hingegen deutlich windanfälliger und nahm verbreitert um 20 cm ab.

Deutlich erkennbar ist ein hohes Maß an Sandablagerung am Spülsaum der Düne. Aus nördlicher Richtung waren am 16. und 17. Dezember 2017 Windgeschwindigkeiten zwischen 8,0 m/s bis 10 m/s zu verzeichnen. Gleichzeitig zeigt die Ganglinie einen hohen Wasserstand vor der Düne von etwa 0,5 m ü. NHN (Abbildung 5.1), bei der auf einer Höhe von 0,75 m ü. NHN liegende Dünenfuß aber nicht erreicht wurde.

### Zeitraum 12. Januar bis 7. Februar

Das Differenzmodell der Versuchsdüne zeigt eine zum ersten Zeitraum vergleichbare Erosion der Kerndüne. Festzustellen sind Sedimentablagerungen nördlich der Versuchsdüne und an der östlichen Flanke (Abbildung 5.5). 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 m/s erreicht. Die Niederschläge fielen in dieser Zeit mit 3,3 mm/d und 0,1 mm/d vergleichsweise gering aus. Abbildung 5.5 zeigt 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 lag dabei bei 0,4 m ü. NHN. Hingegen verfehlte der Wasserstand die Höhe des Dünenfußes von 0,75 m ü. 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 nur knapp. Der erhöhte Wasserstand könnte ausschlaggebend dafür gewesen sein, dass sich die Geländehöhe des Spülsaums nördlich und nordöstlich der Versuchsdüne bis zu 60 cm verringert hat.

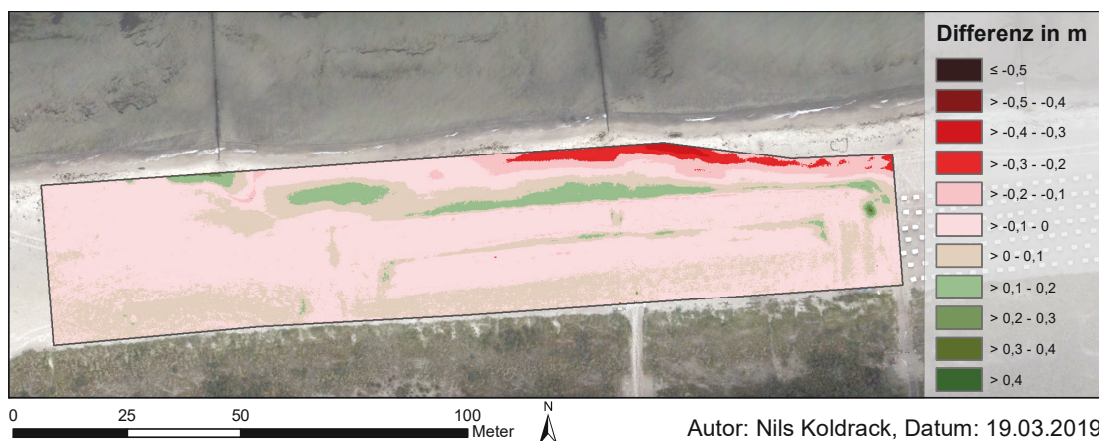


ABBILDUNG 5.5: Differenzmodell des Untersuchungsgebiets, zwischen 12. Januar 2018 und 7. Februar 2018.



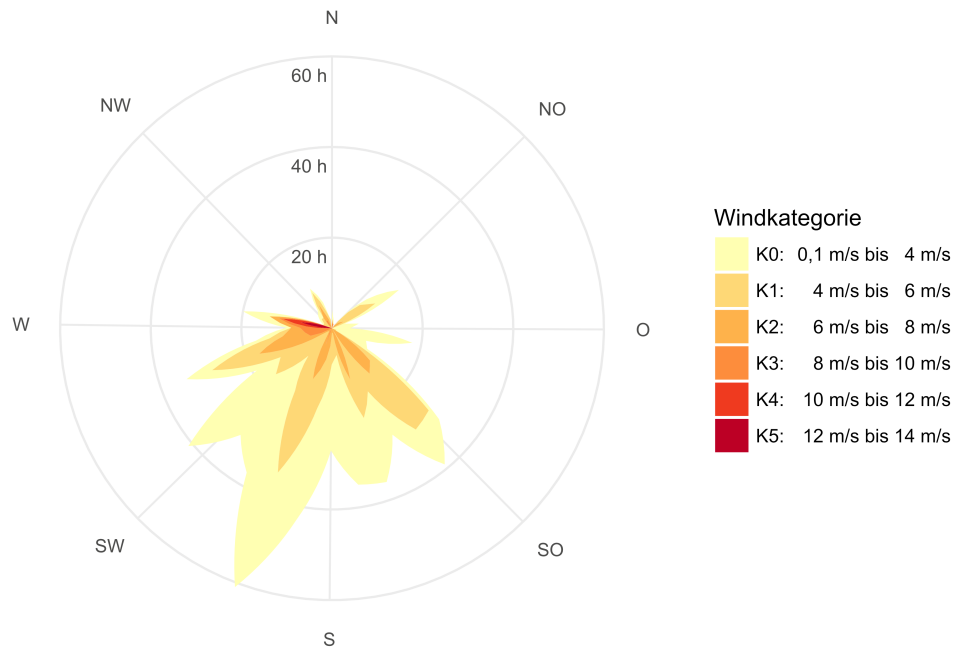


ABBILDUNG 5.6: Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit, zwischen 12. Januar 2018 und 7. Februar 2018.

### Zeitraum 7. Februar bis 14. März

Das Differenzmodell vom 7. Februar zum 14. März zeigt nur geringe Veränderungen der Kerndüne auf (Abbildung 5.7). Während keine Erosion im betrachteten Strandausschnitt erkennbar ist, lagerte sich Sand am Spülsaum der Versuchsdüne ab. Der in diesem Zeitraum durchgängig vergleichsweise niedrige Wasserstand zeigt, dass eine durch einen höheren Wasserstand induzierte Sedimentation als Ursache für die Materialablagerungen vor der Düne ausgeschlossen ist. Gleichzeitig sind in diesem Zeitraum 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 zwangsläufig 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 (Abbildung 5.8). Denkbar ist, dass die Winderosion durch den gleichzeitig vorliegenden geringen Niederschlag von 0,3 mm/d bzw. 3,2 mm/h bei niedriger stündlicher Regenintensität gehemmt wurde, ohne dabei selbst erodierend zu wirken.

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 des leichten Niederschlags.

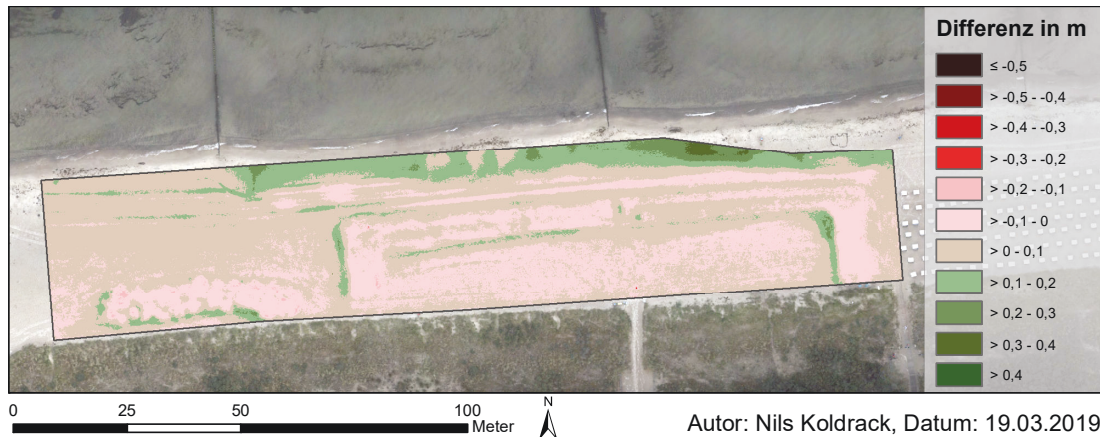


ABBILDUNG 5.7: Differenzmodell des Untersuchungsgebiets, zwischen 07. Februar 2018 und 14. März 2018.

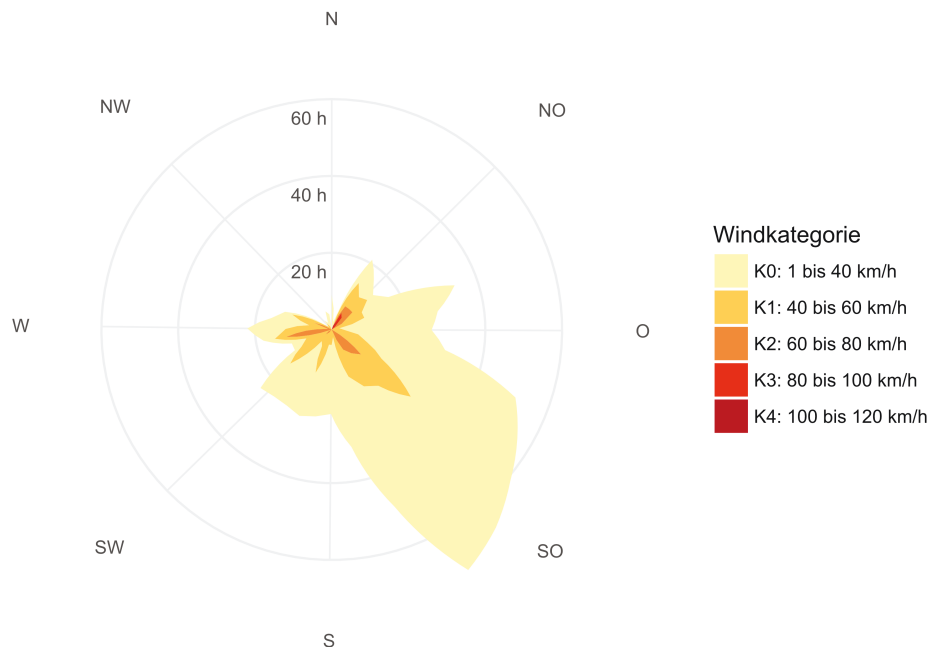


ABBILDUNG 5.8: Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit, zwischen 07. Februar 2018 und 14. März 2018.

### Zeitraum 14. März bis 21. März

Die für den letzten Zeitabschnitt dargestellte Erosion der Düne übersteigt die übergreifende Erosion vom 15. Dezember bis zum 14. März deutlich (Abbildung 5.9). Der Zeitraum weist mit 4,1 mm einen sehr geringen Gesamtniederschlag auf. Auch die Windstunden mit hohen Geschwindigkeiten sind vergleichbar mit den Werten aus dem vorherigen Zeitraum, liegen jedoch deutlich unter der Stundenzahl des ersten und zweiten Zeitabschnitts. Wird die Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten und dominierenden Windrichtungen betrachtet, wird deutlich, warum insbesondere hotspotartige Sandablagerungen westlich der Versuchsdünenflanken sowie des westlichen Sandhaufens zustande kommen. Der Küstenabschnitt war in diesem Zeitraum

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 (Abbildung 5.10). 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.

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 Bergung von vergrabenen Sensoren vor dem Rückbau der Düne.

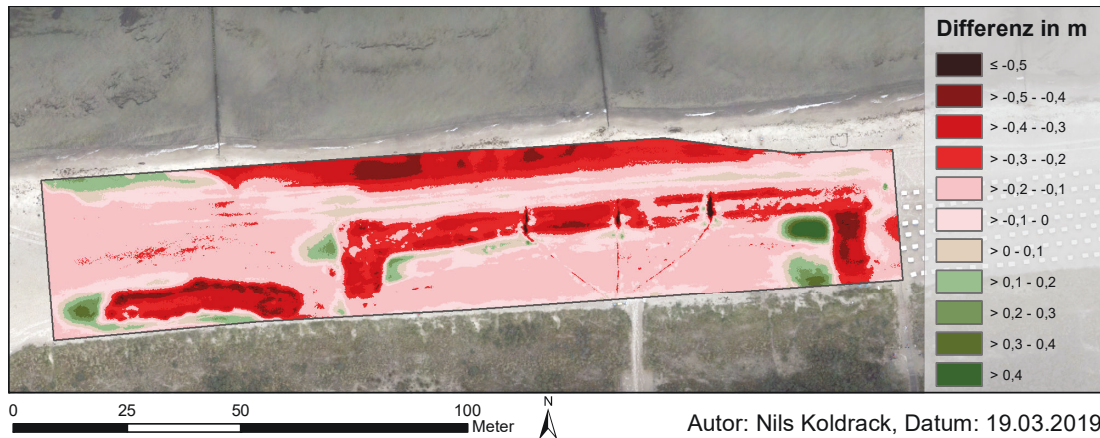


ABBILDUNG 5.9: Differenzmodell des Untersuchungsgebiets, zwischen 14. März 2018 und 21. März 2018.

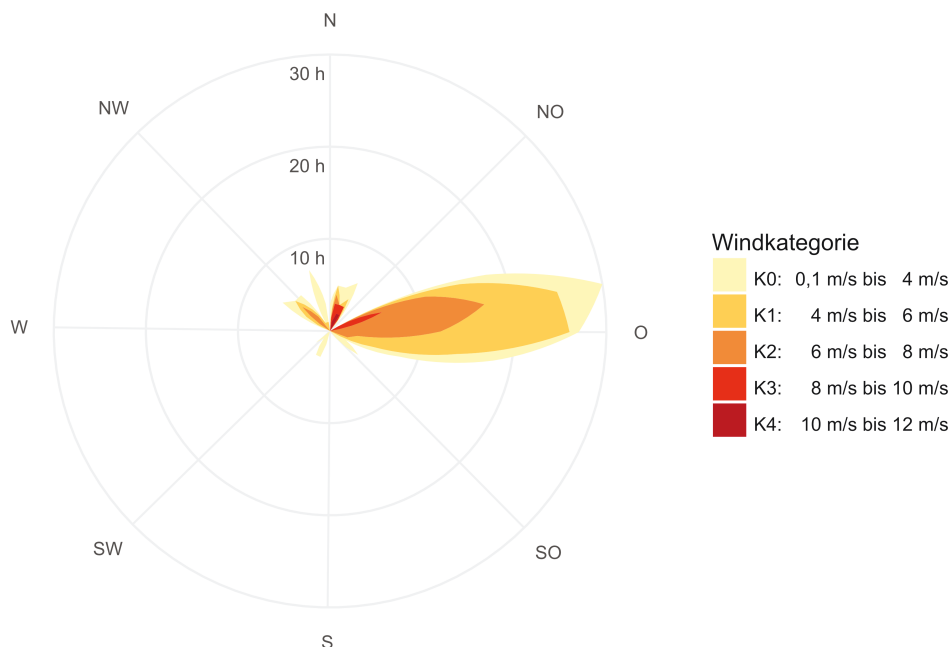


ABBILDUNG 5.10: Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit, zwischen 14. März 2018 und 21. März 2018.

### Zeitraumübergreifend

Das Differenzmodell der über den gesamten Zeitraum wirkenden Erosion (Abbildung 5.11) zeigt starke Höhenveränderungen an der Versuchsdüne. Es ist eine deutliche Sandabtragung in Westrichtung festzustellen. Dies gilt für die See- und Landseite der Düne. Ein besonderer Hotspot der Sandablagerung ist westlich in unmittelbarer Nähe der 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 Bereiche der gegenüberliegenden Flanke hingegen nur um 10 cm bis 30 cm.



ABBILDUNG 5.11: Differenzmodell des Untersuchungsgebiets, zwischen 15. Dezember 2017 und 21. März 2018.

Die Volumenberechnung der Düne zeigt eine Gesamtabtragung von  $243 \text{ m}^3$ , was 20,3% des gesamten Volumens entspricht. Wird die Häufigkeit der Windrichtungen und -stärken über den gesamten Untersuchungszeitraum betrachtet, wird deutlich, dass vor allem aus nördlicher Richtung kaum Winde über einen längeren Zeitraum mit hoher Geschwindigkeit wehten (Abbildung 5.12). Dies trug womöglich auch zum Ausbleiben der für das Projekt relevanten Sturmflut bei (Abbildung 5.1).

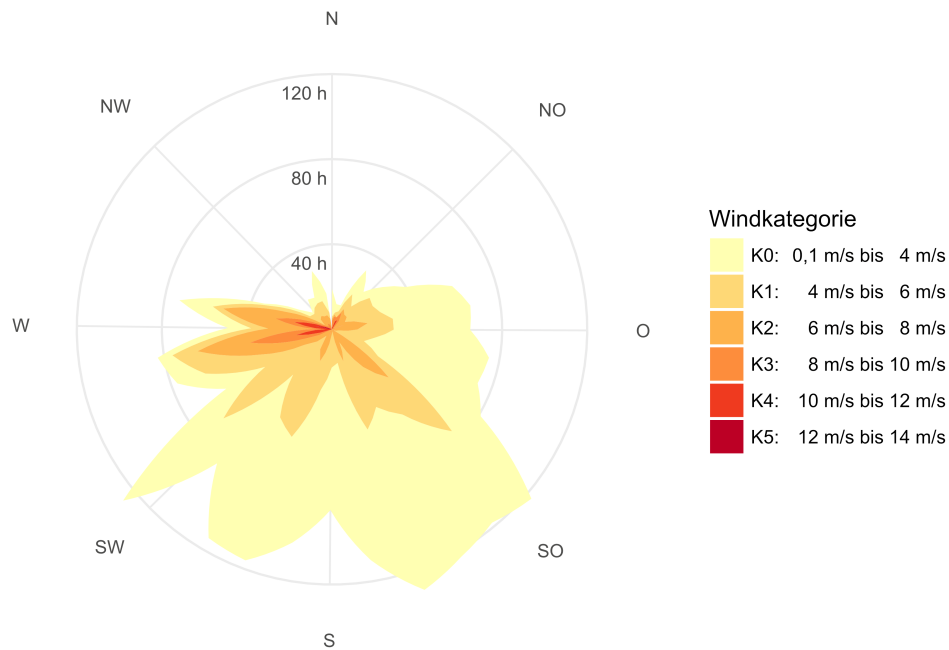


ABBILDUNG 5.12: Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit, 15. Dezember 2017 bis 21. März 2018.

## 5.2 Teiluntersuchungsgebiet Düne Saison 2018/2019

Nachdem am 16.11.2018 alle Arbeiten zum Bau der Düne abgeschlossen waren, kam es bereits am 18.11.2018 zu dem gewünschten Hochwasser, welches die Versuchsdüne, nachdem zwei Breschen aufgetreten waren, wieder zerstörte (Impressionen der Messkampagne: Abbildung A.2 - Abbildung A.7). In den folgenden Unterabschnitten wird auf die hydrodynamischen und meteorologischen Randbedingungen während des Messvorgangs eingegangen und anschließend die Dünenerosion analysiert.

### 5.2.1 Randbedingungen

Die hydrodynamischen Randbedingungen teilen sich auf in Wasserstand und Seegang (Wellenhöhe und -richtung). Die Wasserstandsdaten werden in einem Intervall von 10 min von der WSV abgerufen. Der mittlere Wasserstand wurde um etwa 12 Uhr am 18.11.2018 überschritten (Abbildung 5.13). Bereits um 14:30 Uhr wurde der Dünenfuß bei einem Wasserstand von 0,28 m ü. NHN belastet. Hierbei spielte allerdings der Wasserstand nur eine untergeordnete Rolle, in erster Linie war der Wellenaufbau der größte Belastungsfaktor. Der Wasserstand stieg zunächst bis 18:00 Uhr auf 0,55 m ü. NHN. Auf diesem Niveau verblieb der Wasserspiegel bis ca. 1 Uhr. Danach stieg dieser weiter an, bis um 03:10 Uhr mit 0,66 m ü. NHN der höchste Wasserstand erreicht wurde. Zwei Stunden lang blieb der Wasserstand auf diesem Niveau, ehe dieser langsam absank und nach circa 36 Stunden der Mittelwasserstand (0,08 m ü. NHN) wieder erreicht wurde.

Neben dem erhöhten Wasserstand spielt bei der Belastung der Düne auch die Wellenhöhe und -anlaufzeit eine entscheidende Rolle. Die Seegangsdaten werden

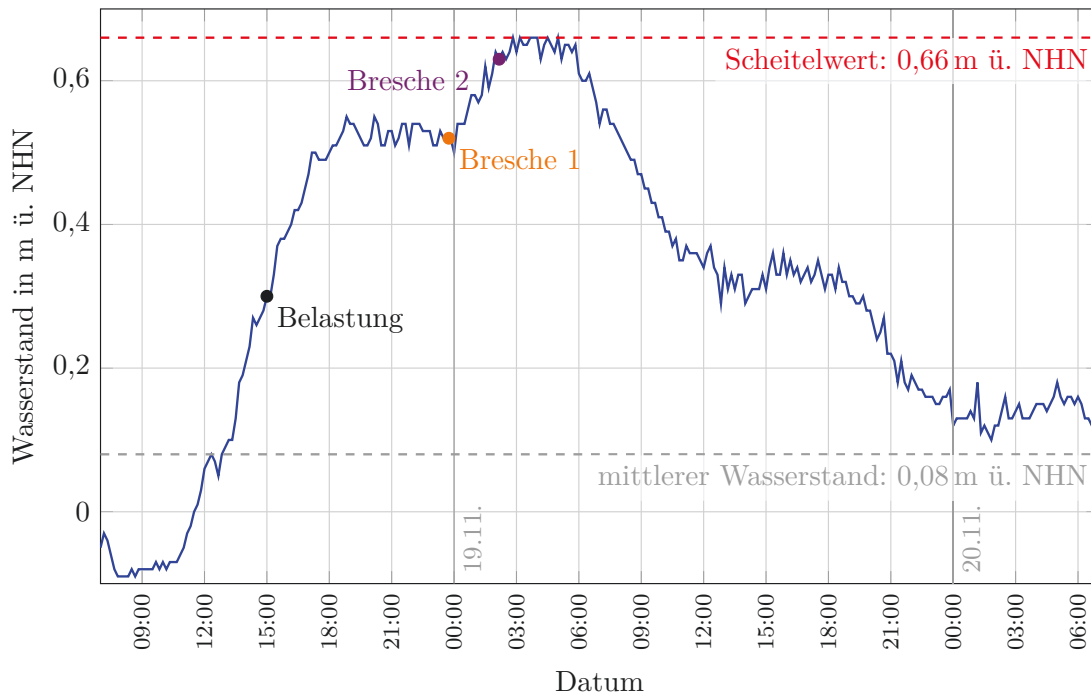


ABBILDUNG 5.13: Wasserstandsganglinien während der Sturmflut vom 18. bis 19.11.2018 (modifiziert nach Saathoff et al. (2019), Datengrundlage: IMK).

durch drei Messbojen im Rahmen des IMK, die im Seegebiet vor Warnemünde liegen, aufgezeichnet. Die Messbojen liegen bei einer Wassertiefe von 3,2 m (IMK Sensor), 4 m (RAdOst AWAC 4) und 10 m (RAdOst Messboje). In der Abbildung 5.14 sind die Verläufe der Wellenhöhe und -anlaufrichtungen während der Sturmflut dargestellt. Zusätzlich sind die Zeitpunkte der Belastung und des Entstehens der beiden Breschen eingezeichnet. Die Wellenanlaufrichtung kam an der RAdOst Messboje ( $d = 10$  m) konstant aus nordnordöstlicher Richtung (ca.  $20^\circ - 30^\circ$ ). Beim Anlauf in flacheres Wasser drehte die Anlaufrichtung aufgrund von Refraktion auf nördliche Richtung ( $0^\circ - 10^\circ$ ) (RAdOst AWAC 4). Belastet wurde die Düne bei einer signifikanten Wellenhöhe von ca. 0,6 m zwei Stunden nach Beginn der Sturmflut. Die größte Wellenhöhe trat nach acht Stunden mit  $H_{m0} = 1,13$  m auf. Zu dem Zeitpunkt lag der Wasserstand bei nur 0,55 m ü. NHN, der höchste Wert der Wellenhöhe und des Wasserstandes traten zeitversetzt auf. Der höchste Wasserstand hingegen trat nach 15 Stunden mit 0,66 m ü. NHN ein. Zu dem Zeitpunkt hatte die Wellenhöhe schon wieder abgenommen (ca. 0,9 m). Erst 18 Stunden nach Beginn des Hochwassers, nahezu zeitgleich mit dem Absinken des Wassers, nahm die Wellenhöhe stetig ab. Anzumerken ist, dass der IMK-Sensor nur die signifikante Wellenhöhe aufgezeichnet hat, die Messung der Wellenanlaufrichtung ist ausgefallen.

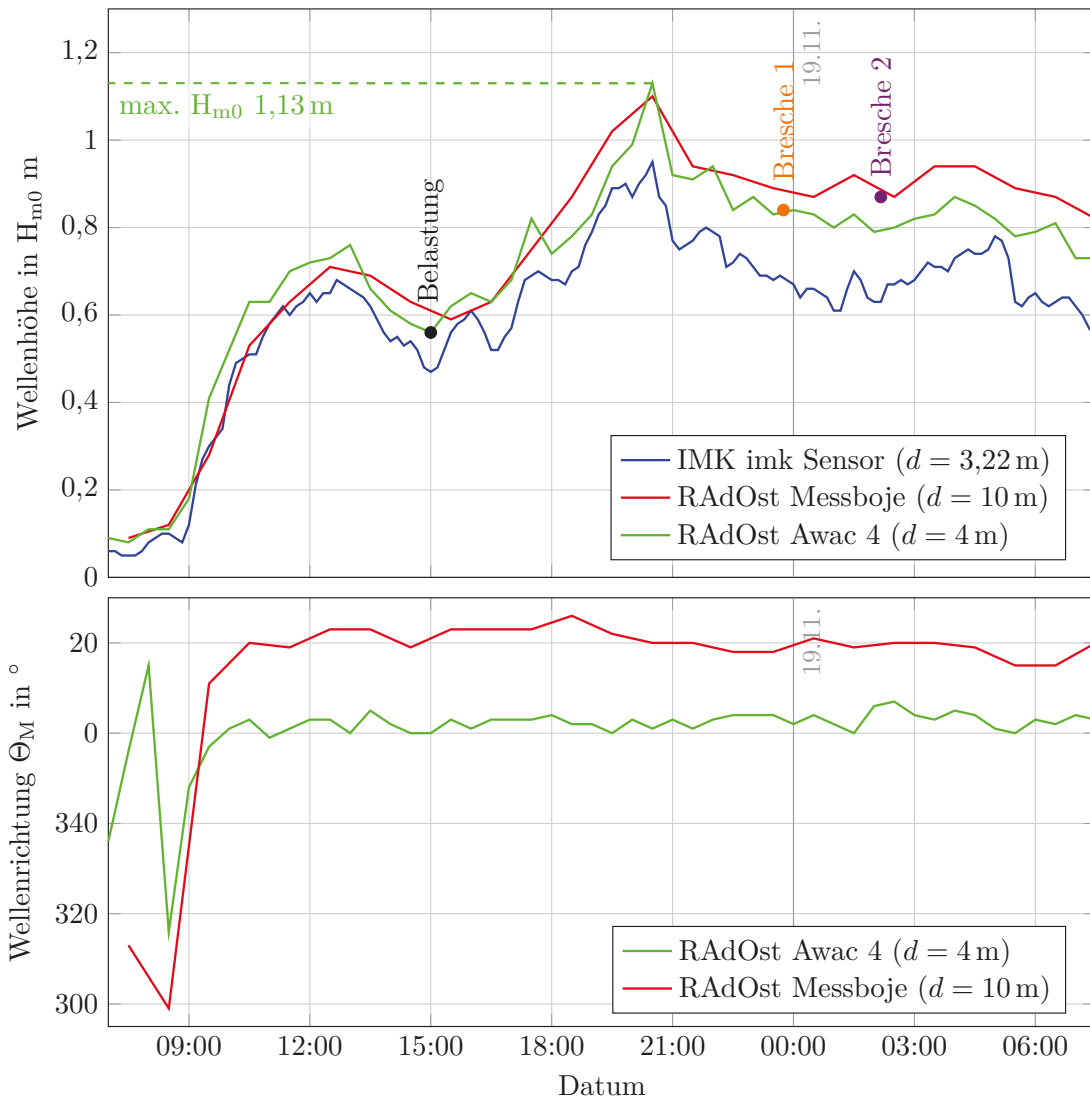


ABBILDUNG 5.14: Verlauf der Wellenhöhe und -anlaufrichtung während der Sturmflut (modifiziert nach Saathoff et al. (2019), Datengrundlage: IMK, RAdOst).

In den ersten Stunden der Messkampagne kam der Wind aus nordöstlicher Richtung und hatte eine Geschwindigkeit von circa 7 m/s (Abbildung 5.15). Zum Ende der Messung drehte der Wind in östliche Richtung und die Windgeschwindigkeit verringerte sich auf 3,8 m/s. Die Temperatur in dem Zeitraum blieb bei circa 6 °C konstant und vereinzelte Regenschauer verursachten einen Niederschlag von 1,4 mm. Die Wellenperiodendauer lag zum Beginn der Messkampagne bei 2,8 s (Abbildung 5.16). Mit Erhöhung der Windgeschwindigkeit stieg ebenso die Periodendauer. Der höchste Wert wurde um 20:00 Uhr mit 3,5 s erreicht. Im weiteren Verlauf nahm die Periodendauer stetig ab. Der Durchschnittswert im gemessenen Zeitraum lag bei 2,93 s.

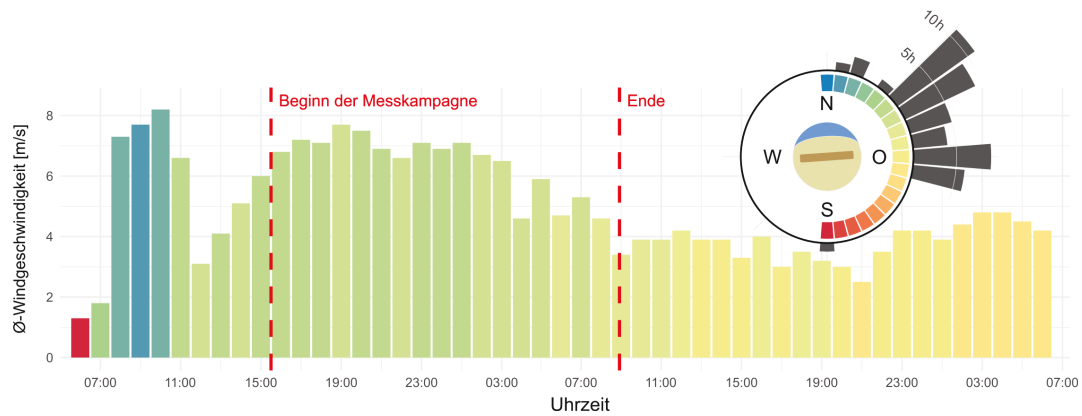


ABBILDUNG 5.15: Windgeschwindigkeit und -richtung während der Messkampagne.

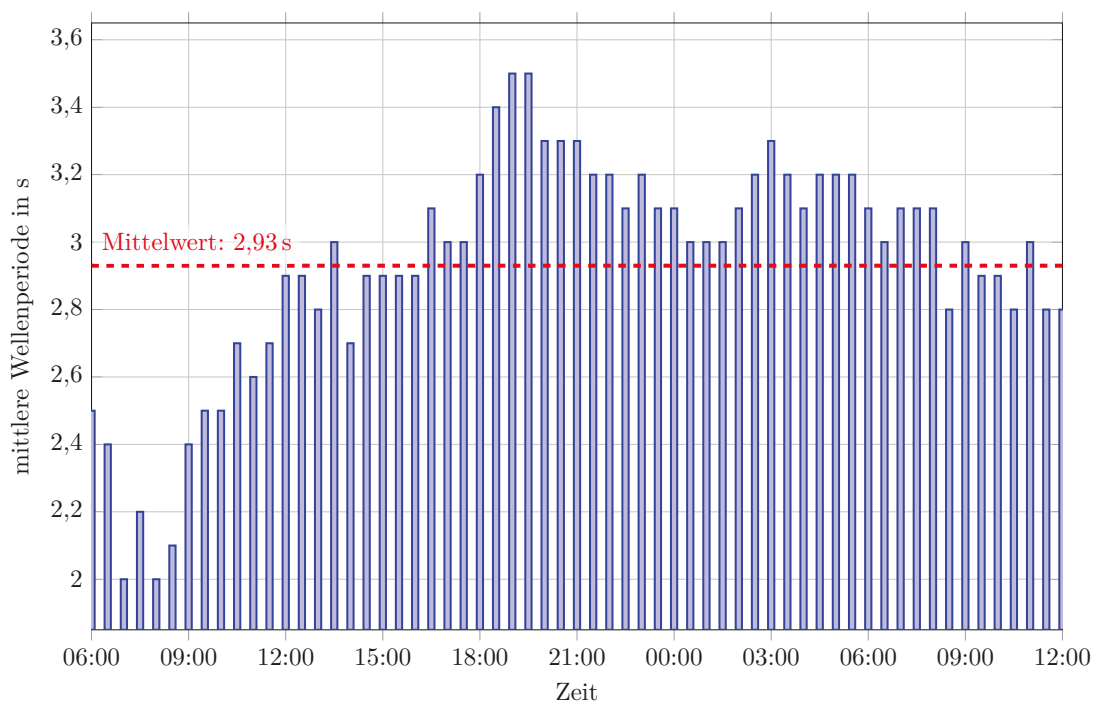


ABBILDUNG 5.16: Wellenperiodendauer während der Messkampagne (18.11. bis 19.11.2018) auf Basis der Messbojendaten.

### 5.2.2 Breschenentwicklung

Während der Messkampagne kam es an der Versuchsdüne zu zwei Durchbruchsbereichen (Abbildung 5.17). Im östlichen Durchbruchsbereich entstand um 23:45 Uhr die erste Bresche. Kurz darauf bildeten sich in dem Bereich zwei weitere Durchbrüche. Im weiteren zeitlichen Verlauf vereinigten sich diese zu einer großen Bresche. Mittig der Sollbruchstelle entstand um 02:10 Uhr ein weiterer Durchbruch.

Um die Dünenerosion zu analysieren und die Entwicklung der Breschenbildung darzustellen, wurden an drei Abschnitten in einem Abstand von einem Meter Querprofile senkrecht zur Dünenachse gelegt. In den folgenden Unterabschnitten wird die Entwicklung der Breschen und die Erosion an den jeweiligen Bereichen dargelegt.



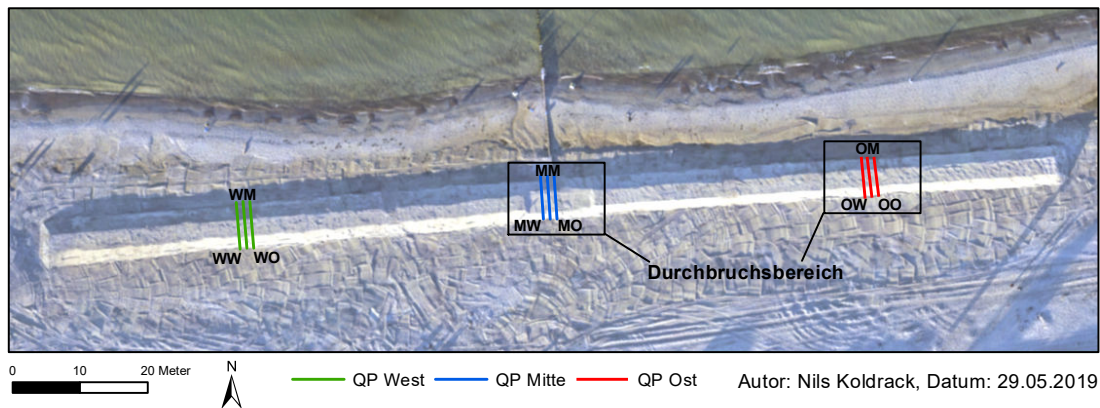


ABBILDUNG 5.17: Positionen der gemessenen Dünenquerprofile.

### 5.2.3 Dünenabschnitt Ost

Um 15:45 Uhr, dem Zeitpunkt der ersten Laserscannmessung, war der Dünenfuß mehr als eine Stunde belastet. Eine Stunde später war erst wenig Sand von der Düne erodiert (Abbildung 5.18). Am Dünenfuß sind ca. 10 cm Sand weggespült worden und nur wenig Material von der Dünenkrone war nachgerutscht. Nach zwei Stunden wurde der Dünenfuß um 42 cm erodiert, Sand hatte sich vor der Düne abgelagert und der Fuß hatte sich um 9 cm angehoben. Nach drei Stunden hatte sich der Dünenkörper an diesem Standort um 1,37 m in der Tiefe verkleinert und es hat sich deutlich mehr Material vor dem Dünenfuß angesammelt, sodass die Wellen eine größere Geländehöhe überwältigen mussten, um die Düne zu belasten. Vier Stunden nach der ersten Messung war die Dünenkrone durch den hohen Wellenauflauf um 15 cm geschrumpft und der Dünenkörper war um 2 m zurückgegangen. In den nächsten zwei Stunden wurde deutlich weniger Material von der Düne gespült, erst in der letzten Stunde verringerte sich die Dünenkronenhöhe auf eine Geländehöhe von 1,07 m. Dies entspricht einer Reduktion um 40 cm. Der Wasserspiegel betrug zu diesem Zeitpunkt 0,53 m ü. NHN. Anhand der TLS- und Videodaten wurde jedoch um 23:45 Uhr eine mittlere Auflaufhöhe von 1,02 m ü. NHN festgestellt. Ein Grund für diesen Unterschied kann der Standort der Pegelmessung des WSV sein. Dieser liegt wind- und wellengeschützt im Breitling, einer rund 2500 m breiten Erweiterung der Unterwarnow kurz vor deren Mündung in die Ostsee. Die Wellen überströmten die Düne und die erste Bresche entstand.

Analog dazu schritt die Erosion der Düne einen Meter weiter östlich in den ersten drei Stunden voran (Abbildung 5.19). Der Verschleißteil verschwand vollkommen und der Dünenkörper erodierte um 1,3 m. Das Material lagerte sich vor der Düne ab und der Dünenfuß erhöhte sich um 18 cm. In der darauffolgenden Stunde wurden 1,06 m der Düne durch die Sturmflut abgetragen und die Dünenkronenhöhe verringerte sich um weitere 5 cm. In den nächsten Stunden, bis um 23:45 Uhr, wurde deutlich weniger Material von der Düne gespült (0,68 m) und die Dünenkrone verringerte sich auf eine Geländehöhe von 1,31 cm, sodass es hier zu keiner Breschenbildung kam.

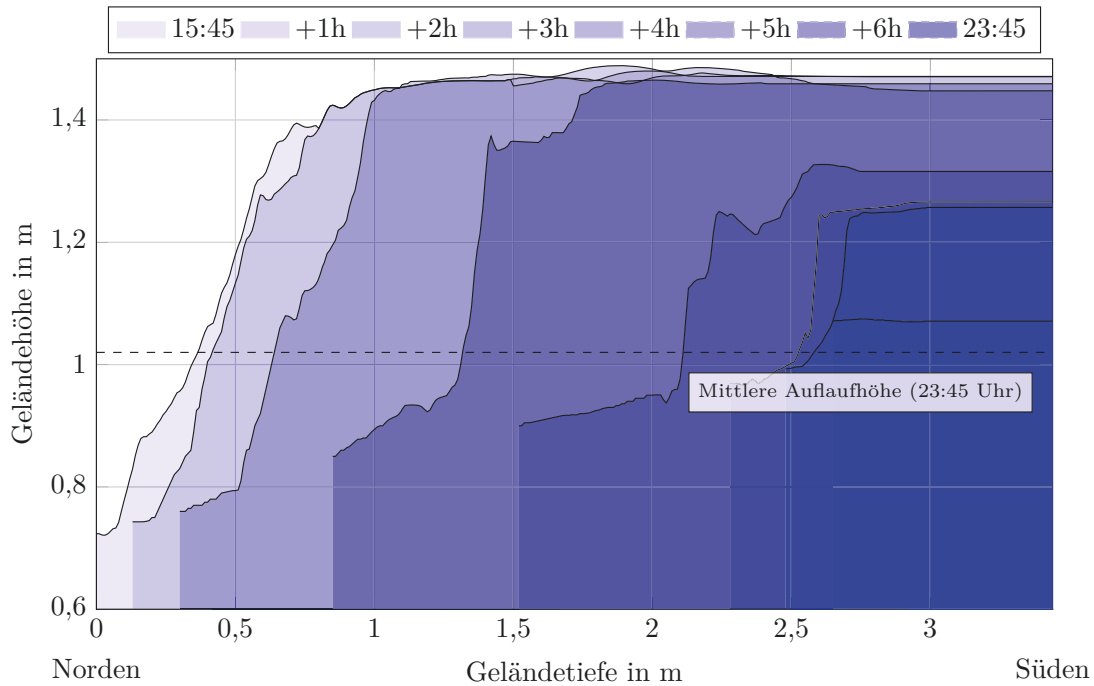


ABBILDUNG 5.18: Querprofil Ost-Mitte in Normalhöhe.

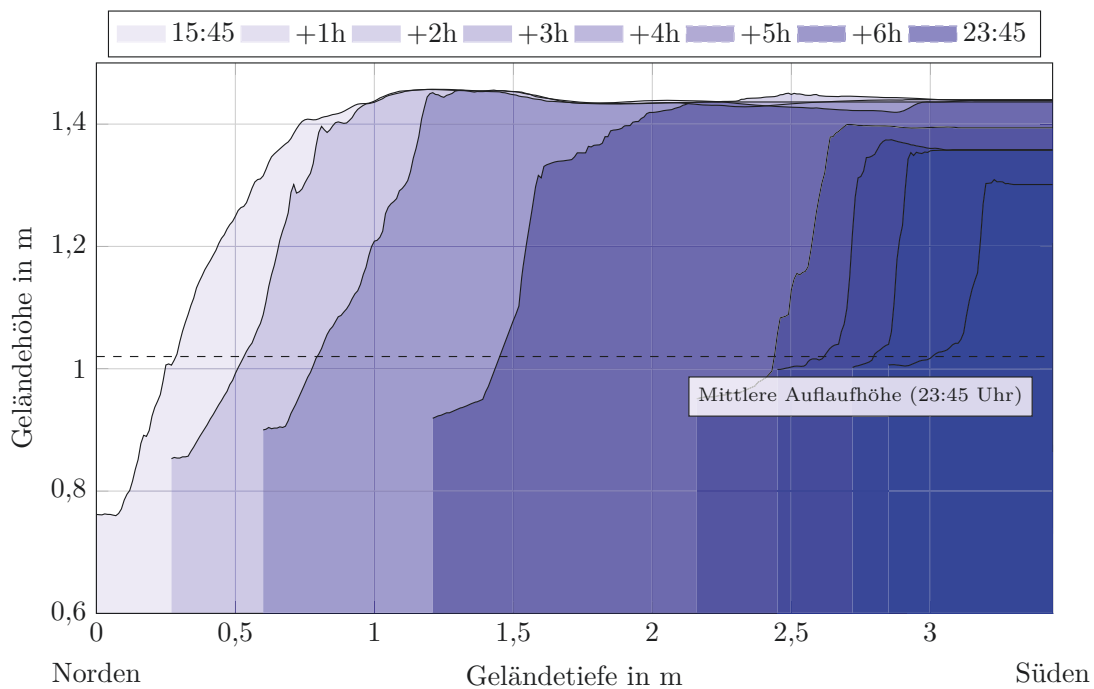


ABBILDUNG 5.19: Querprofil Ost-Ost in Normalhöhe.

Beim Querschnitt „Ost-West“ (Abbildung 5.20) ist auffällig, dass die Geländehöhe des Dünenfußes in den ersten drei Stunden deutlich angehoben wurde (36 cm) und der Dünenkörper um 1,71 m erodierte. Im Gegensatz zu den ersten beiden Querschnitten verringerte sich die Dünenkronenhöhe in den darauffolgenden zwei Stunden nicht. In den letzten beiden Stunden erodierte die Dünenkrone deutlich (insgesamt um 34 cm), sodass Wellen mit einer Höhe von 0,87 m den restlichen Dünenkörper überwinden konnten.

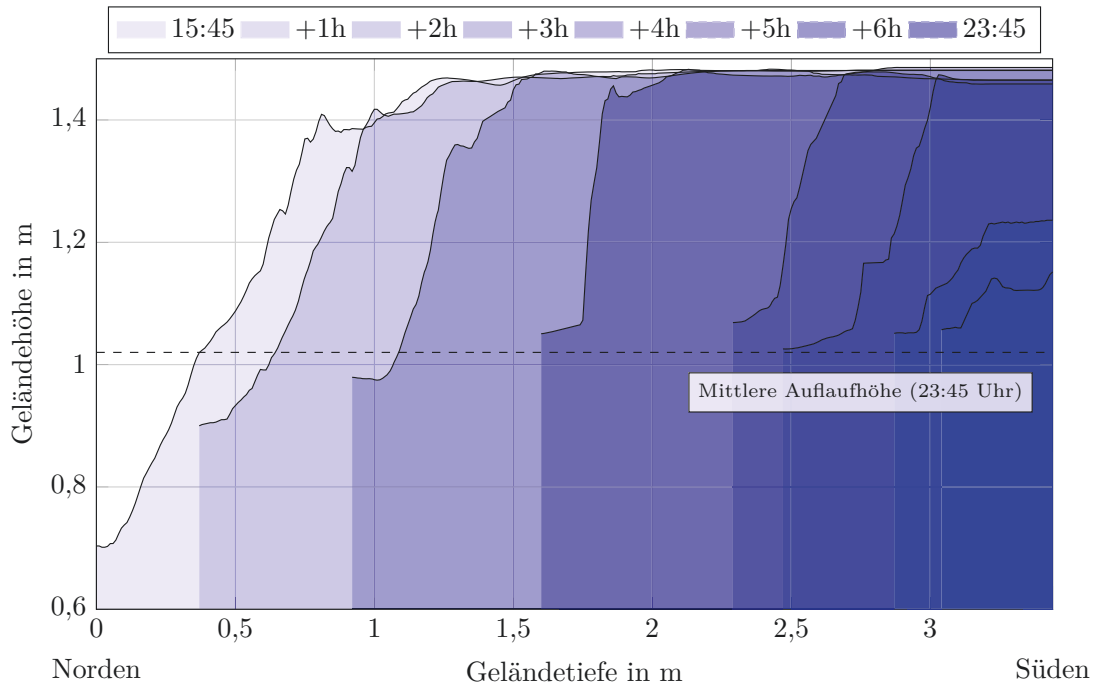
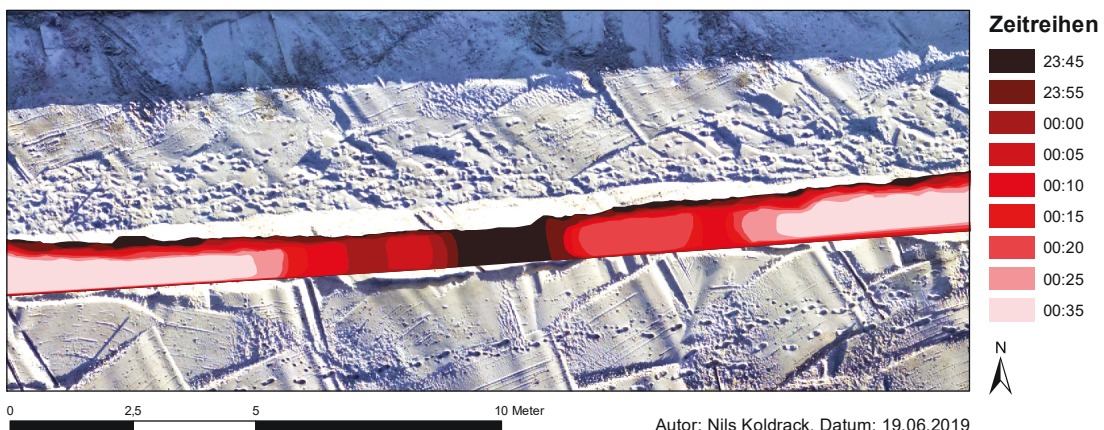


ABBILDUNG 5.20: Querprofil Ost-West in Normalhöhe.

Die flächenhafte Entwicklung der Bresche zeigt, dass ab 23:45 Uhr eine 1,05 m große Bresche im Reserveteil des Dünenkörpers entstand (Abbildung 5.21). Diese entwickelte sich bis um 0:00 Uhr auf eine Breite von 2,51 m, bis um 0:05 Uhr 1,15 m weiter westlich eine zweite Bresche („Ost-West“) mit einer Breite von 0,79 m entstand. Fünf Minuten später wurde die Lücke zwischen den beiden Breschen geschlossen und sie verbanden sich auf eine Gesamtbreite von 4,55 m. Wiederum drei Minuten darauf bildete sich im östlichen Bereich eine dritte, 0,75 m breite Bresche („Ost-Ost“), die sich um 0:20 Uhr auf 1,13 m vergrößerte. Zum gleichen Zeitpunkt vergrößerte sich die Hauptbresche auf eine Breite von 5,63 m. Um 0:21 Uhr vereinigten sich dann die beiden Breschen und besaßen eine Gesamtbreite von 7 m.



Autor: Nils Koldrack, Datum: 19.06.2019

ABBILDUNG 5.21: Flächenhafte Entwicklung der Bresche im Osten der Düne.

In den Abbildungen 5.22 und 5.23 ist zusätzlich die zeitliche Entwicklung der Breschenbreiten visualisiert, abgeleitet aus den Videoaufnahmen. Der Prozess der Breschenentfaltung der mittleren Bresche ist in den ersten 15 min gleichmäßig und kontinuierlich. Mit der Fusion der zweiten Bresche (0:10 Uhr) vergrößerte sich die Breschenbreite um 27,8%. Zum Zeitpunkt der Entstehung der dritten Bresche (0:13 Uhr) betrug die Breschenbreite 4,7 m. Bei der Vereinigung um 0:21 Uhr betrug die Gesamtbreite der Bresche 6,68 m und wuchs bis um 0:30 Uhr auf 7 m an.

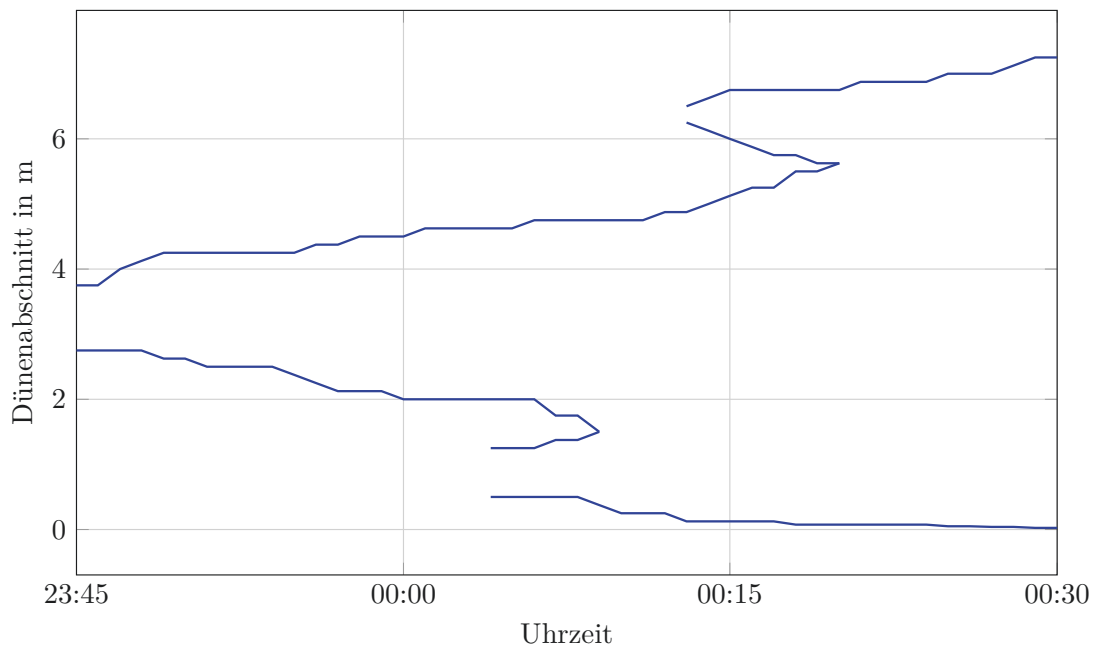


ABBILDUNG 5.22: Entwicklung der Breschen im Osten der Düne.

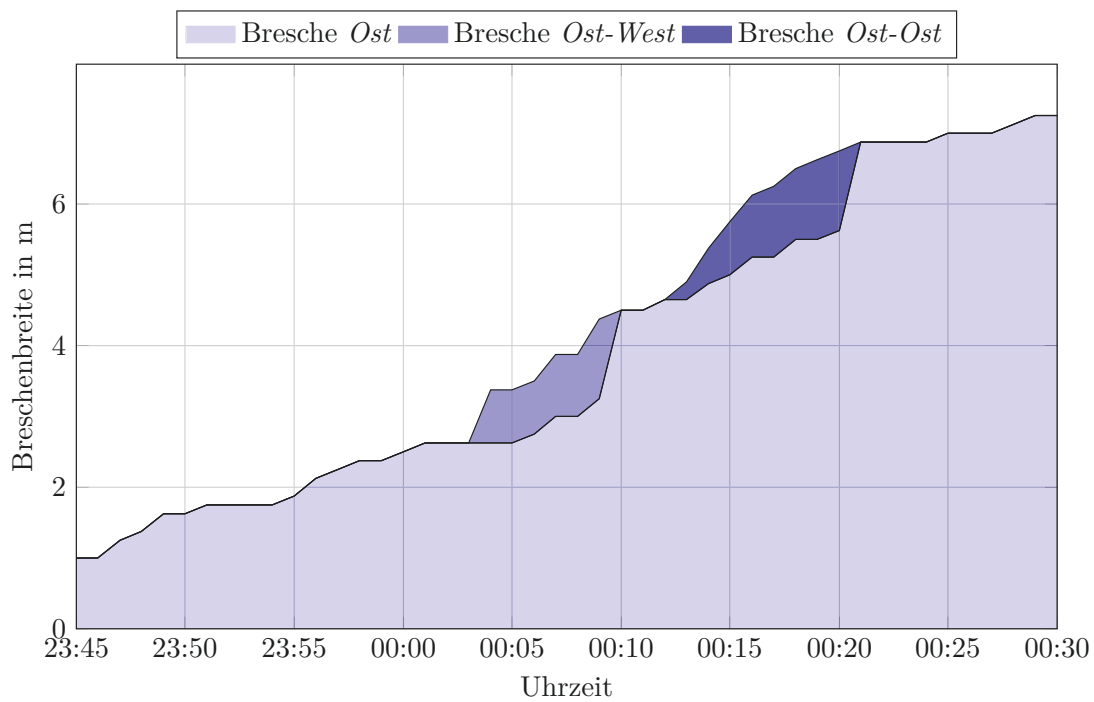


ABBILDUNG 5.23: Entwicklung der Breschenbreite im Osten der Düne.

In Abbildung 5.24 sind Längsprofile im Abstand von 10 Minuten im Bereich der ersten Bresche dargestellt. Zum ersten Messzeitpunkt um 23:00 Uhr entstand bereits eine Reduktion der Geländehöhe im Bereich zwischen der Breite von 3 m und 5 m. Diese Senke entwickelte sich, bis sie um 23:50 Uhr eine Geländehöhe von 0,94 m erreicht hatte und Wasser in die Polderfläche eindringen konnte. Im östlichsten Bereich war zum ersten Zeitpunkt um 23:00 Uhr noch die höchste Geländehöhe der Düne mit 1,4 m in diesem Dünenabschnitt vorhanden. Dieser Dünenabschnitt sank jedoch in den nächsten 50 min um 34 cm auf eine Höhe von 1,06 m. Dies ist der Bereich, in dem 23 Minuten später die dritte Bresche entstand.

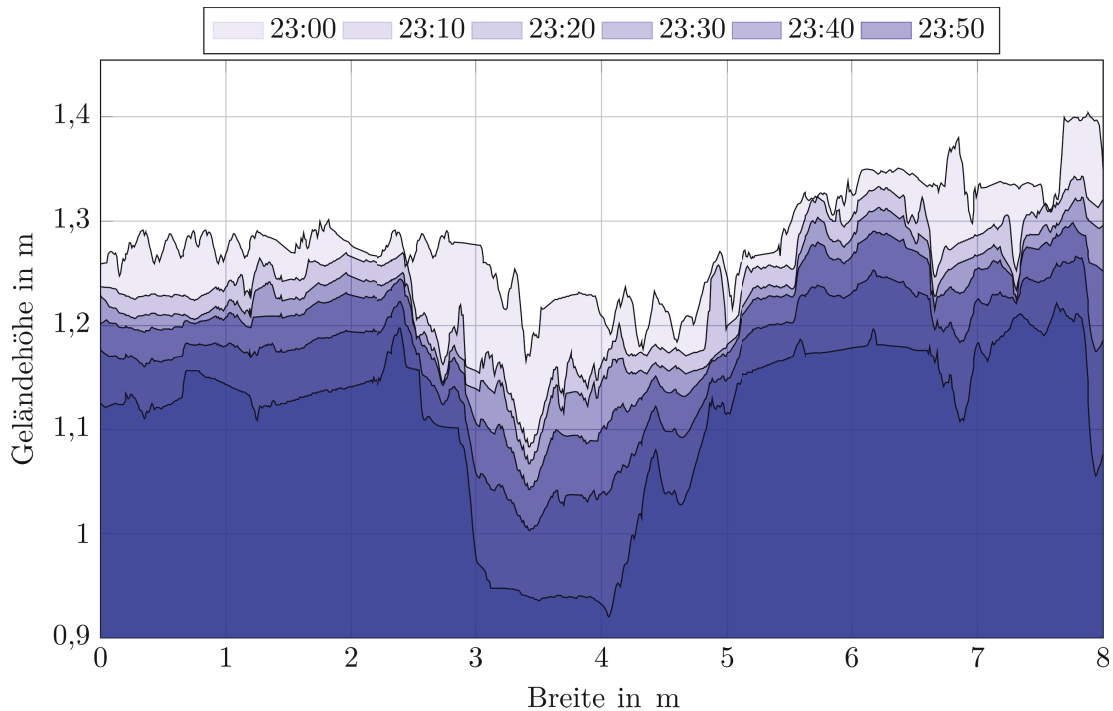


ABBILDUNG 5.24: Längsprofile im Osten der Düne.

Wie sich das Gelände im östlichen Abschnitt nach der Sturmflut verändert hat, zeigt Abbildung 5.25. Nach 36 Stunden Wasserstand über Mittelwasser wurde die Versuchsdüne in diesem Bereich vollständig erodiert. Der Dünen sand hat sich nicht nur im Bereich zwischen Wasserkante und Dünenfuß abgelegt, sondern wurde auch durch die Wellen in das Gebiet hinter der Düne gespült. Hier vergrößerte sich die Geländehöhe bis zu 26 cm. Die Fläche, auf der die Düne stand und der Bereich davor (Geländetiefe 0 m bis 9 m), wurde durch die Sturmflut gebnet und hob sich am Dünenfuß um 28 cm.

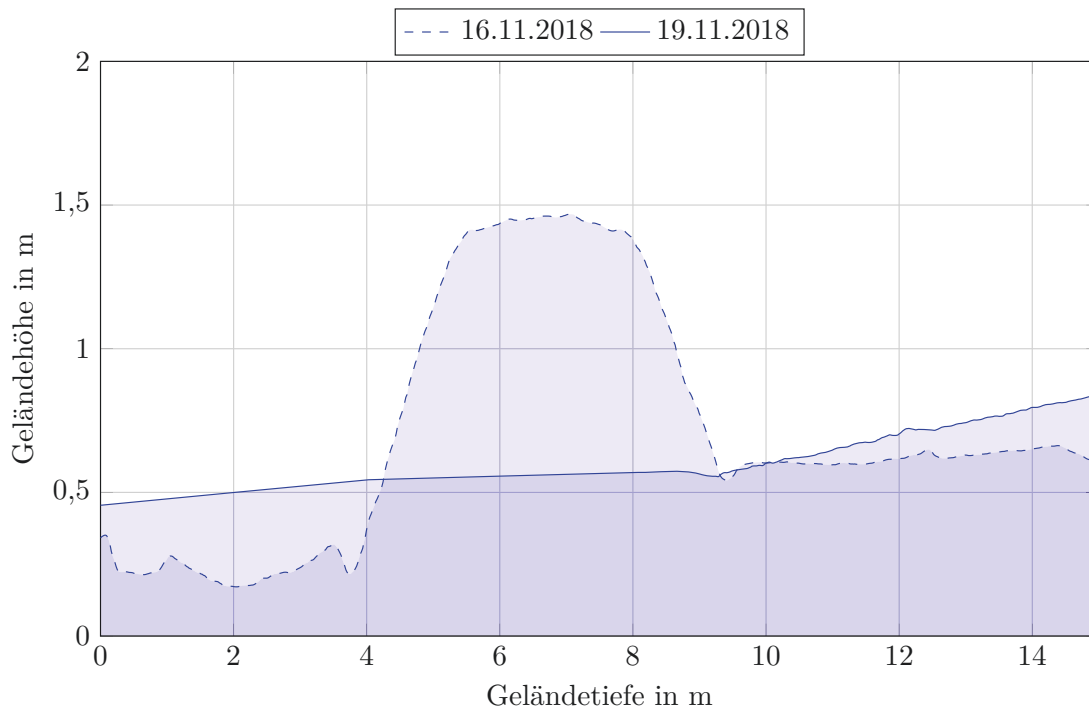


ABBILDUNG 5.25: Querprofil Ost vor und nach der Sturmflut.

#### 5.2.4 Dünenabschnitt Mitte

Im Vergleich zu den Querprofilen am östlichen Standort erodierte die Düne im Bereich der Sollbruchstelle in den ersten zwei Stunden deutlich stärker (Abbildung 5.26). Im Querprofil „Mitte-Mitte“ wurden in diesem Zeitraum am Dünenfuß 1,02 m Sand weggespült. Dieses Material hat sich vor der Düne abgelagert und der Fuß erhob sich um 16 cm. Nach vier Stunden verringerte sich die Dünentiefe um weitere 1,17 m und die Geländehöhe des Dünenfußes stieg deutlich um weitere 21 cm auf 1,07 m. In den nächsten Zeitabschnitten wurde vergleichsweise wenig Material vom Dünenkörper abgetragen. Nach 10 Stunden hatte sich die Düne an diesem Standort um 3,15 m in der Tiefe verkleinert und es hatte sich deutlich mehr Material vor dem Dünenfuß angesammelt. Bei der Messung um 2:10 Uhr verringerte sich die Dünenkronenhöhe auf eine Geländehöhe von 1,19 m. Die mittlere Wellenaufbauhöhe betrug zu diesem Zeitpunkt 1,14 m ü. NHN. Die Wellen überströmten die Düne und die Bresche in der Sollbruchstelle entstand.

Gleichermaßen schritt die Erosion der Düne einen Meter weiter östlich in den ersten vier Stunden voran (Abbildung 5.27). Der Verschleißteil erodierte völlig und der Dünenkörper verkleinerte sich in der Geländetiefe um 2,62 m. Der Sand lagerte sich vor der Düne ab und der Dünenfuß erhob sich um 35 cm auf 1,05 m. In den darauffolgenden Stunden wurde vergleichsweise wenig Sand durch die Sturmflut abgetragen. Zum Zeitpunkt der Breschenbildung stieg die Geländehöhe am Dünenfuß auf 1,14 m, die Dünenkronenhöhe verringerte sich jedoch kaum, sodass an diesem Standort zu dem Zeitpunkt die Düne der Sturmflut standhielt.

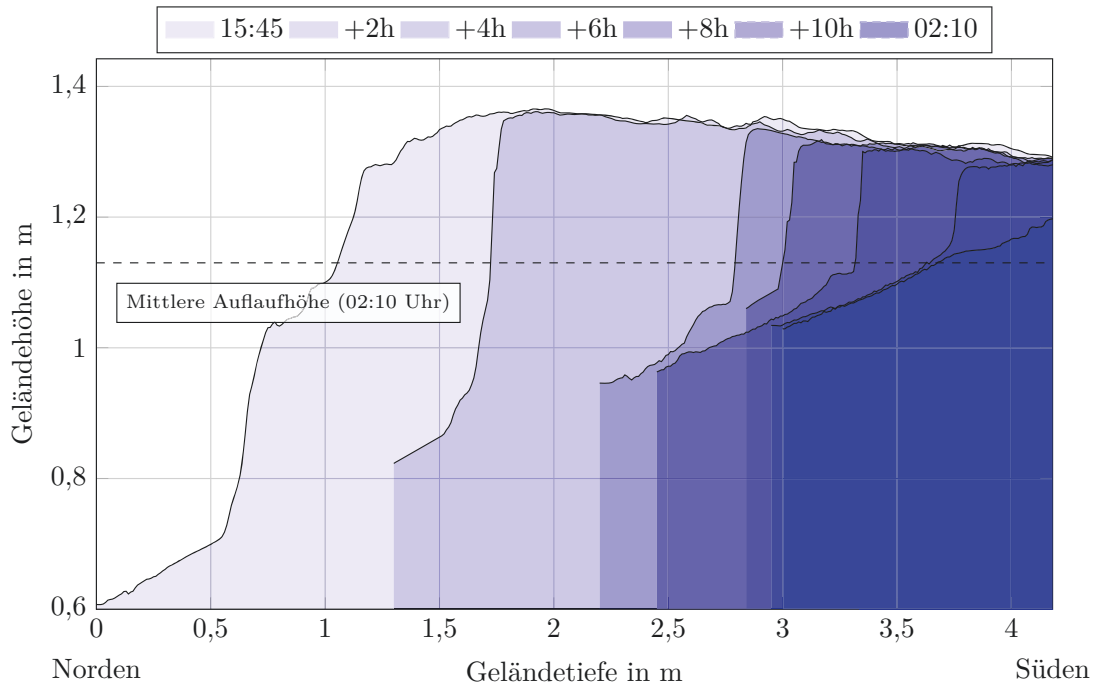


ABBILDUNG 5.26: Querprofil Mitte-Mitte.

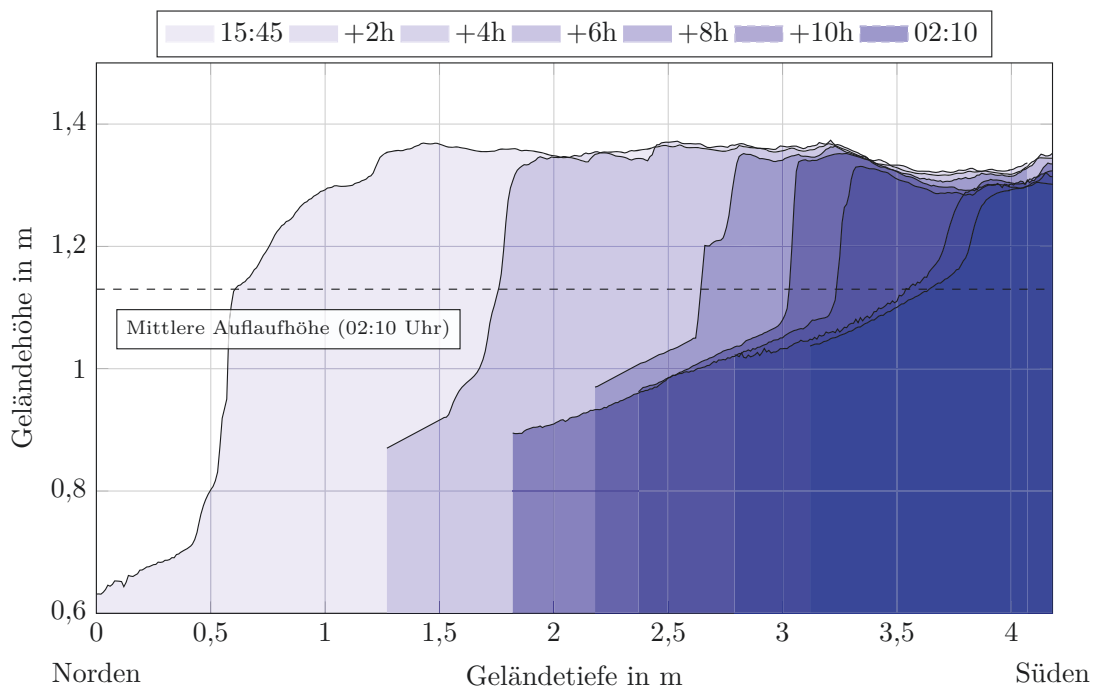


ABBILDUNG 5.27: Querprofil Mitte-Ost.

Ebenso wie bei den beiden vorherigen Querschnitten erodierte der Dünenkörper stark (2,09 m) und der Dünenfuß stieg am Standort „Mitte-West“ in den ersten vier Stunden deutlich um 31 cm (Abbildung 5.28). Auch in den folgenden Stunden verringerte sich die Dünenkronenhöhe nicht, die Fußhöhe stieg jedoch weiter, ebenfalls wie im Querschnitt „Mitte-Ost“, auf 1,16 m, sodass die Versuchsdüne zu diesem Zeitpunkt in diesem Messbereich nicht brach.

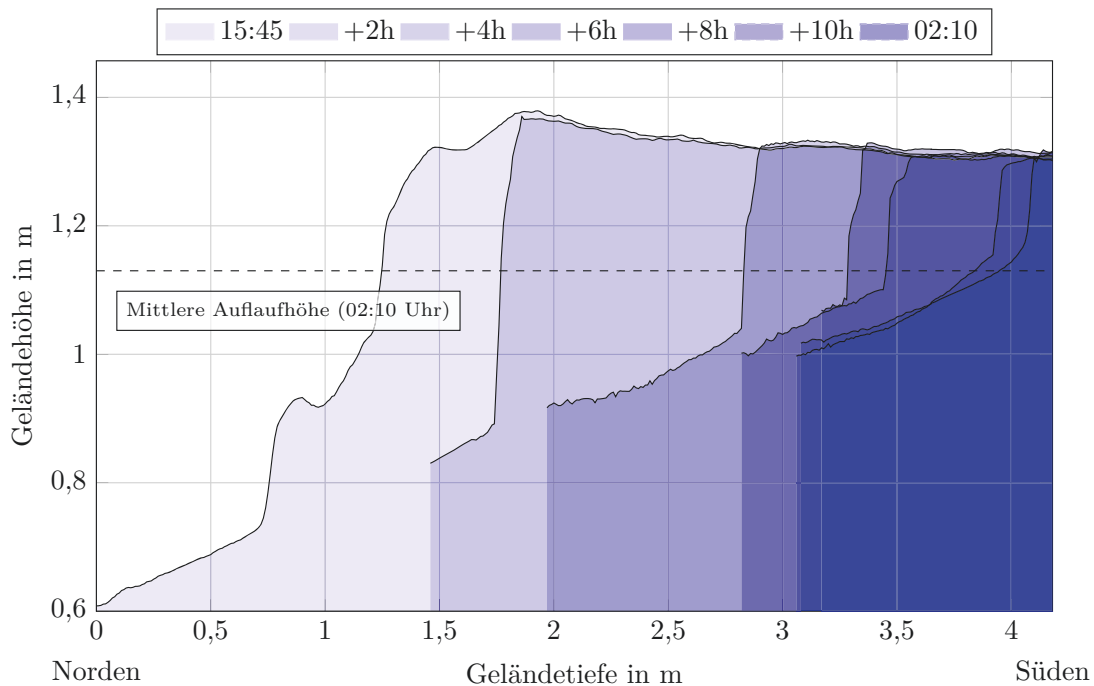


ABBILDUNG 5.28: Querprofil Mitte-West.

Die flächenhafte Entwicklung der Breschenbildung zeigt, dass ab 2:10 Uhr eine 30 cm große Bresche im Reserveteil der Sollbruchstelle entstand (Abbildung 5.29). Diese entwickelte sich in den nächsten 10 Minuten kaum, bis sie um 2:30 Uhr eine Ausdehnung von 1,56 m besaß. Im Laufe der nächsten 30 Minuten verbreiterte sich die Bresche kontinuierlich, bis um 3:00 Uhr eine Gesamtbreite von 5,08 m zu verzeichnen war.

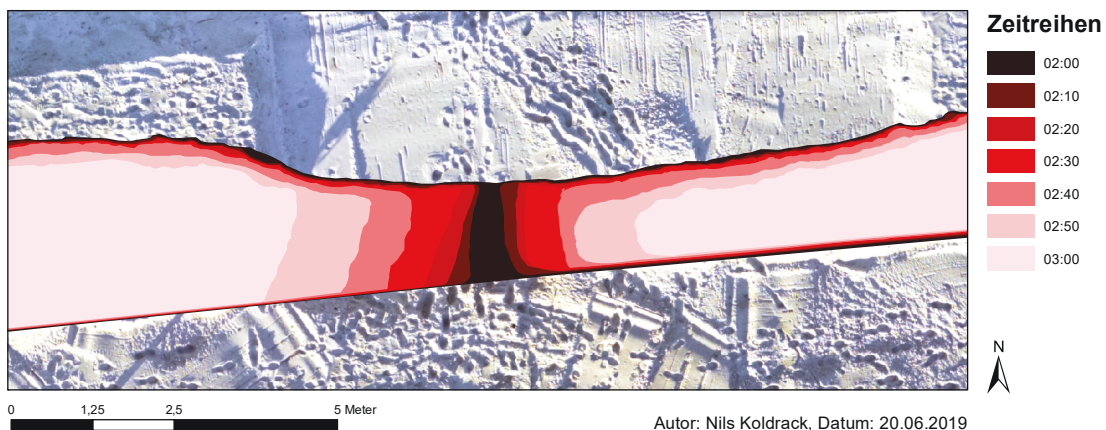


ABBILDUNG 5.29: Flächenhafte Entwicklung der Bresche in der Mitte der Düne.

In Abbildung 5.30 und 5.31 ist die zeitliche Entwicklung der Breschenbreite visualisiert. Der Prozess der Breschenentfaltung war in den ersten 10 Minuten noch sehr langsam. Anschließend beschleunigte sich die Verbreiterung der Bresche jedoch deutlich. Wie die Düne im Bereich der Sollbruchstelle erodierte und wie sich die Bresche entwickelte, ist in einem Zeitraffer-Video als 3D-Modell visualisiert worden und auf der PADO-Webseite abrufbar (PADO, 2019d).



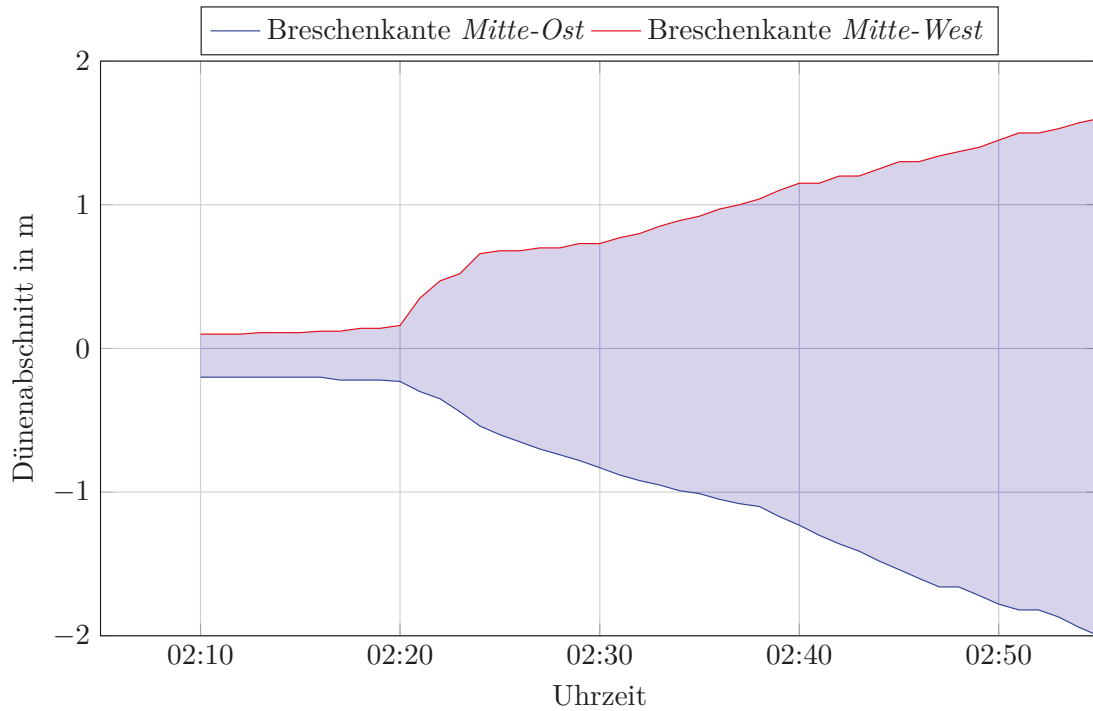


ABBILDUNG 5.30: Entwicklung der Bresche an der Sollbruchstelle.

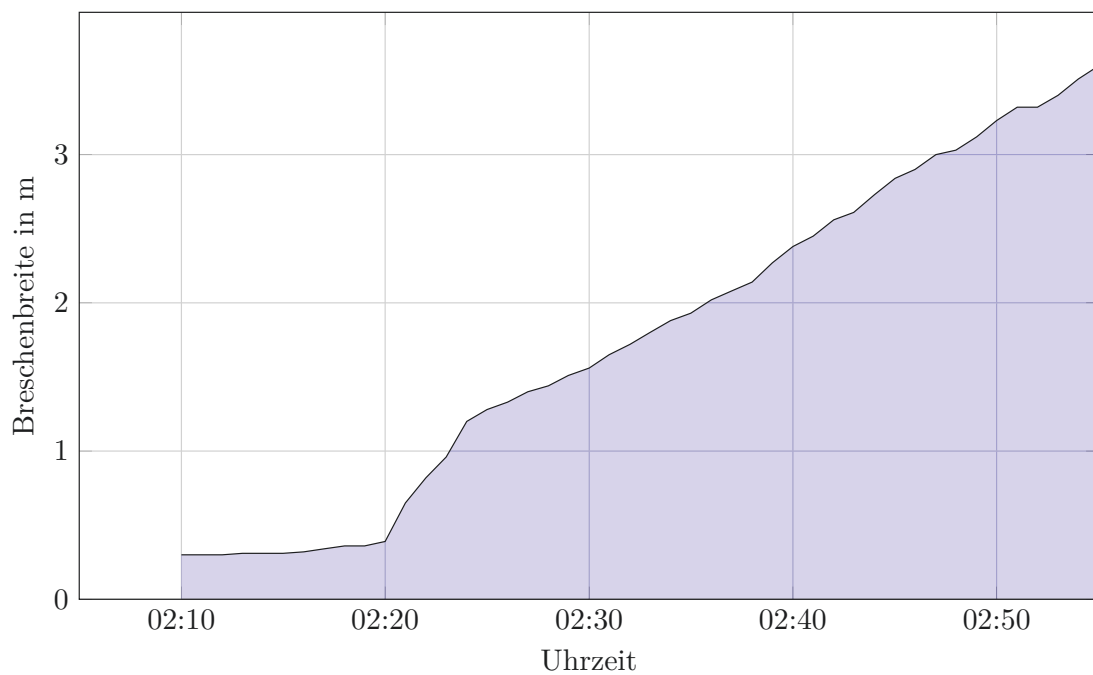


ABBILDUNG 5.31: Entwicklung der Breschenbreite in der Sollbruchstelle.

Ebenso wie das Gelände im östlichen Bereich, hat sich das Terrain an der Sollbruchstelle deutlich verändert (Abbildung 5.32). Das Dünenbauwerk wurde in diesem Bereich vollständig erodiert. Im Gegensatz zum Querschnitt im östlichen Standort wurde nur wenig Material vor der Versuchsdüne abgelagert. Dafür wurde wiederum durch die Wellen der Sand in das Gebiet hinter die Düne gespült und hat dort das Gelände um bis zu 32 cm erhöht.

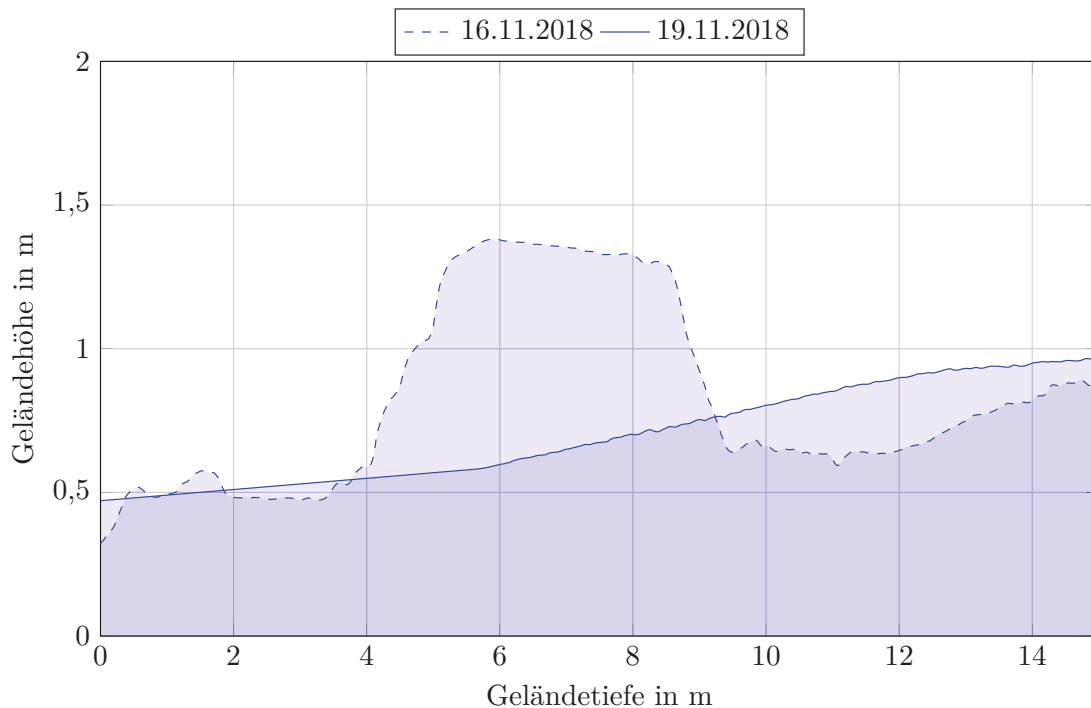


ABBILDUNG 5.32: Querprofil Mitte-Mitte vor und nach der Sturmflut.

### 5.2.5 Dünenabschnitt West

Die Erosion der Versuchsdüne am westlichen Standort schritt in der Anfangsphase der Messkampagne vergleichsweise langsam voran. Daher wurde in der ersten Stunde nach Messbeginn erst sehr wenig Sand von der Düne erodiert und die Geländetiefe verschob sich um 32 cm (Abbildung 5.33). Nach zwei Stunden hob sich der Dünenfuß um 15 cm, da mehr Material vom Verschleißteil gelöst wurde und sich vor der Düne ansammelte. Nach vier Stunden erreichte die Steigung der Abbruchkante im Profil  $83^\circ$  und das Verschleißteil wurde fast komplett erodiert. In den nächsten Stunden wurde relativ gleichmäßig viel Material von der Düne gespült (14 cm bis 34 cm). Erst im letzten Zeitraum vergrößerte sich die Geländetiefe noch einmal deutlich auf 3,58 m. Der Dünenkörper hielt jedoch der Sturmflut an dieser Position stand und die Dünenkrone sank um 7 cm.

Die Querprofile am Standpunkt „West-Ost“ zu den jeweiligen Zeitabschnitten sehen dagegen fast identisch aus (Abbildung 5.34). In der ersten Stunde verschob sich der Dünenfuß um 37 cm und erhob sich um 9 cm. In den darauffolgenden Stunden vergrößerte sich die Geländetiefe kontinuierlich, bis sie nach zehn Stunden eine Tiefe von 2,68 m und eine Geländehöhe von 1,13 m besaß. Erst im letzten Zeitraum verlagerte sich die Geländetiefe deutlich um weitere 0,73 m. Die Dünenkrone sank hingegen nur unwesentlich. Die mittlere Auflaufhöhe betrug zum Zeitpunkt der letzten Messung 1,16 m und lag damit 0,54 m unter der Dünenkronenhöhe.

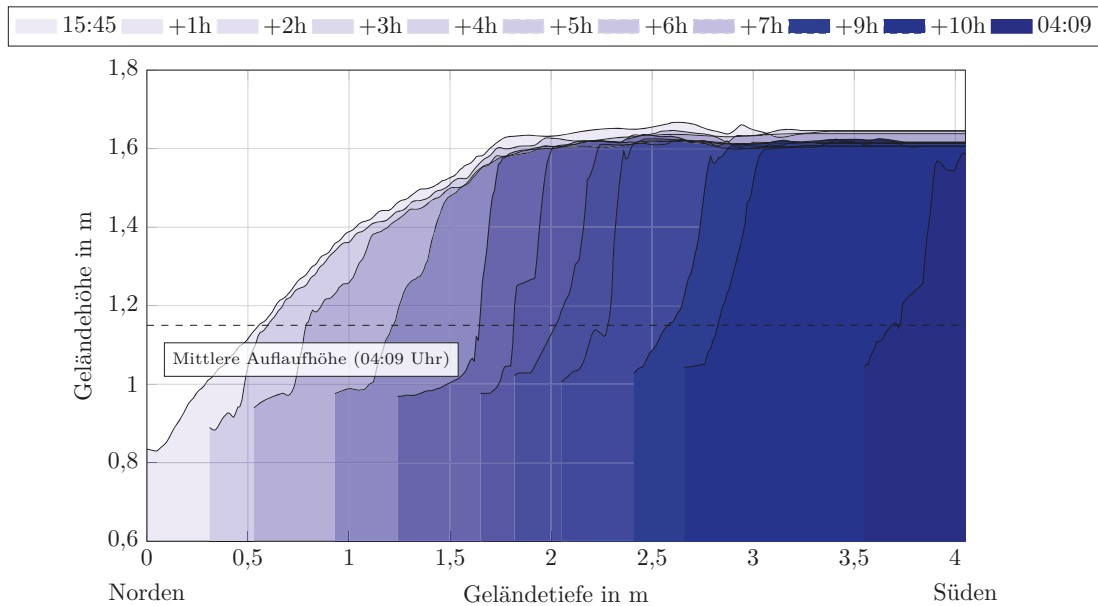


ABBILDUNG 5.33: Querprofil West-Mitte.

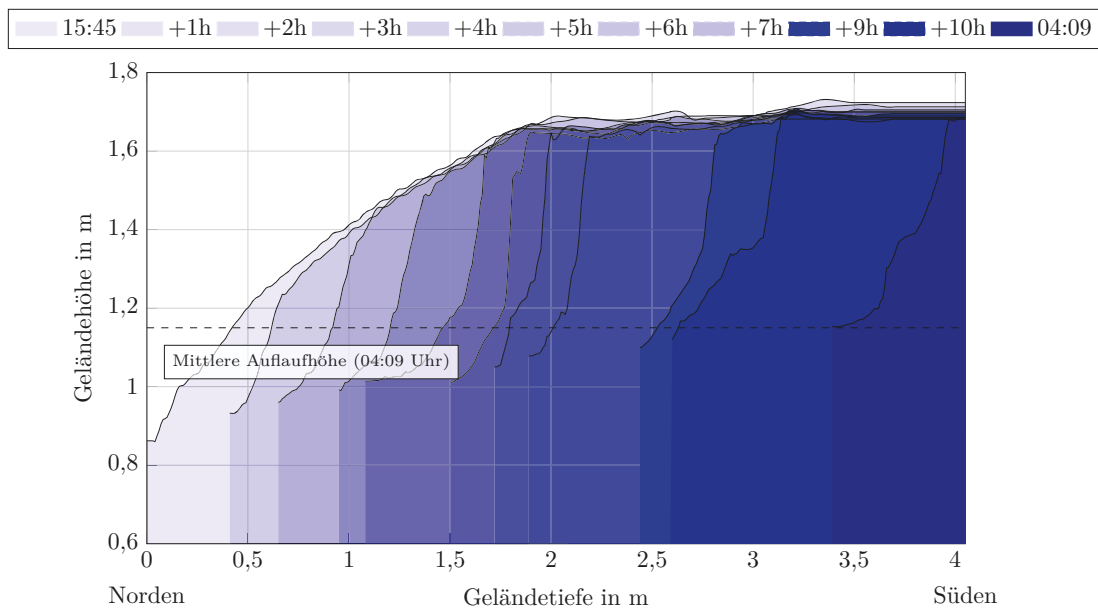


ABBILDUNG 5.34: Querprofil West-Ost in Normalhöhe.

Das Geländeprofil der ersten Messung am Standpunkt „West-West“ unterscheidet sich durch die wellige Oberflächenform von den anderen Profilen (Abbildung 5.35). Grund für diese Form könnte ein anthropogener Einfluss sein, wie z.B. das unbefugte Betreten der Düne durch Passanten. Ebenso wie bei den anderen beiden westlichen Profilen war nach vier Stunden, in der Zeit als der Verschleißteil komplett erodiert wurde, eine klare Abbruchkante zu erkennen. Ebenso wie bei den anderen Profilen am westlichen Standort sank die Dünenkrone in den restlichen Zeiträumen nur minimal. Die Geländetiefe bei der letzten Messung betrug 3,72 m und der Dünenfuß ist im Vergleich zur ersten Messung um 21 cm gestiegen.

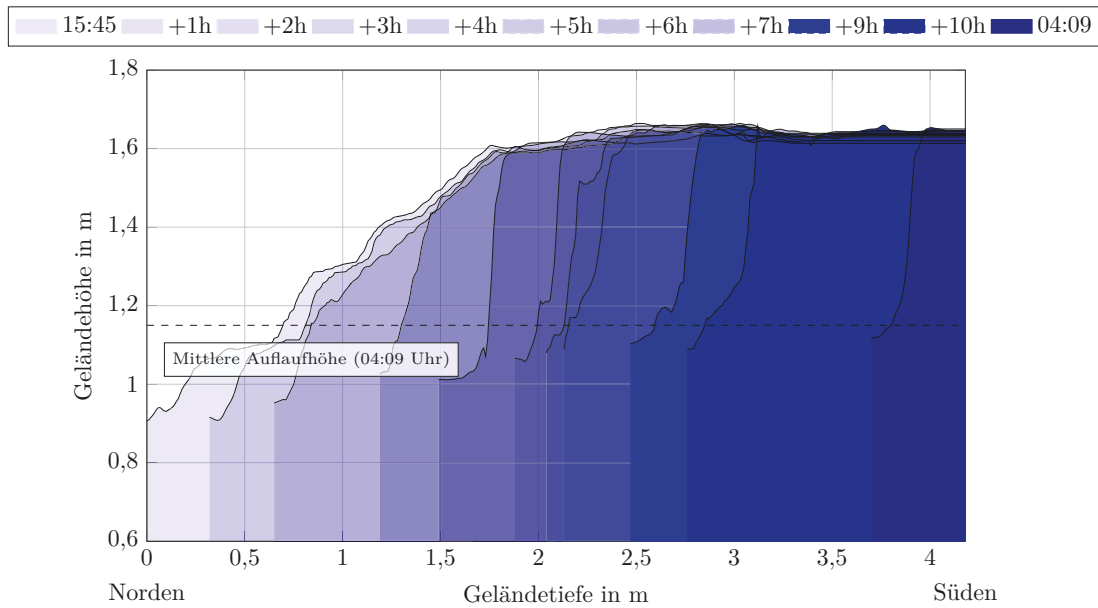


ABBILDUNG 5.35: Querprofil West-West.

Im Gegensatz zu den anderen beiden Standorten im östlichen und mittleren Bereich der Düne wurde die Versuchsdüne am westlichen Standort nicht komplett von der Sturmflut erodiert (Abbildung 5.36). Ebenso wie an der Sollbruchstelle wurde nur wenig Sand vor dem Dünenkörper abgelagert. Ab dem ursprünglichen Dünenfuß steigt das Profil der Düne nach der Sturmflut zunächst fast linear ( $13,24^\circ$  von Geländetiefe 4 m bis 8 m), bis eine klare Abbruchkante in der Böschung zu erkennen ist. Die Abbruchkante besaß eine Neigung von  $79,8^\circ$ .

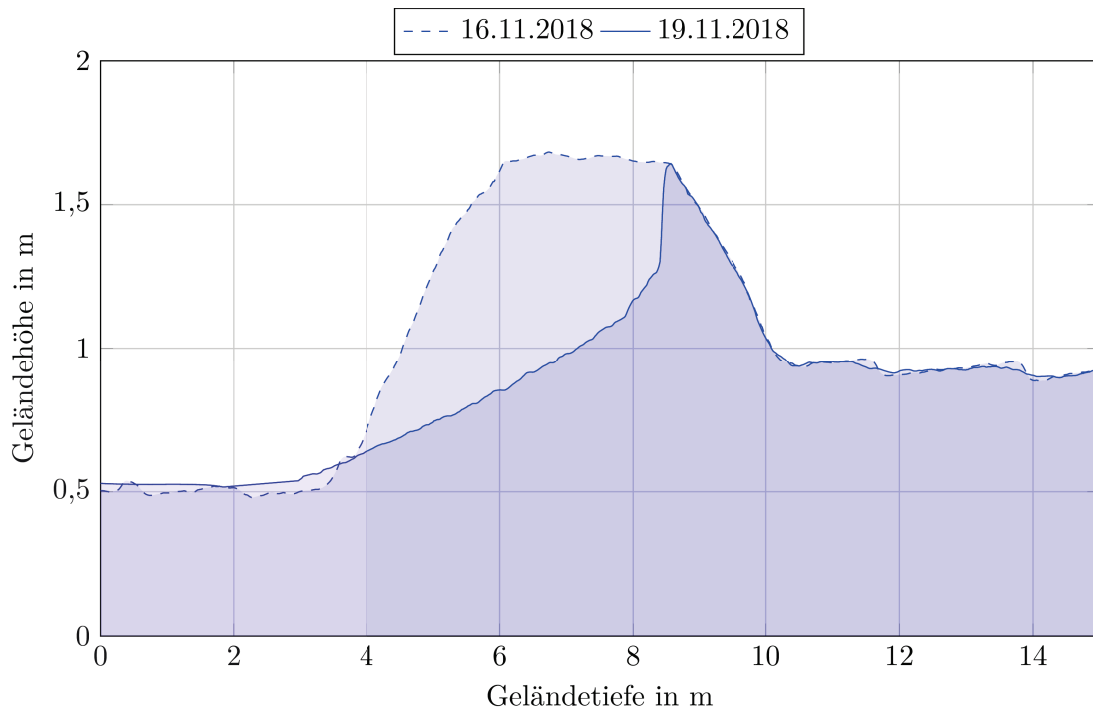


ABBILDUNG 5.36: Querprofil West-Mitte vor und nach der Sturmflut.

### 5.2.6 Dünenerosion - Volumenbestimmung

Beim Scanvorgang nach Fertigstellung besaß die Düne ein Volumen von  $681,57 \text{ m}^3$  (Abbildung 5.37). In den ersten Stunden der Messkampagne verkleinerte sich das Volumen der Versuchsdüne rapide. In der ersten Stunde nahm das Volumen um 15,84 % und in der zweiten Stunde um 29,68 % ab. Knapp vier Stunden nach Messbeginn war das Gesamtvolumen bereits halbiert. Während der weiteren Stunden verringerte sich das Volumen des Dünenkörpers nur langsam. Bis die erste Bresche im östlichen Bereich entstand, reduzierte sich das Volumen um weitere 9,06 %. Bis zur Entstehung der zweiten Bresche in der Sollbruchstelle sank das Volumen innerhalb von knapp zwei Stunden um 5,22 %. In den letzten Stunden bis zur letzten Messung um 5:30 Uhr verringerte sich das Volumen geringfügig um weitere 2,48 %, sodass insgesamt  $469,05 \text{ m}^3$  (68,82 %) während der Sturmflut von der Düne erodiert wurde.

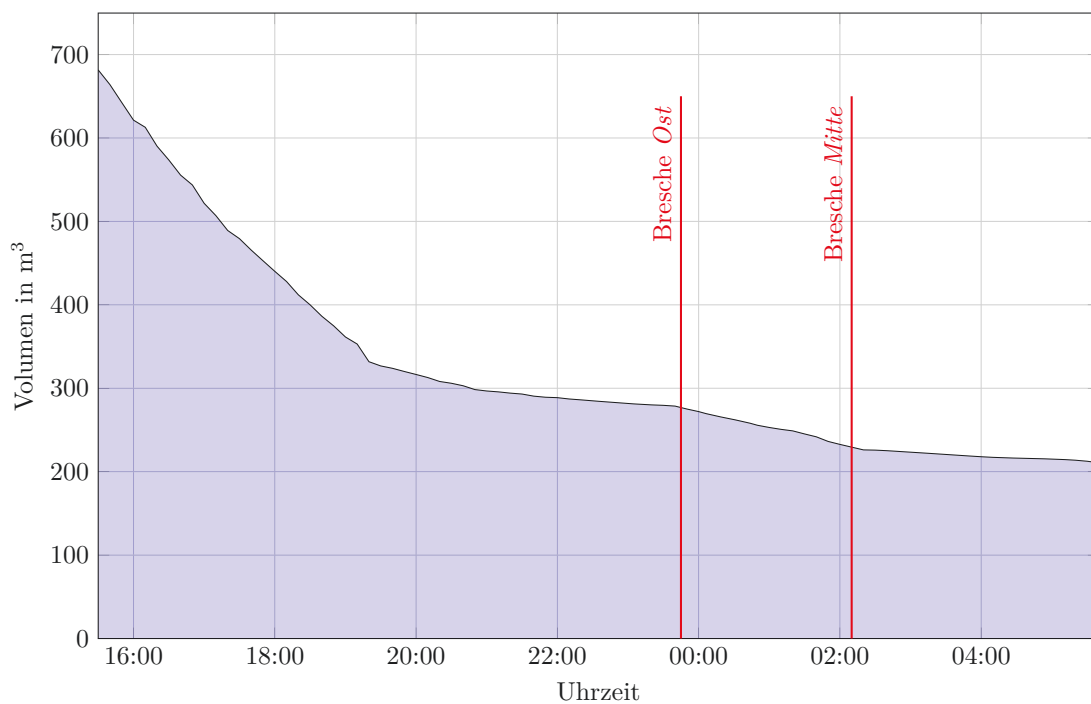


ABBILDUNG 5.37: Volumenveränderung der Versuchsdüne während der Messkampagne.

Am 19. November, dem Tag nach der Sturmflut, wurde das Teiluntersuchungsgebiet erneut mit dem UAV befliegen. Aus dem abgeleiteten Differenzmodell zur Befliegung vom 16. November, dem Tag der Fertigstellung der Versuchsdüne, wird deutlich, in welchen Regionen die Düne komplett erodiert wurde (Abbildung 5.38). Im östlichen Bereich, bis zur Sollbruchstelle, wurde der Dünenkörper komplett abgetragen. Im westlichen Gebiet hingegen konnte die Sturmflut nicht komplett die Düne erodieren und ein kleiner Teil von  $212,52 \text{ m}^3$  blieb stehen.

Vor allem im östlichen Bereich sammelte sich Sand vor der Düne an. Über eine Breite von 40 m erhob sich das Gelände um über 40 cm. Östlich der Düne, sowie bei Flächen in der östlichen Polderfläche hob sich das Relief ebenfalls um bis zu 20 cm. An der westlichen Dünenflanke erhöhte sich das Gelände um bis zu 47 cm. Südlich des Bereiches, bei dem die Düne nicht komplett erodiert werden konnte, veränderte sich

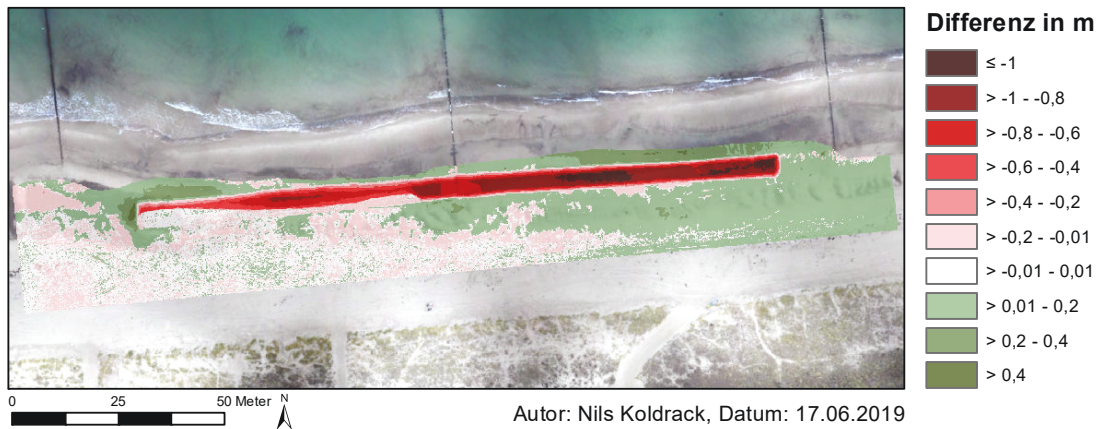


ABBILDUNG 5.38: Höhendifferenz zwischen dem 16.11. und 19.11.2019.

das Gelände hingegen nur geringfügig. Abbildung 5.39 zeigt das Orthofoto der Befliegung, nachdem die Sturmflut zurückgegangen ist.

Wie sich die Form des Dünenkörpers während der Sturmflut verändert hat, wird als zweidimensionale orthogonale Projektion im Zeitraffer-Video gezeigt (PADO, 2019a).

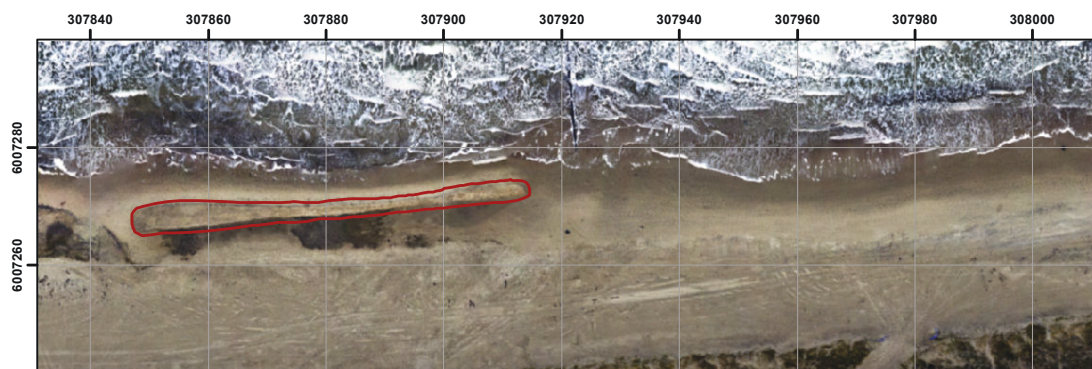


ABBILDUNG 5.39: Orthofoto der zweiten Versuchsdüne nach der Sturmflut.

### 5.2.7 Videoauswertung

Auf Basis der Videodaten der Kamera aus der Polderfläche konnte mit dem optischen Fluss analysiert werden, wie die Polderfläche hinter der Düne im östlichen Bereich durch die Bresche geflutet wurde und wie sich das eingeströmte Wasser nach dem Absinken der Sturmflutwelle wieder teilweise zurückzog.

Abbildung 5.40 zeigt den Wassereinbruch in der mittleren östlichen Bresche. Das gleichmäßige Vektorfeld dient zur Auswertung der Breschenentwicklung und die Bewegungsdaten in Form von Bewegungsrichtung und Bewegungslänge geben Informationen über die Wellenbewegung. Die grünen Pfeile beschreiben dabei das einströmende Wasser und die roten Pfeile das aus der Polderfläche herausströmende Wasser. Die Punkte im Vektorfeld haben einen horizontalen Abstand von 50 cm und einen vertikalen Abstand von 10 cm.

Um 23:55:00 Uhr war die mittlere Bresche 1,88 m groß und es sind kaum Bewegungen zu erkennen. 10 Sekunden später strömte mit einer Welle Wasser durch die Bresche in die Polderfläche. Um 23:55:20 Uhr war die Sturmflutwelle so hoch, dass sie über

den westlichen Bereich neben der Bresche der Düne floss, in dem Gebiet, wo 8 Minuten später die zweite Bresche entstand. Bis zur letzten Aufnahme um 23:55:40 Uhr wuchs die Bresche gegenüber der ersten Aufnahme um 25 cm. Wasser strömte durch die Öffnung und wurde aufgrund der Windrichtung in der Polderfläche nach Westen gedrückt.

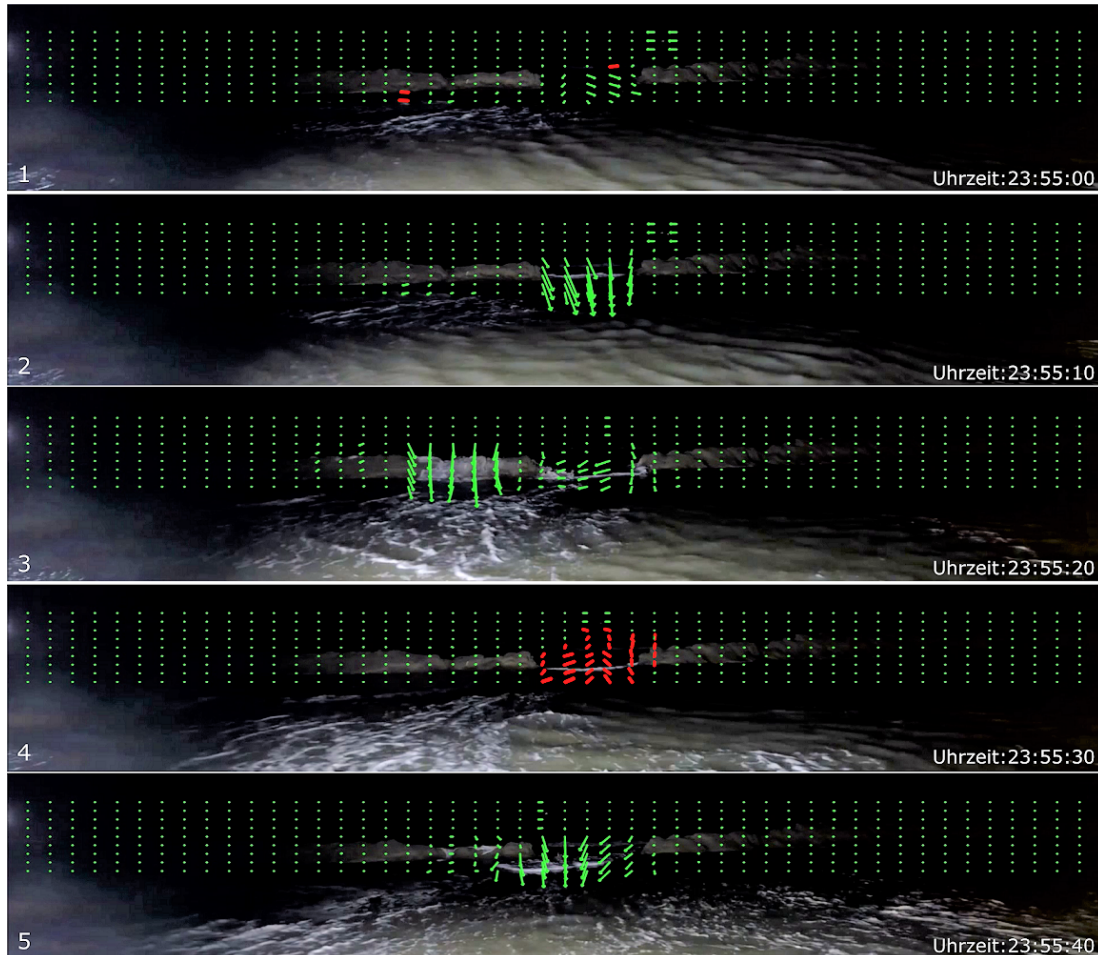


ABBILDUNG 5.40: Darstellung der Wellenbewegung in der östlichen Bresche, auf Basis des optischen Flusses.

Anhand der Videos von dem Kamerasystem, welches auf dem Messpfahl installiert wurde, konnte mit dem optischen Fluss die Wellenperiodendauer und die Wellenaufbauhöhe im Bereich der Sollbruchstelle analysiert werden. Hierfür wurden zwei Videoausschnitte ausgewertet. Der erste Ausschnitt beschreibt den Messbeginn, kurz nachdem die Düne belastet wurde und der zweite einen Zeitpunkt kurz vor dem Hochwasserscheitelpunkt (Abbildung 5.41).

In den ersten 15 Minuten des ersten Videoausschnitts lag die Wellenperiodendauer zwischen 3,5 s bis 5 s (Abbildung 5.42). Nach etwa 20 Minuten nahm die Periode leicht ab und lag bis um 16:50 Uhr zwischen 4,3 s bis 3,8 s. Bis 17:00 Uhr sank sie weiter ab und lag zwischen 3,75 s bis 2,31 s. In dem gesamten betrachteten Zeitraum lag demnach die durchschnittliche Wellenperiodendauer bei 3,72 s. Die Periode auf Datengrundlage der AWAC 4-Sonde lag im Vergleich hingegen bei nur 3,1 s (Abbildung 5.16). Grund für die Differenz kann die Entfernung von 450 m zwischen der

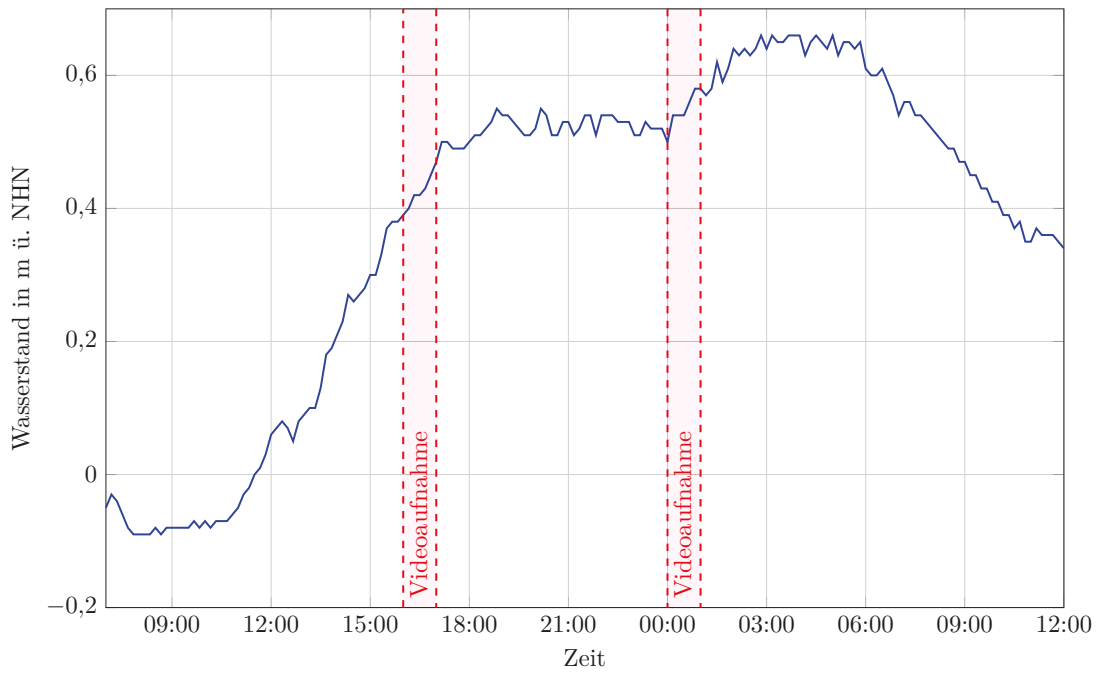


ABBILDUNG 5.41: Einordnung der ausgewerteten Videoausschnitte in Bezug auf den Wasserstand (Datengrundlage: IMK).

Messsonde und dem Strandabschnitt sein. Da die Wellenperiodendauer am direkten Standort der Düne ermittelt wurde, konnten darüber hinaus die Wellen in der Brandungszone durch die Reibung auf dem Meeresgrund abgebremst werden.

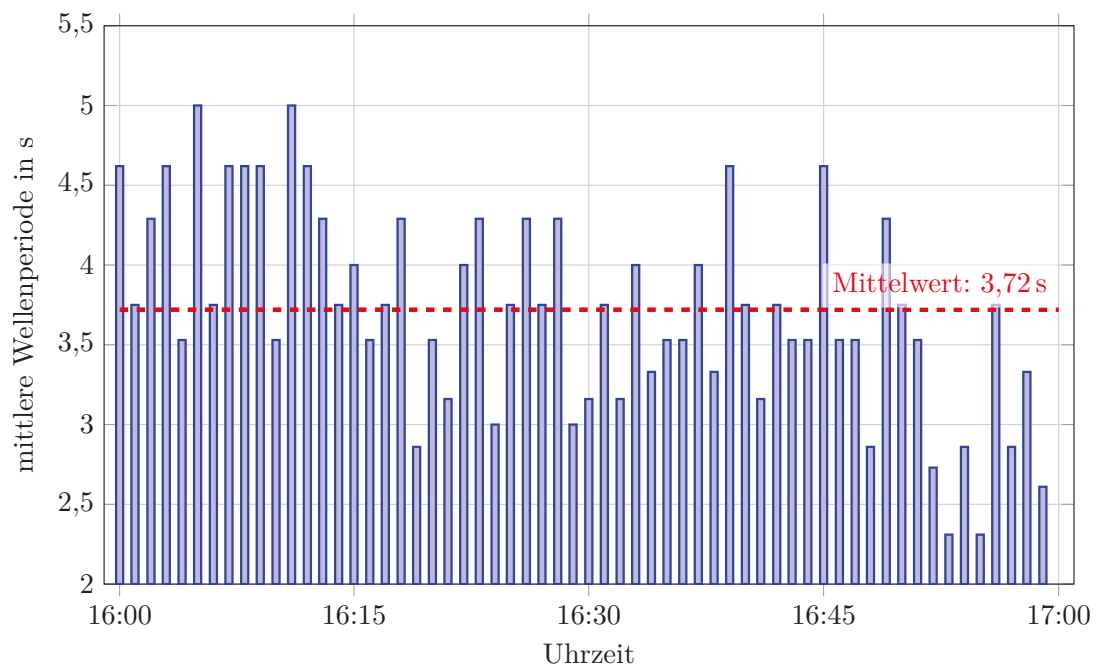


ABBILDUNG 5.42: Wellenperiodendauer auf Basis der Kameradatenauswertung zwischen 16:00 und 17:00 Uhr.



Im zweiten Videozeitraum schwankte die Wellenperiodendauer über die betrachtete Zeit zwischen 5,45 s bis 3,0 s (Abbildung 5.43). In diesem Zeitraum lag die durchschnittliche Wellenperiodendauer bei 4,14 s und somit fast eine halbe Sekunde über dem Durchschnittswert des ersten Videos. Die von der AWAC-Sonde gemessene Periode lag im Vergleich bei nur 3,0 s und damit deutlich unter dem Wert des zweiten ausgewerteten Zeitraums.

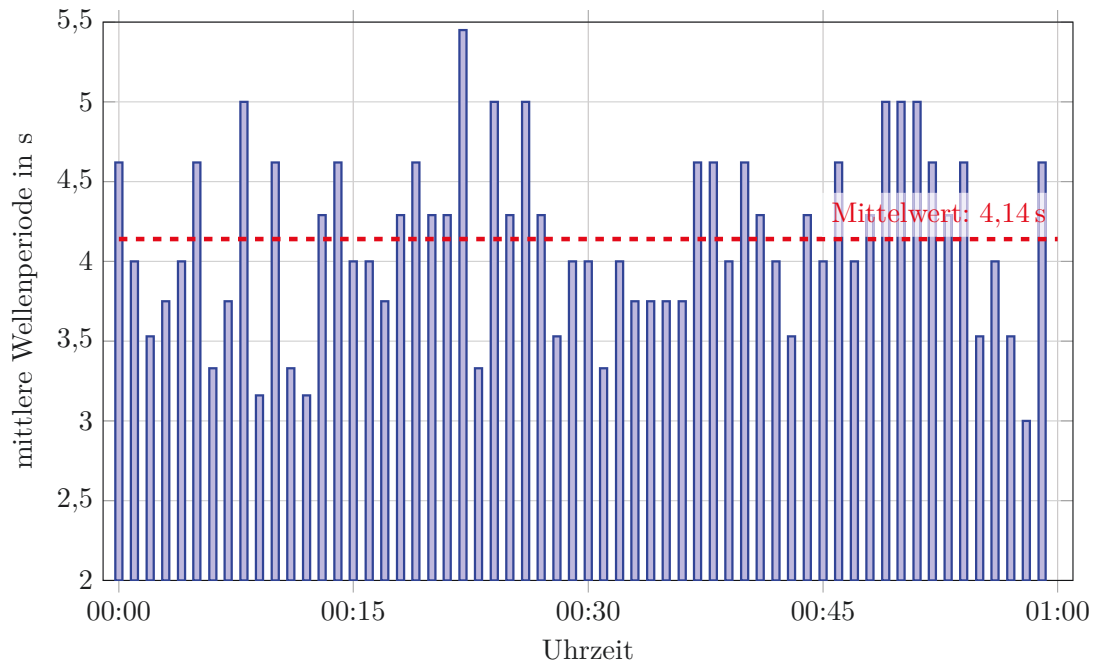


ABBILDUNG 5.43: Wellenperiodendauer auf Basis der Kameradatenauswertung zwischen 00:00 und 01:00 Uhr.

Die Wellenaufbauhöhe innerhalb des ersten Zeitraumes streute größtenteils zwischen 0,4 m und 1 m (Abbildung 5.44). Die höchste Aufbauhöhe von 1,2 m wurde in acht Zeitabschnitten jeweils nur zweimal erreicht. Wellen, die Werte unter 20 cm erreichten, kamen nur 30-mal vor.

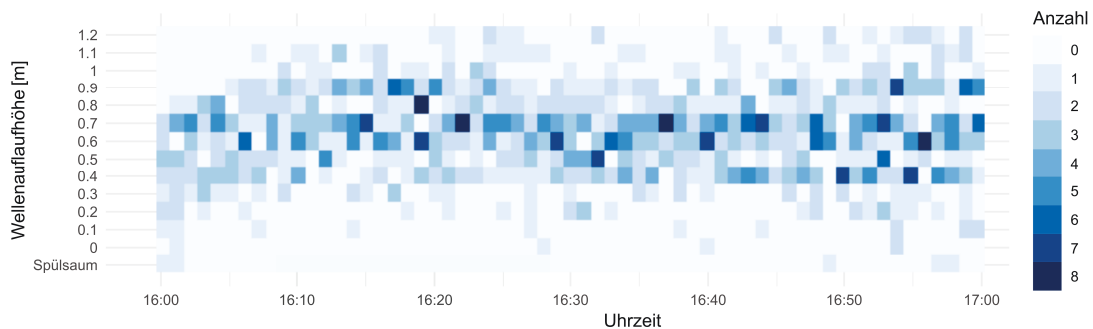


ABBILDUNG 5.44: Wellenaufbauhöhe im Bereich der Sollbruchstelle, auf Basis der visuellen Auswertung zwischen 16:00 und 17:00 Uhr.

Demgegenüber verteilten sich die erreichten Werte im zweiten Zeitraum über das gesamte Spektrum (Abbildung 5.45). Die höchste Aufbauhöhe (1,2 m) wurde während der Stunde 136-mal erreicht. Dies entspricht 12,76 % aller gezählten Wellen in diesem Abschnitt. Die zweithöchste Aufbauhöhe hingegen wurde nur 25-mal erreicht. Dies

ist vor allem in dem vorangeschrittenen Wasserstand sowie der hohen Wellenhöhe zu dem Zeitpunkt begründet. Die Wellenauflaufhöhe, die über die Höhe der Düne hinaus ging, wurde dabei nicht berücksichtigt.

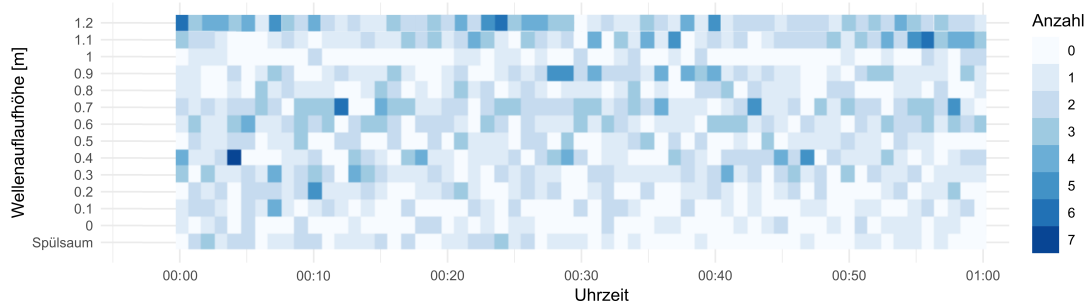


ABBILDUNG 5.45: Wellenauflaufhöhe im Bereich der Sollbruchstelle, auf Basis der visuellen Auswertung zwischen 0:00 und 01:00 Uhr.

### 5.3 Teiluntersuchungsgebiet Bathymetrie

Im Laufe der Projektzeit wurde konstant über fünf Monate im Jahr 2017 und über sieben Monate im Jahr 2018 die topographische Gestalt des Vorstrandes im Teiluntersuchungsgebiet (Abbildung 2.3) vermessen, um zum einen Veränderungen über die Zeit zu analysieren und zum anderen den Projektteilnehmern Daten bereitzustellen, um den Einfluss der küstennahen topographischen Gestalt des Meeresbodens auf die sturmflutbedingte Dünenerosion zu modellieren.

Die Mechanismen für den Sedimenttransport und die Ausbildung des strandnahen Profils sind bisher nur wenig erforscht. Für ein besseres Verständnis ist es unter anderem notwendig, die Vorstrandbathymetrie langfristig großräumiger und regelmäßiger durchzuführen. Auf Basis dieser Erkenntnisse würde sich die Prognosequalität von Sedimenttransportmodellen erheblich verbessern, einen wichtigen Beitrag zum Küstenschutz leisten und die Bewirtschaftung von wasserbaulichen Anlagen und Seehäfen optimieren.

#### 5.3.1 Untersuchungszeitraum 2017

Im Juli 2017 wurde die erste Wassertiefenmessung im Teiluntersuchungsgebiet durchgeführt. Entlang der Gewässerkante an der westlichen und mittleren Bühnenreihe liegt die Geländehöhe noch im positiven Bereich der Normalhöhe (Abbildung 5.46). In den ersten ca. 30 m Richtung Norden bleibt die Gewässertiefe mit maximal 75 cm noch flach. Weitere 30 m nördlich vergrößert sich die Wassertiefe stetig, bis eine Zone mit über 2 m Tiefe erreicht wird, die im Folgenden als Tiefwasserzone bezeichnet wird. Diese hat eine Ausdehnung in die nördliche Richtung von bis zu 32 m. Daraufhin verflacht sich die Geländetiefe wiederum bis zu einer Tiefe von 1,25 m.

Wird die Differenz der Geländehöhen vom Datensatz August zu Juli 2017 gebildet, zeigen sich deutliche Veränderungen im Höhenmodell innerhalb nur eines Monats. In

den meisten Gebieten der Tiefwasserzone verminderte sich die Wassertiefe, im nordwestlichen Bereich bis über 50 cm. Zwischen der mittleren und der östlichen Bühnenreihe hingegen waren Abtragungen zu verzeichnen. An der nördlichen Spitze der östlichen Bühnenreihe vergrößerte sich die Wassertiefe in einem oval geformten Areal um bis zu 71 cm.

Beim Differenzmodell vom September zu Juli 2017 wird der geringe Abstand zwischen den eingemessenen Punkten deutlich. Durch die höhere Auflösung werden Veränderungen detaillierter dargestellt. Nah an der Küstenlinie zwischen der mittleren und westlichen Bühnenreihe erhob sich das Gelände um bis zu 54 cm. Am nordnordöstlichen Rand sank das Terrain hingegen auf einer Breite von 65 m bis zu 76 cm. Das beschriebene ovale Areal vom August verschwand in diesem Zeitraum.

Im Gegensatz dazu sank der Meeresboden an der nördlichen Bühnenreihe im Oktober um bis zu 68 cm und im äußeren östlichen Bereich um bis zu 1,01 m. Das Areal zwischen den Bühnenreihen veränderte sich hingegen nur minimal. Die Tiefwasserzone hob sich, ähnlich wie im August in den meisten Gebieten, nördlich der westlichen Bühnenreihe um bis zu 61 cm.

In der (Abbildung 5.47) sind die minimalen und maximalen Wassertiefen im Teiluntersuchungsgebiet von 2017 dargestellt. Vor allem in der Tiefwasserzone sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Bei der maximalen Wassertiefe beträgt der tiefste Wert  $-2,49$  m, bei den minimalen Werten hingegen nur  $-2,24$  m. Östlich der mittleren Bühnenreihe ist bei der Darstellung der minimalen Wassertiefe eine deutliche Erhebung zu erkennen. Die Differenz beider Modelle beträgt hier bis zu  $0,65$  cm. Insgesamt liegt der Volumenunterschied zwischen diesen beiden Zeiträumen bei  $4755,33$  m<sup>3</sup> auf einer Fläche von  $26\,503$  m<sup>2</sup>.

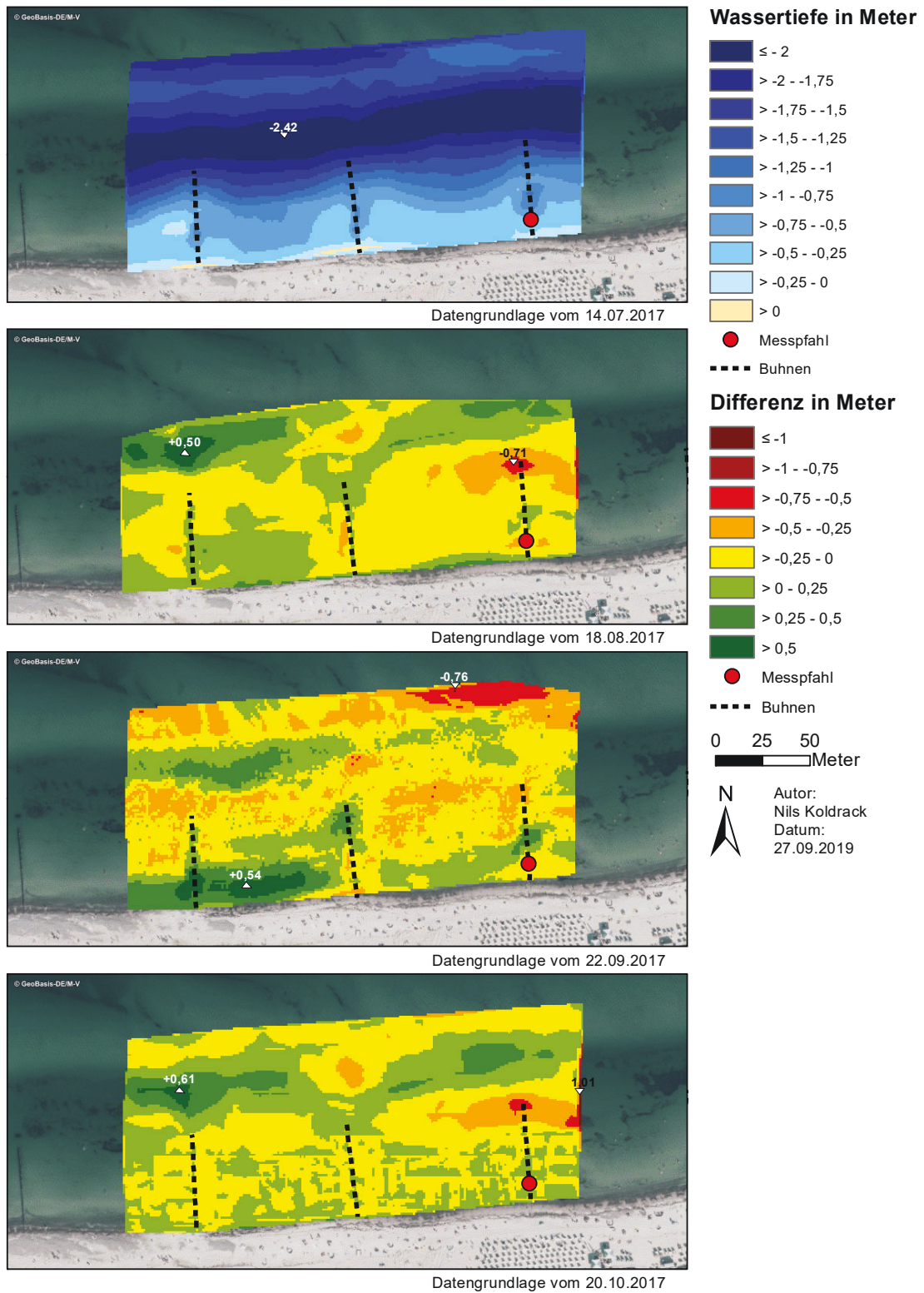
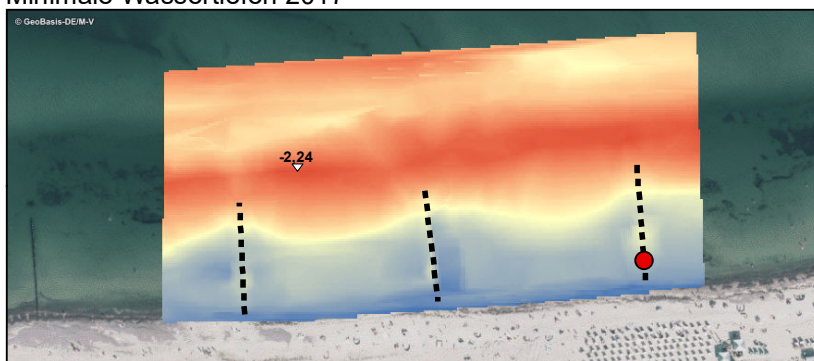
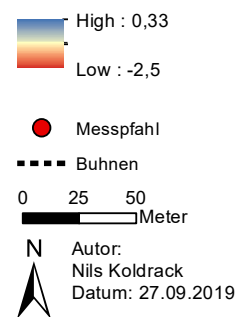


ABBILDUNG 5.46: Wassertiefe und Tiefenveränderungen des Untersuchungsgebiets von Juli bis Oktober 2017.

Minimale Wassertiefen 2017



Wassertiefe in Meter



Maximale Wassertiefen 2017

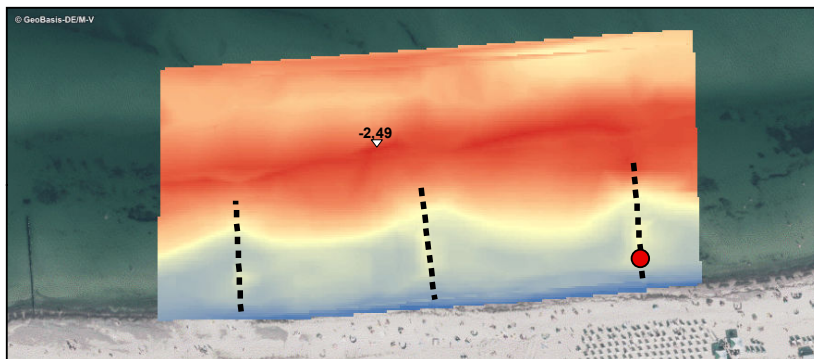


ABBILDUNG 5.47: Minimale und maximale Wassertiefen des Meeresbodens 2017.

### 5.3.2 Untersuchungszeitraum 2018

Anfang Mai 2018 wurde die erste Bathymetrie im Teiluntersuchungsgebiet aufgenommen (Abbildung 5.48). Im Bereich der Küstenlinie liegt die Geländehöhe noch im positiven Bereich. An der mittleren sowie östlichen Bühnenreihe ragen diese positiven Werte weiter in die Ostsee hinein, als zwischen den Bühnenreihen oder im westlichen Bereich. In den ersten 60 m Richtung Norden vergrößert sich die Wassertiefe gleichmäßig, bis die erste Tiefwasserzone mit über 2 m Wassertiefe erreicht ist. Diese erstreckt sich über eine Länge von circa 30 m, bis eine Sandbank erreicht wird. Hier betrug die Wassertiefe minimal 1,25 m.

Das Differenzmodell vom Datensatz Mai zu Juni 2018 zeigt, wie sich der Meeresboden veränderte, obwohl in diesem Zeitraum keine Stürme registriert wurden (Wetterkontor, 2019). In den meisten Regionen sank bzw. erhob sich das Gelände im Maximum um bis zu 25 cm. Es gibt jedoch zwei kreisförmige Areale an der Nordspitze der westlichen und mittleren Bühnenreihen, bei denen das Gelände um bis zu 98 cm abgesunken ist. Östlich des Standortes des Messpfahls hatte sich das Terrain großflächig um bis zu 47 cm angehoben.

Beim Differenzmodell im Juli bleiben die Veränderung größtenteils bestehen. Zwischen der mittleren und östlichen Bühnenreihe erhob sich das Gelände überwiegend um bis zu 25 cm. Um die mittlere Bühnenreihe herum hingegen vertiefte sich das Terrain um circa 25 cm. Am östlichen Rand des Untersuchungsgebiets bildete sich ein kreisförmiges Areal, in dem die Tiefe um bis zu 75 cm zunahm. Gleiches gilt für ein kleines Gebiet westlich der östlichen Bühnen. Diese Senke mit einem Ausmaß  $20\text{ m} \times 8\text{ m}$  ebnete sich im August wieder, das kreisförmige Areal am östlichen Rand hingegen vergrößerte sich. Der Meeresboden im nördlichen Bereich des Untersuchungsgebiets hob sich dagegen größtenteils um bis zu 50 cm.

Das Ergebnis der in Unterabschnitt 2.3.1 gezeigten Analyse zur Veränderung der Küstenlinie führte dazu, dass das Teiluntersuchungsgebiet Düne eine Bühnenreihe in Richtung Osten verschoben werden musste. Somit verschob sich ebenfalls das Gebiet für die Aufnahme der Bathymetrie (Abbildung 5.49). Das Ausgangsmodell vom September 2018 ähnelt dem vom Mai, nur war die Tiefwasserzone über die gesamte Breite ausgeprägter. Obwohl die Sturmflutseason zu dieser Zeit schon begonnen hat, sind die Differenzen der jeweils folgenden Zeitreihen einheitlich. Auffällig ist, dass sich ab Anfang November große Flächen entlang der Küstenlinie um bis zu 76 cm angehoben haben. Ebenso sank die Tiefwasserzone um bis zu 69 cm.

Durch die flacher gewordenen Vorstrandprofile und einer Verschiebung der Uferlinie brechen die Wellen auch bei erhöhten Wasserständen früher. Ein Großteil der Seeangangsenergie wird dabei dissipiert, sodass sie nicht mehr für die Erosionsprozesse an Dünen zur Verfügung steht.

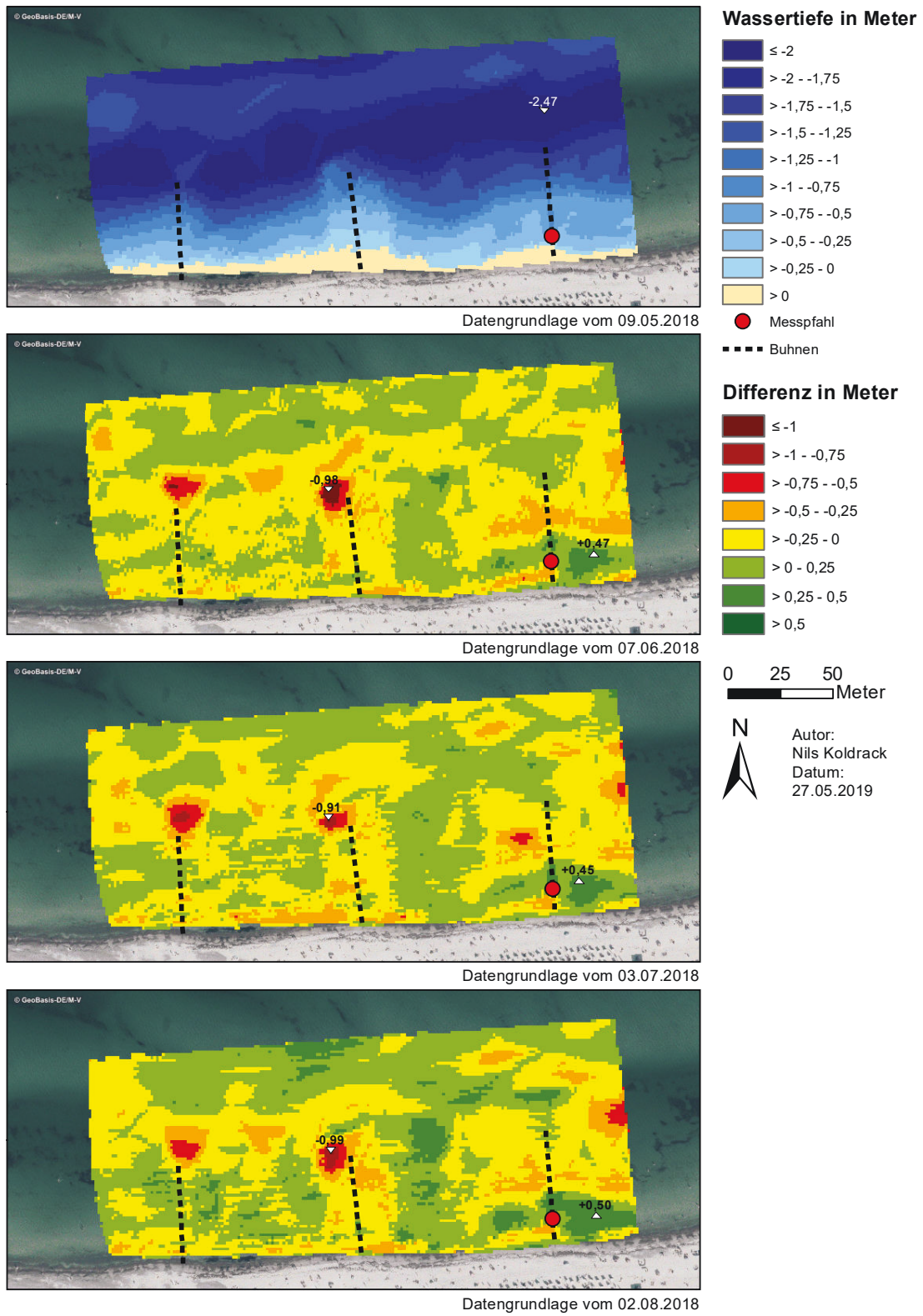


ABBILDUNG 5.48: Wassertiefe und Tiefenveränderungen des Untersuchungsgebiets von Mai bis August 2018.

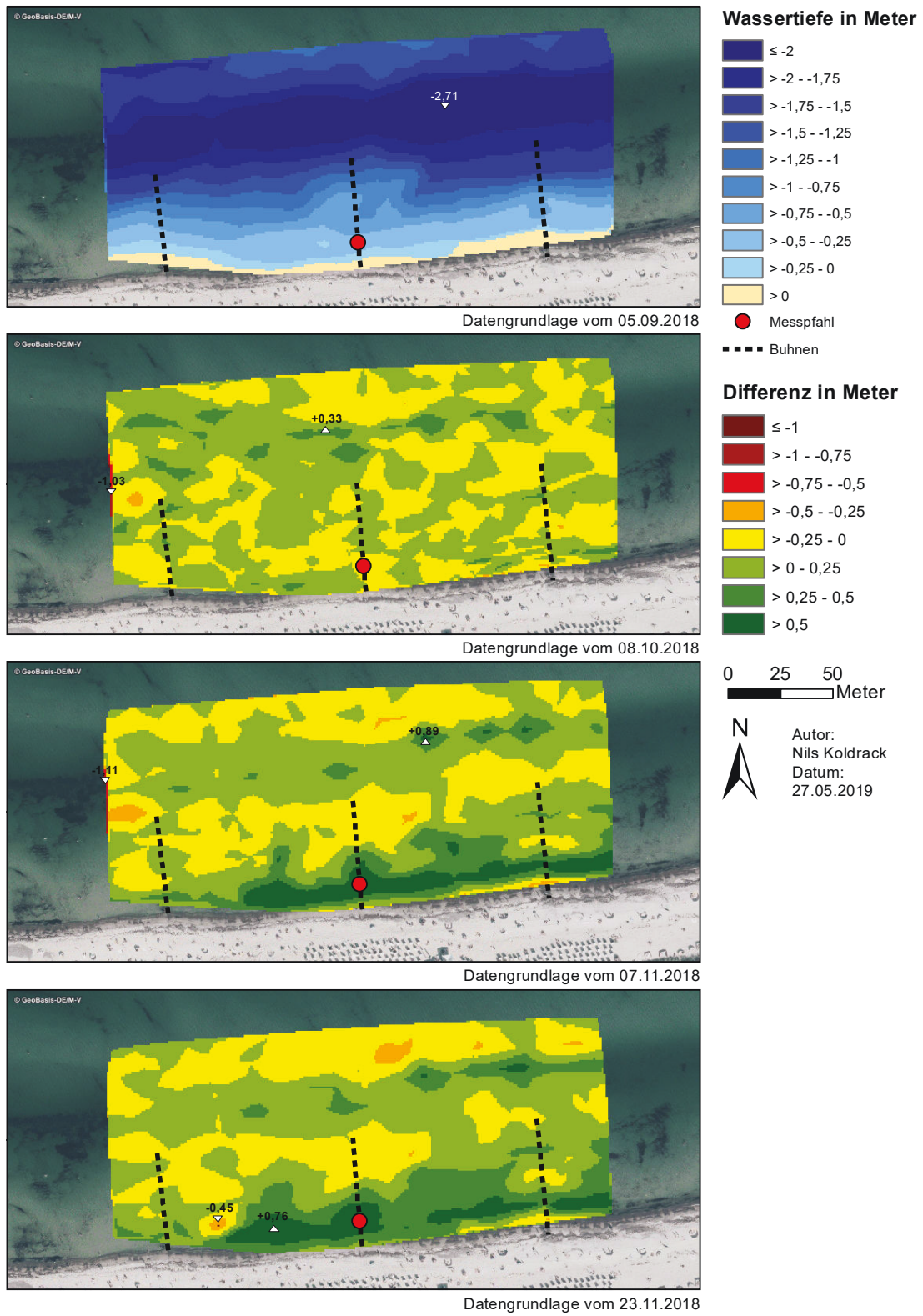
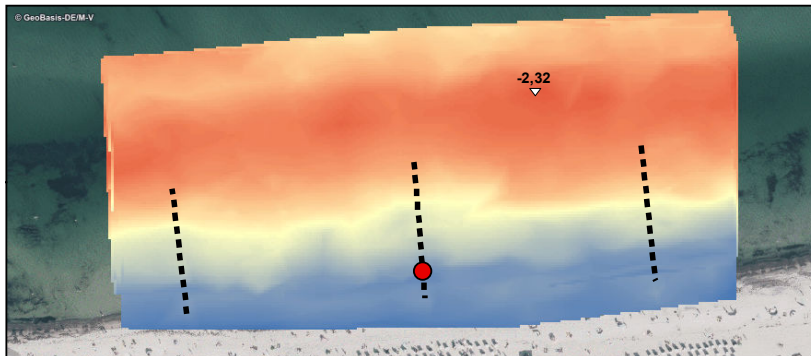


ABBILDUNG 5.49: Wassertiefe und Tiefenveränderungen des Untersuchungsgebiets von September bis November 2018.



Die minimalen und maximalen Wassertiefen im Teiluntersuchungsgebiet von 2018 sind in der Abbildung 5.50 dargestellt. Im östlichen Bereich in der Tiefwasserzone sind mit Höhenunterschieden von bis zu 39 cm deutliche Unterschiede zu erkennen. In der Flachwasserzone auf Höhe des Messpfahls ist die Geländehöhe der minimalen Wassertiefe deutlich höher (42 cm) als bei den maximalen Werten (-39 cm). Die Differenz beider Modelle beträgt hier bis zu 74 cm. Insgesamt liegt der Volumenunterschied zwischen diesen beiden Zeiträumen bei 4727,07 m<sup>3</sup> auf einer Fläche von 27 045 m<sup>2</sup>. Dies ist nur 28,26 m<sup>3</sup> weniger als im Untersuchungszeitraum 2017, bei fast gleich großer Untersuchungsfläche (um 542 m<sup>2</sup> größer).

Minimale Wassertiefen 2018



Wassertiefe in Meter

High : 0,85  
Low : -2,71

Messpfahl

Buhnen

0 25 50 Meter

N  
Autor:  
Nils Koldrack  
Datum: 03.10.2019

Maximale Wassertiefen 2018

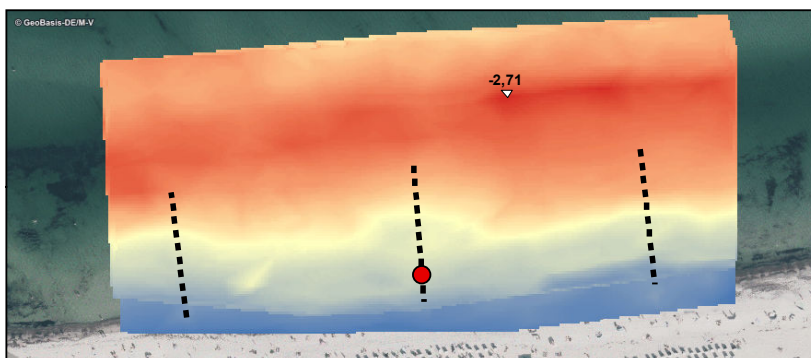


ABBILDUNG 5.50: Minimale und maximale Wassertiefen des Meeresbodens 2018.

### 5.3.3 Sturmflutbedingte Meeresbodenveränderung

Vier Tage nach dem Sturmflutereignis wurde die Bathymetrie letztmalig durchgeführt. Innerhalb von 14 Tagen hat sich die topographische Gestalt des Meeresbodens deutlich verändert (Abbildung 5.51). Entlang der Küste erhob sich das Gelände um bis zu 24 cm. Ursache dafür könnte der abgetragene Sand der Versuchsdüne sein, der sich in diesem Bereich abgelagert hat. Zwischen der westlichen und mittleren Buhnenreihe vertiefte sich das Gelände in einem Bereich von 23 m × 12 m um bis zu 57 cm. Seitlich vom Messpfahl vertiefte sich das Relief ebenfalls um bis zu 18 cm. In der östlichen Tiefwasserzone lag mit 35 cm die Fläche mit der höchsten Erhebung. Insgesamt wurde in diesem Zeitraum Material mit einem Volumen von 174,01 m<sup>3</sup> in diesem 24 560,73 m<sup>2</sup> großen Bereich umgelagert.

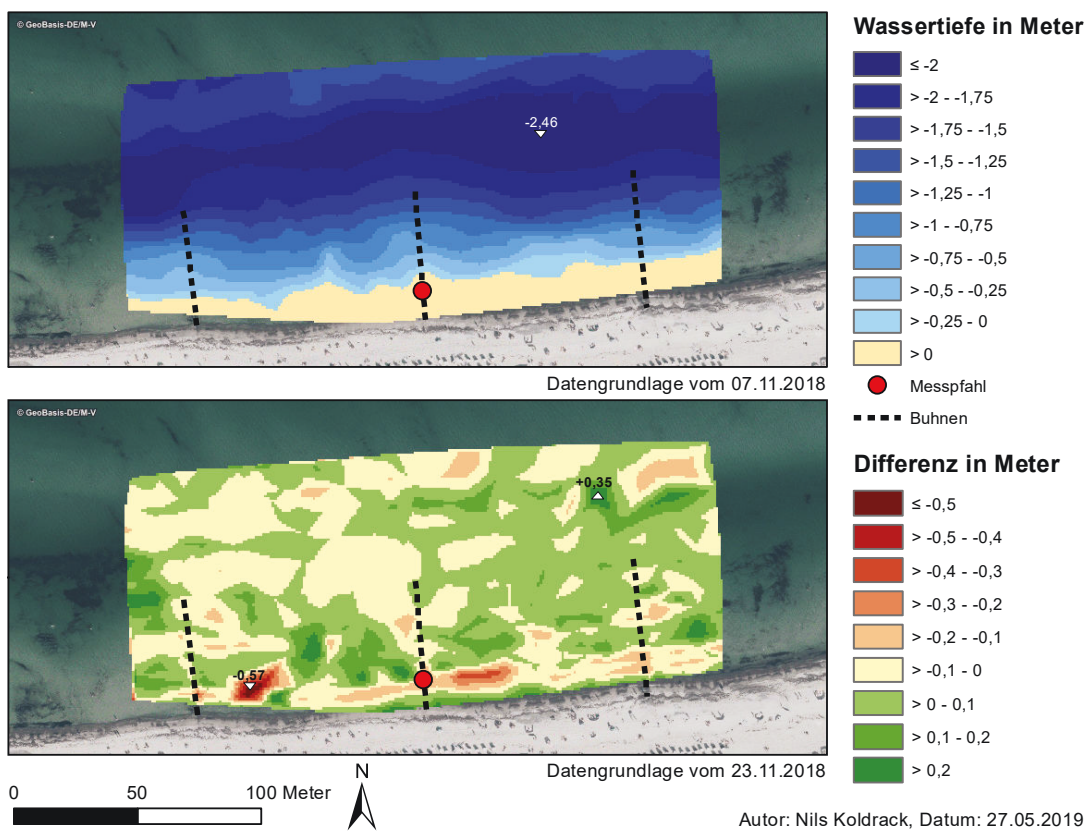


ABBILDUNG 5.51: Wassertiefe und Tiefenveränderungen des Untersuchungsgebiets vor und nach der Sturmflut.

## Kapitel 6

# Diskussion

### 6.1 Teiluntersuchungsgebiet Düne Saison 2017/2018

Für die Analyse der Deflation lagen sowohl für die Windrichtung als auch für die Windstärke stündliche Werte für den Untersuchungszeitraum vor. Da es sich bei der Datengrundlage des DWD um Mittelwerte handelt, können Böen nur in unzureichender Form abgebildet werden. Ferner wird nur die stündlich dominante Windrichtung angegeben. Aus den Umweltdaten ist daher nur eine Tendenz der Windverhältnisse ableitbar.

Ebenso lagen die Messwerte des Niederschlags in stündlicher Auflösung vor. Aufgrund der Epochenlänge (monatlich) ist neben der Bewertung der stündlichen Intensität mm/h eine Betrachtung der kumulierten Tagesniederschläge in mm/d zweckmäßig.

Aufgrund der teils großen Zeitspannen (monatlich) zwischen den Befliegungen der Forschungsdüne aus der Saison 2017/18 ist eine genauere Ursachenbestimmung für die Änderung der Dünengestalt in hinreichender Qualität schwer abschätzbar. Eine Vermessung des Teiluntersuchungsgebiets in kürzeren Intervallen würde genauere Analysen zulassen. Ein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen den Windverhältnissen und der vorherrschenden Dünenerosion und den Sandablagerungen im Dünenumfeld ist dennoch feststellbar. In den ersten drei analysierten Zeiträumen lagen die Anteile der Niederschlagsstunden an den Gesamtstunden der Zeitabschnitte jeweils deutlich über dem der vierten Epoche. Dies ist als Indikator zu sehen, dass die häufigere Bodenbefeuchtung durch den Niederschlag in den ersten Zeiträumen erosi-onshemmend gewirkt hat.

### 6.2 Teiluntersuchungsgebiet Düne Saison 2018/2019

Während der Testläufe und spätestens im Verlauf der Messkampagne hat sich herausgestellt, dass der konstruierte Messpfahl zur Vermessung der Versuchsdüne geeignet ist. Trotz der widrigen Wetterbedingungen ließ sich die Technik einfach installieren. Aufgrund der Bauweise und den seitlichen Abspannungen sowie den geringen Windgeschwindigkeiten während der Sturmflut kam es nur zu geringen Schwingungen des Messpfahls (Abschnitt 6.4).

Während der Messkampagne hat sich gezeigt, dass die Messtechnik durch die Schutzhülle vor leichtem Regen und Spritzwasser geschützt wurde.

Mit der Versuchsdüne aus der Saison 2018/19 wurde ein großmaßstäbliches Dünenbauwerk errichtet, welches aufgrund der kurzen Standdauer aber keine Bepflanzung

mit Strandhafer aufwies. Die Bepflanzung ist für den Küstenschutz ein unverzichtbarer Bestandteil, da sie durch die Verwurzelung den Abtragungswiderstand bei Sturmfluten erhöht. Mit einer Bepflanzung der Forschungsdüne wäre somit die Erosion der Düne während der Sturmflut beeinflusst worden.

Bei den gemessenen Querprofilen in den östlichen und mittleren Bereichen der Düne erodierte der Verschleißteil innerhalb von drei bis vier Stunden. Der Reserveteil hingegen wurde vergleichsweise langsam abgetragen, bis es zur Bildung der Breschen kam. Im westlichen Gebiet der Forschungsdüne erodierte der Dünenkörper langsamer und der Verschleißteil wurde erst nach fünf bis sechs Stunden abgetragen. Der Reserveteil wurde nur umgeformt und es kam in diesem Bereich nicht zu einer Breschenbildung. Grund dafür kann die Geländehöhe des Dünenfußes sein, die im westlichen Teil der Düne 26 cm höher war als an den östlichen Flanken.

Die Breschen in den beiden Bereichen der Düne entwickelten sich jeweils unterschiedlich. Im östlichen Abschnitt bildeten sich innerhalb von 28 Minuten drei Breschen, die sich im Untersuchungszeitraum zu einem gemeinsamen großen Durchbruch entwickelten. An der Sollbruchstelle entstand eine Bresche, die sich in den ersten zehn Minuten mit 6 cm Breite nur geringfügig ausbildete, sich jedoch in den folgenden 30 Minuten um 2,84 m vergrößerte. Um eine genaue Aussage treffen zu können, wie sich eine Bresche in einer Düne entwickelt und ausbreitet, sind weitere Messungen an weiteren Dünen nötig, um vergleichbare Datensätze zu generieren.

Anhand der Videoaufnahme aus der Polderfläche wurde aufgezeigt, wie schnell sich eine Bresche bei einströmenden Wellen entwickelt. Ein Grund für die schnelle Ausbildung des Durchbruchs könnte das rückströmende Wasser sein, das diesen Prozess beschleunigt. Dies würde auch die abgerundeten Durchbruchkanten auf der Dünenrückseite erklären (Abbildung 5.21).

Während der Datenaufnahme und -auswertung hat sich gezeigt, dass der TLS für eine ereignisbezogene Oberflächenvermessung einer Düne während einer Sturmflut geeignet ist. Jedoch wurde festgestellt, dass bei der Datenerfassung während der Messkampagne der Wellenauflauf bei der Vermessung des Dünenkörpers zu Störeinflüssen führt, da das Wasser die Laserstrahlen nicht reflektierten und es somit bei einem hohen Wellenauflauf zu Abschattungsbereichen kommen kann (Abbildung 6.1). Die durch die Bewegung des Wassers entstandene Gischt reflektiert zum Teil die Laserstrahlen. Bei einer Differenzanalyse von verschiedenen DGM der Düne müssen daher diese Regionen nachbearbeitet werden, da sonst die standardisierten Auswertungsmethoden zu Fehlern führen. Ebenso kann aus dem gleichen Grund der Bereich vor der Düne nur unzureichend erfasst werden, weil nur bei einem Rückgang der Sturmflut die Fläche mit der genutzten Methode vermessen werden kann. Werden alle aufgenommenen Punktwolken betrachtet, wurde im Schnitt aufgrund des Wellenaufbaus 0,6 % des Dünenkörpers abgeschattet.

Um die Gischt aus den Punktwolken herauszufiltern, ist es möglich, über die Reflektionsdaten diese Punkte in der Software *CloudCompare* zu extrahieren. Analysen der Punktwolken zeigen, dass Punkte im Bereich des Wassers zu 94,8 % Reflektionswerte von 48 - 192 besaßen, im Dünenbereich hingegen zu 98,6 % Werte von 196 - 255. Dabei liegt der Wertebereich zwischen 0 und 255, wobei 0 keiner und 255 vollständiger Reflektion entspricht. Werden Reflektionswerte bis 192 aus allen Punktwolken gefiltert, verringert sich die durchschnittliche Anzahl der Punkte in der Punktwolke

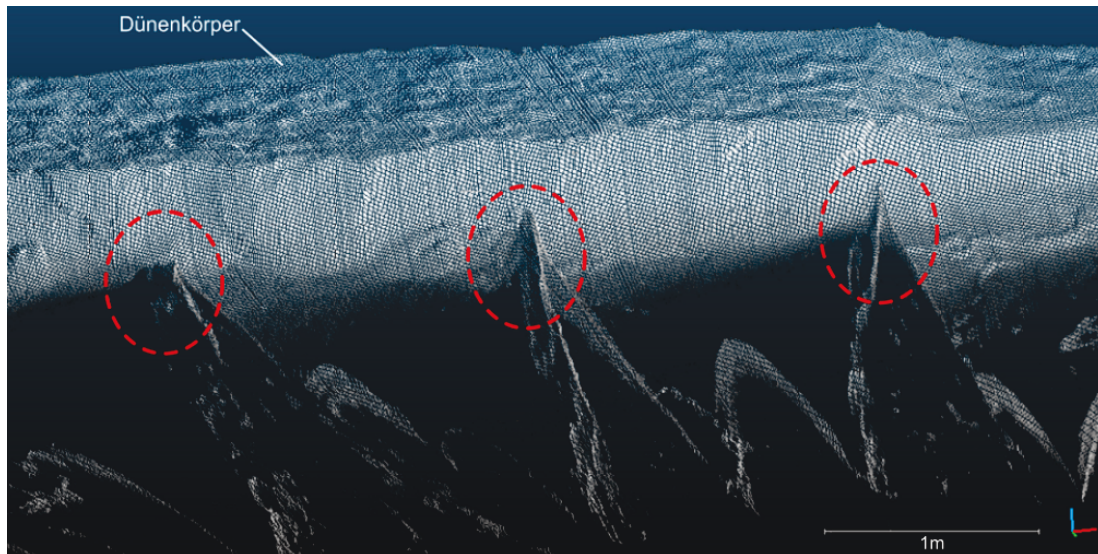


ABBILDUNG 6.1: Abschattungsbereiche durch Wellenauflauf.

um 36,1 %. Da jedoch nicht alle Punkte im Bereich des Wassers vollständig extrahiert werden können, ist eine manuelle Nachbearbeitung unumgänglich.

Um kleinräumige Prozesse der Breschenbildung auf der Landseite einer Düne oder eines ähnlichen Küstenschutzbauwerks analysieren zu können, hätte ein Laserscanner in der Polderfläche die Rückseite des Bauwerks konstant vermessen müssen. So können die generierten Punktwolken des Bauwerks von der Seeseite mit der Rückseite referenziert werden, um das Bauwerk als einheitliches Modell darzustellen.

Die eingesetzten Kameras hatten den Vorteil, dass sie strapazierfähig und einfach in der Handhabung waren. Eine Alternative wäre ein integrierter optischer Bildstabilisator gewesen, da der Messpfahl während den Aufnahmen vibrierte und dies die Auswertung mit dem optischen Fluss erschwerte. Bei einer neuen Messkampagne wäre es vorteilhaft, Kameramodelle mit Bildstabilisator zu verwenden.

### 6.3 Teiluntersuchungsgebiet Bathymetrie

Die Ergebnisse der Bathymetrieanalyse zeigen über die untersuchten Monate Veränderungen des Meeresbodens in dem Teiluntersuchungsgebiet. Da der durchschnittliche Punktabstand aller durchgeführten Bathymetrien bei 8,32 m liegt und die Raster interpoliert wurden, konnten kleinräumige Prozesse im Teiluntersuchungsgebiet nicht analysiert werden. Um eine höhere Auflösung der Raster zu generieren und somit die gemessenen Punktabstände zu verringern, wäre es nötig gewesen, die Messungen durchgängig mit einem ADCP durchzuführen. Dies war jedoch im Rahmen des Untersuchungszeitraums nicht möglich. Anhand der höher aufgelösten Raster wäre eine Analyse von kleinräumigen Veränderungen der topographischen Gestalt möglich.

Welchen Einfluss die Veränderungen der Bathymetrie (Neigung, Tiefe, etc.) auf den Energietransport der Seewellen landwärts und somit auch auf die sturmflutbedingte Dünenerosion haben, wird in Schweiger et al. (2020a) und Schweiger et al. (2020b)

dargelegt werden. Die hohe Dynamik der küstennahen Bathymetrie zeigt einen signifikanten Einfluss auf die Simulationsergebnisse, so sind Unterschiede in den finalen Topographien der Versuchsdüne zu sehen. Ebenso sind die Aktualität der verwendeten Bathymetrie sowie die Auflösung der Daten sehr wichtig. So zeigen die Simulationsergebnisse mit den freien Daten des BSH (Auflösung  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$  von 1996) signifikante Unterschiede zu den aktuell aufgenommenen Daten.

Um die direkte Bathymetrieränderung nach einer Sturmflut analysieren zu können, ist eine zeitnahe Vermessung des Vorstrandes vor und nach einer eintreffenden Sturmflut nötig. Die Digitalisierung des Meeresbodens im November 2018 fand vier Tage nach bzw. elf Tage vor der Sturmflut statt. Bei einer unmittelbar vor und nach der Sturmflut stattgefundenen Vermessung hätte nachgewiesen werden können, dass die positive Volumenveränderung im Untersuchungsgebiet, insbesondere entlang der Küstenlinie, durch die Erodierung der Forschungsdüne zustande kam (vgl. Abbildung 5.51).

## 6.4 TLS-Daten

Bei der Georeferenzierung der vom TLS aufgenommenen Punktwolke mit den Messmarken wird mit Hilfe der Software *Cloud Compare* die Differenz der Referenzpunkte ausgewertet. Abbildung 6.2 zeigt den Fehler in Zentimeter bei der Ausrichtung.

Bei den ersten 15 Scans lag der mittlere Messfehler bei 1,19 cm. Bei den folgenden Scans nahm der Fehler ab und lag im Durchschnitt bei 0,37 cm. Ein Grund für diesen Unterschied kann eine erhöhte Vibration bzw. Bewegung des Messpfahls und/oder der Zielmarken sein. Vor allem bei den Zielmarken, die auf Kanthölzern eines Querschnittes von  $7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$  und in einer Höhe von 1,5 m montiert wurden, welche in Einschlaghülsen, die 70 cm in den Sand geschlagen wurden, geschraubt wurden, war über die Zeit zu beobachten, dass das Fichtenholz durch den Regen und Feuchtigkeit aufquoll und sich in den Hülsen verpresste, sodass die Vibration abnahm. Eine Verstrebung der Zielmarken hätte der Bewegung entgegenwirken können. Die Bewegung und Vibration der Messtafeln und des Messpfahls führte zu geringen Messfehlern, die jedoch keine signifikanten Auswirkungen auf die Deformationsanalyse der gesamten Forschungsdüne hatten.

Der Durchschnittsfehler bei allen Scans lag bei 0,57 cm. Wurden alle fünf Zielmarken bei der Referenzierung einbezogen, lag der Fehler im Durchschnitt bei 0,51 cm. Konnten aufgrund der Einschränkung des Messbereichs nur vier Messtafeln berücksichtigt werden, war er hingegen doppelt so groß (1,02 cm). Bei drei Zielmarken lag er bei 1,06 cm. Wird der Durchschnittsfehler in Relation zur Dünenhöhe betrachtet, liegt die Geländehöhenabweichung im Mittel bei 0,48 %. Unter den gegebenen Voraussetzungen ist diese Abweichung als äußerst gering zu bezeichnen.

Je nach Strahldivergenz, Winkelauflösung, Qualität der Distanzmessung und Oberflächenbeschaffenheit ist ein unterschiedlicher Qualitätsverlauf der Ergebnisse der einzelnen Scans zu erwarten (Wunderlich et al., 2013).

Aufgrund der größeren Entfernung ist die Punktdichte an den östlichen und westlichen Flanken (ca. 77 m) deutlich geringer als an der Sollbruchstelle, die sich lotrecht

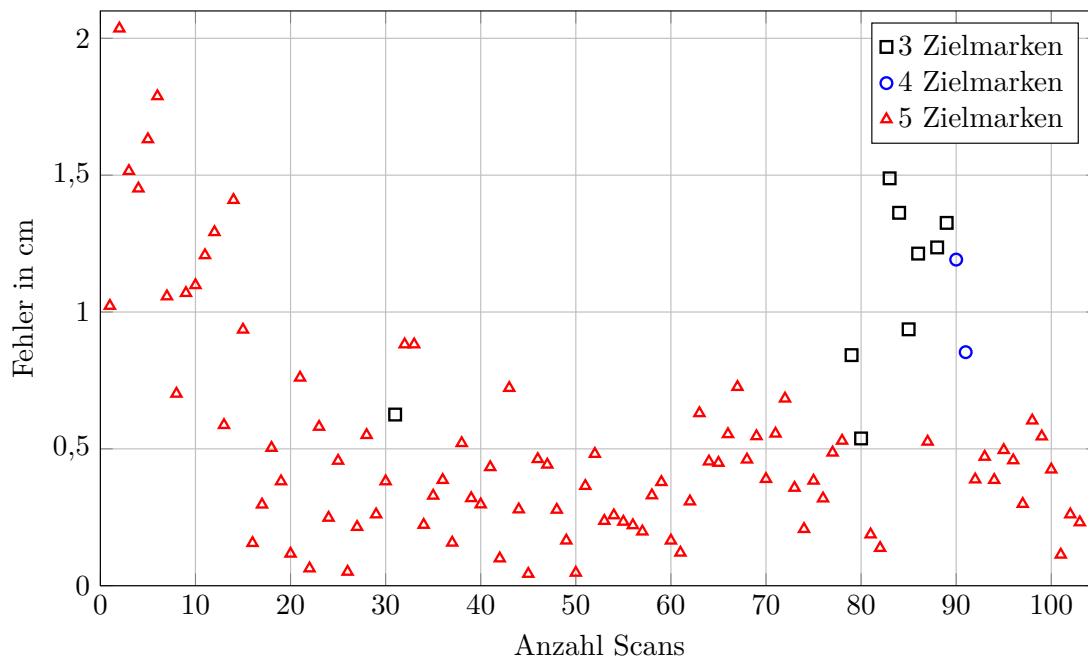


ABBILDUNG 6.2: Referenzierungsfehler der einzelnen Scans.

zum Messpfahl befand und somit den geringsten Abstand zum TLS besaß (Abbildung 6.3). In der Region der Sollbruchstelle besaßen die Punkte bis zu 7061 Punkt-Nachbarn in einem Kugelradius von 0,5 m. In den äußeren Bereichen nimmt diese Anzahl der Punkt-Nachbarn ab. Im Bereich der Sollbruchstelle besitzen die Punkte im Schnitt einen Abstand von 8 mm, an den äußeren Flanken hingegen bis zu 90 mm. Durch die geringere Punktdichte an den Flanken sind feinere Strukturen und Deformationen in kleineren lokalen Bereichen in der Forschungsdüne nicht zu erfassen. Dementsprechend ist das Konzept der Sollbruchstelle im zentralen Bereich vor dem Messpfahl aufgegangen. Durch die Entstehung einer Bresche im Gebiet mit der größten Messauflösung konnte der Prozess vollständig und hochauflösend mit der Messmethode dokumentiert werden.

Um eine gleichmäßigere Punktdichte über die gesamte Düne zu erhalten, wären mehrere Scans von unterschiedlichen Standorten erforderlich, um diese über gemeinsame Zielmarken zu referenzieren und zu kombinieren.

Abbildung 6.4 zeigt die gemessenen Winkel des Neigungssensors je Scan. In den ersten 45 Scans liegt der Neigungswinkel des TLS zwischen  $0,57^\circ$  und  $0,59^\circ$ . Grund für die Neigung kann die Ausrichtung des Messpfahls sein, die bei der Installation oder Aufrichtung während der Messkampagne nicht lotrecht durchgeführt wurde.

Während der Scans 46 bis 48 stieg die Neigung der Scans an und lag fortlaufend zwischen  $1,05^\circ$  und  $1,14^\circ$ . Ursache für den Anstieg der Neigung und die darauffolgende Werte (Standardabweichung  $0,02^\circ$ ) könnte das Absacken der Betongewichte sein (Abbildung 6.5), die mit dem Messpfahl durch zwei Stahlseile verbunden waren und zur Verringerung der Schwingungen des Pfahls dienten.

Da der Neigungswinkel zwischen den einzelnen Scans variiert (Standardabweichung  $0,027^\circ$ ) ist zu vermuten, dass der Messpfahl während der Messungen durchgehenden Schwankungen und Vibrationen ausgesetzt war und diese nicht durch den nivellierenden Wert des Zweiachsenkompensators ( $\pm 0,015^\circ$ ) ausgeglichen werden konnten.

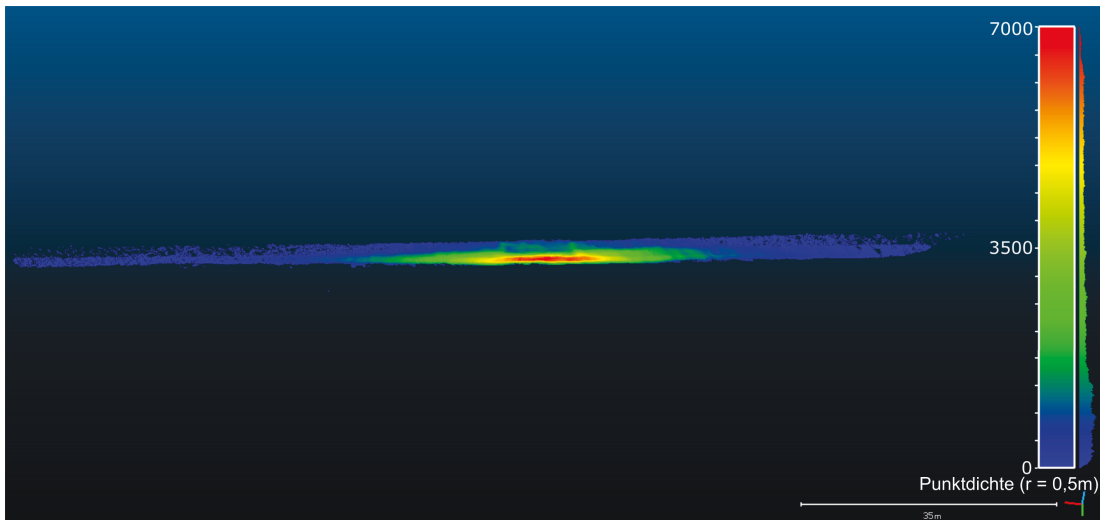


ABBILDUNG 6.3: Dichte der Punktwolke der Versuchsdüne.

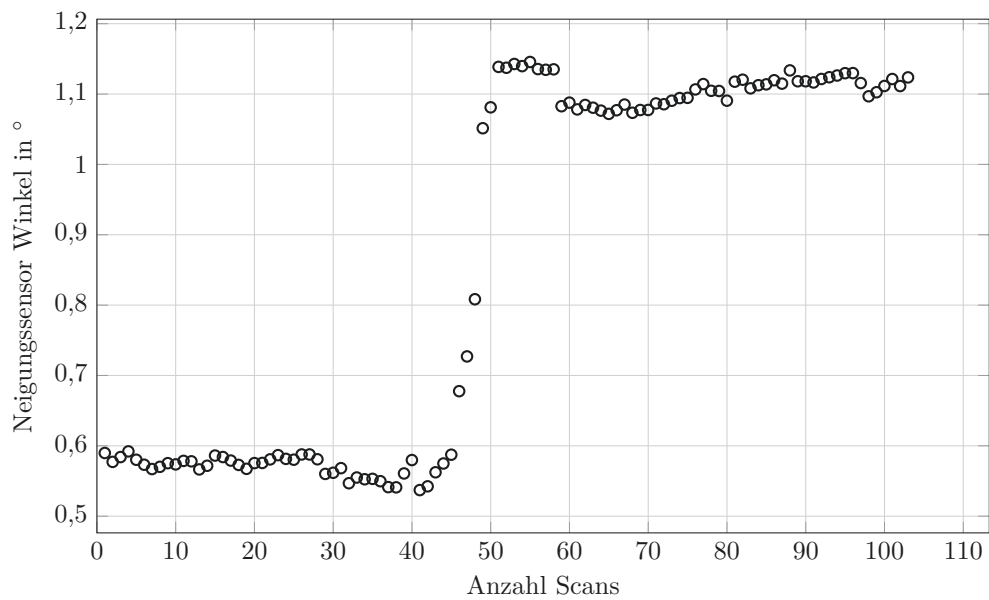


ABBILDUNG 6.4: Gemessener Winkel des Neigungssensors je Scan.



ABBILDUNG 6.5: Betongewichte nach der Sturmflut (Foto: Christian Kaehler).



### 6.5 Gleichgewichtsprofil

Für die Berechnungen des Dünenabbruchmodells von Newe (2013) (Abschnitt 1.3) wird neben der Wassertiefe und dem Abstand zur Küstenlinie der Gleichgewichtsprofilparameter benötigt. Dieser charakterisiert die sich infolge der Energiedissipation einstellende Steilheit des sich im Gleichgewicht befindlichen Profils des Vorstrands und ist von den Eigenschaften des Sediments abhängig. Es wurde eine Trockensiebung nach DIN EN ISO 17892-4 durchgeführt, um die Korngrößenverteilung zu bestimmen. Die Siebungen wurden an drei Proben aus dem Teiluntersuchungsgebiet der Versuchsdüne ausgeführt. Bei den Sanden handelt es sich um Mittelsande mit feinsandigen und geringen grobsandigen Anteilen. Sie sind eng gestuft (Cu 1,9-2,2 entsprechend DIN EN ISO 14688-2:2004, Abbildung 6.6). Die Ermittlung der Korngrößenverteilung wurde mit Unterstützung des Baugrundlabors der Firma INROS LACKNER SE durchgeführt.

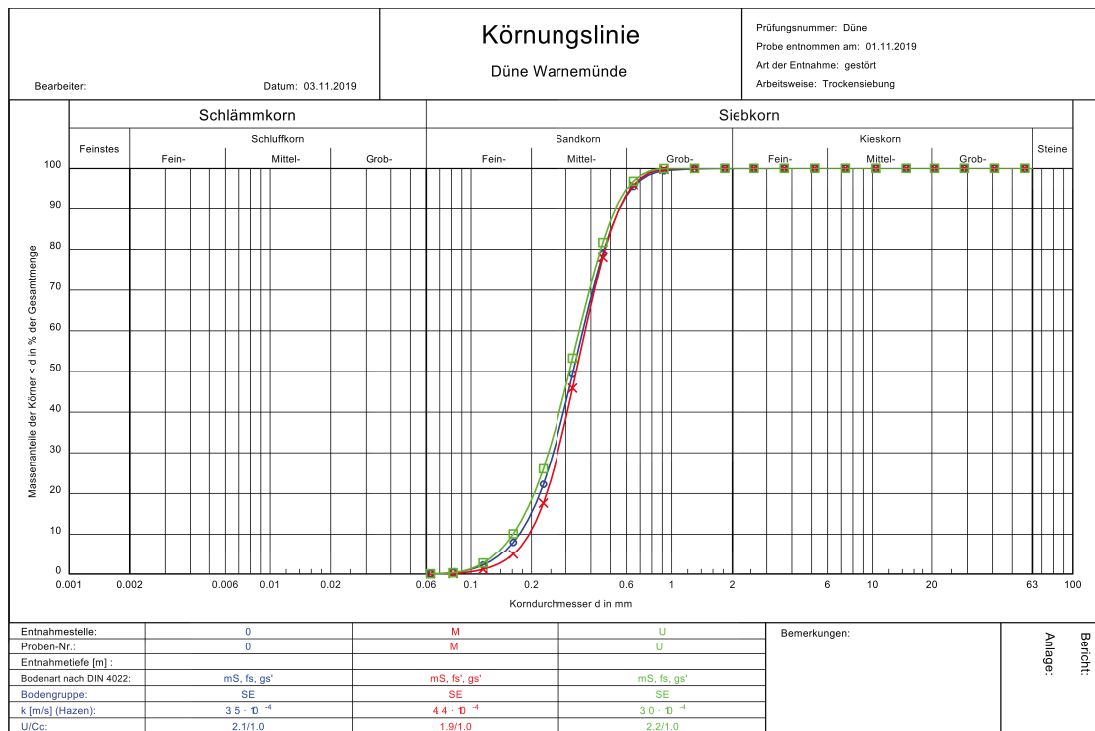


ABBILDUNG 6.6: Körnungslinien der drei Entnahmestellen im Teiluntersuchungsgebiet.

Bei einem mittleren Korndurchmesser ( $d_{50}$ ) von 0,32 mm entspricht der Gleichgewichtsprofilparameter nach dem Modell von Kriebel (1994)  $0,12 \text{ m}^{1/3}$ .

Um eine Schätzung eines Profils der Dünenerosion bei einer Sturmflut zu erhalten, verwenden den Heijer et al. (2008) eine Methode, die auf empirischen Gleichgewichtsprofilen nach einem Sturm basiert. Die Methode wurde durch Laborexperimente erstellt und durch Felddaten der niederländischen Küste validiert (van de Graaff et al., 2007). Das Poststurm-Gleichgewichtsprofil wurde für verschiedene Werte der signifikanten Wellenhöhe  $H$ , der Spitzenwellenperiode  $T$  und der mittleren Fallgeschwindigkeit von Dünen sand  $w$  festgelegt:

$$y(x) = \frac{H}{3,8} [\sqrt{1 + px} - 1], \quad p = 17,3H^{-1,28}T^{0,45}w^{0,56}. \tag{6.1}$$

Aus den Messdaten der AWAC 4-Sonde und der RAdOst-Messboje wurde die signifikante Wellenhöhe mit 0,79 m (Mittelwert der Wellenhöhe bei einem Wasserstand von mindestens 0,35 m ü. NHN, dem Wasserspiegel bei dem die Düne belastet wurde) und die Peakperiode mit 4,46 s festgelegt. Die Fallgeschwindigkeit des Sandes liegt nach Kriebel (1994) bei einem Korndurchmesser ( $d_{50}$ ) von 0,32 mm bei 0,046 m/s.

Die Gleichgewichtsprofile von Newe (2013) und den Heijer et al. (2008) sind in Abbildung 6.7 visualisiert. Um diese zu vergleichen, wurden die Messdaten des Strandprofils aus dem Dünenabschnitt West mit einbezogen. Dabei zeigt sich, dass der Ansatz von Newe (2013) und das Gleichgewichtsprofil von den Heijer et al. (2008) über den Messdaten liegen (Mittelwert von 24 cm bzw. 14 cm).

Für den Vergleich der Gleichgewichtsprofile mit den Messdaten muss zum einen beachtet werden, dass die Daten des Parameters der Wellenhöhe zwischen den jeweiligen Messstationen (RadOst Messboje, AWAC 4-Sonde und dem IMK Sensor) schwanken (vgl. Abbildung 5.14). Dies führt zu Abweichungen der Ergebnisse.

Ebenso sind die Messdaten keine Daten des Strandprofils während eines erhöhten Wasserstandes, so wie es Newe (2013) voraussetzt, sondern wurden aus den UAV-Daten generiert, die aufgenommen wurden, nachdem das Hochwasser sich zurückzog und die Düne nicht mehr belastet wurde (19.11.2018, 12 Uhr). Die Daten wurden jedoch als Vergleichsprofil gewählt, da nach van Rijn (2009) die Dünenerosion abnimmt, wenn vergleichsweise kleinere Sturmflutpegel, kleinere Wellenhöhen und kleinere Wellenperioden auftreten, als zu den Maximalwerten der jeweiligen Sturmflut. Daher ist zu vermuten, dass sich das Ausgangsprofil aus den Messdaten nach Erreichen des Scheitelpunkts geringfügig verändert hat und sich somit den beiden Gleichgewichtsprofilen annähern könnte.

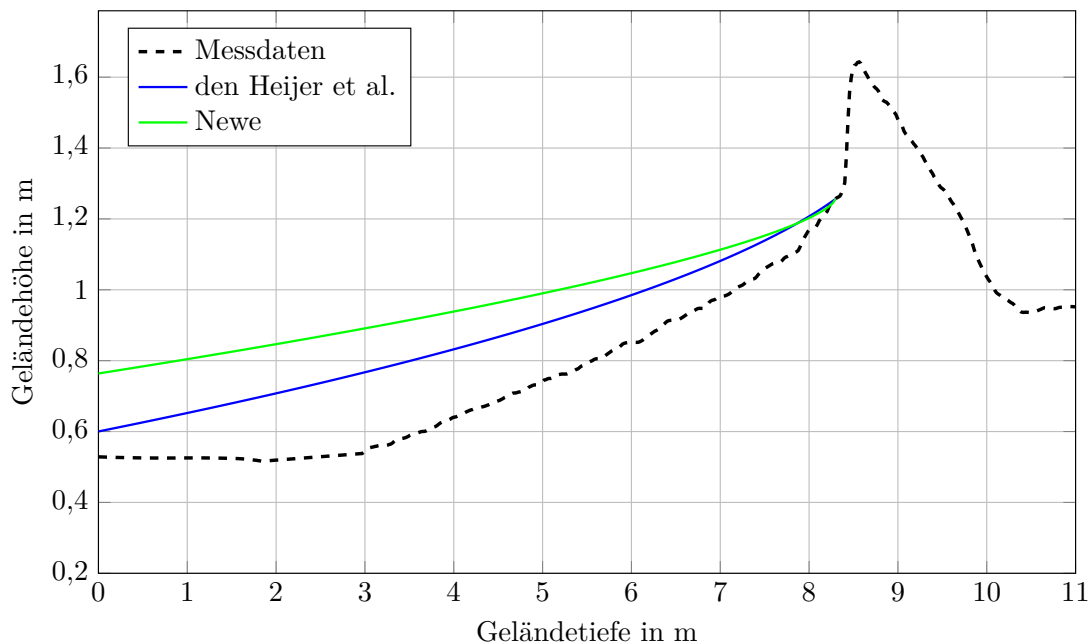


ABBILDUNG 6.7: Vergleich der Messdaten mit den Gleichgewichtsprofilen.

## Kapitel 7

# Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnte eine felddaugliche Methode entwickelt werden, um wesentliche Erkenntnisse zur Dünendynamik an einer großmaßstäblichen Forschungsdüne zu generieren. Das konzipierte 3D-Messkonzept zum dynamischen Eventmonitoring, bestehend aus TLS und Kamerasystemen, konnte die Düne während eines Hochwassers temporal und räumlich hochauflösend vermessen. Auf Basis der generierten Daten wurde daraufhin eine Deformationsanalyse durchgeführt. Ein wesentlicher Bestandteil der erfolgreichen Messkampagne war die konstruierte Messvorrichtung, die den Umwelteinflüssen standhielt. Zukünftige Forschungen können somit an dieser Methode anknüpfen, um nicht nur die Dynamik von Erosionsprozessen an Dünen und ähnlichen Küstenschutzbauwerken abzuleiten, sondern darüber hinaus durch die Erhebung empirischer Daten, die Modellbildung zu belastbaren Vorhersagen hinsichtlich der Standfestigkeit bzw. Bemessungsdimensionen vorantreiben.

Da im ersten Untersuchungszeitraum die Belastung durch ein Hochwasser, die im Normalfall maßgeblich für die Verformung eines Dünenkörpers verantwortlich ist, ausblieb, wurden die Effekte von Wind und Niederschlag auf das Dünenbauwerk analysiert. Dafür wurde das Küstenbauwerk periodisch durch UAV-Technik befliegen und aus den Bilddaten digitale Geländemodelle erzeugt. Die Auswertungen der Differenzmodelle verdeutlichen, dass primär der Wind für die Dünenerosion verantwortlich und der Niederschlag nur ein sekundärer Einflussfaktor war.

Die Analyse der Monitoring-Daten aus dem zweiten Untersuchungszeitraum zeigt, dass der Dünenkörper von dem eintretenden Hochwasser in der Anfangsphase der Messkampagne stark erodiert wurde. Dies wurde durch die Volumenveränderung des Bauwerks, sowie durch die Analyse der Querprofile an den verschiedenen Bereichen verdeutlicht. Die beiden Breschen, die in einem Abstand von circa zwei Stunden im östlichen Bereich sowie in der Sollbruchstelle entstanden, entwickelten sich, während der Wasserstand und die Wellenhöhe ihren Höhepunkt erreicht hatten. Die Ausbreitung der beiden Breschen unterschied sich voneinander. Die erste Bresche im östlichen Gebiet der Düne entstand, nachdem der Dünenkörper neun Stunden vom Hochwasser sowie durch Sog- und Wellenschlag belastet wurde. Auf einer Breite von 7 m entstanden innerhalb von 35 Minuten drei Breschen, die sich miteinander verbanden. Im Bereich der Sollbruchstelle bildete sich im Gegensatz dazu eine einzelne Bresche, die sich kontinuierlich verbreiterte.

Die Analysen der Bathymetrie des Teiluntersuchungsgebiets verdeutlichten die komplexen morphologischen Prozesse der topographischen Gestalt des Vorstrandes. Über

die untersuchten Monate hinweg war ein deutlicher Sedimenttransport im küstennahen Bereich zu verzeichnen. Die Bathymetriedaten vor und nach der Messkampagne zeigen deutliche Sedimentablagerungen entlang der Küstenlinie.

Um die Geodaten der beiden Untersuchungszeiträume zu verifizieren, ist es nötig, in Zukunft weitere Messkampagnen unter ähnlichen Bedingungen an Vollschutz- und Systemschutzdünen durchzuführen. Darüber hinaus könnten mit der Methode Versuchskörper unterschiedlicher Ausgestaltung miteinander verglichen werden, z.B. mit und ohne Geotextilien, mit und ohne Bewuchs oder mit verschiedenen Korngrößenverteilungen. Weiterhin könnte durch numerische Simulation modelliert werden, welchen Einfluss die Bühnen, die während der Sturmflut größtenteils überflutet waren, auf die Erosion der Düne während der Messkampagne hatten. Dazu wäre es möglich, die Forschungsdüne zu verlängern, sodass sie sich über mehrere Bühnenfelder erstreckt. So könnte anhand der Wellenanlaufichtung der mögliche Einfluss der Bühnenfelder analysiert werden.

Zukünftige Arbeiten können die gewonnenen Daten der Forschungsdüne und der Bathymetrie als Grundlage verwenden, um numerische Modelle zu kalibrieren, die auf Modellregionen angewendet werden können. So können neue Grundlagen für ein integriertes Bemessungskonzept für Dünen und Dünen/Deich-Systeme gewonnen werden.

# Literatur

- Andrews, B. D., P. A. Gares und J. D. Colby (2002). „Techniques for GIS modeling of coastal dunes“. In: *Geomorphology* 48.1-3, S. 289–308. DOI: 10.1016/S0169-555X(02)00186-1.
- Aufleger, M., F. Steinbacher, R. Baran und V. Neisch (2015). Airborne Hydromapping - Hochauflösende Gewässervermessung „wie im Flug“. Hrsg. von 38. Dresdner Wasserbaukolloquium 2015 „Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer“. URL: [https://izw.baw.de/publikationen/dresdner-wasserbauliche-mitteilungen/0/42\\_Heft\\_53\\_Aufleger\\_AirborneHydromapping.pdf](https://izw.baw.de/publikationen/dresdner-wasserbauliche-mitteilungen/0/42_Heft_53_Aufleger_AirborneHydromapping.pdf) (besucht am 11. 10. 2019).
- Bill, R. (2016). *Grundlagen der Geo-Informationssysteme: 6. Auflage*. Berlin: Wichmann. ISBN: 9783879076079.
- Bloemer, S. (2012). Geotextilien zum Erosionsschutz und zur Böschungssicherung: Eine vergleichende Analyse. Hrsg. von Bender GmbH & Co. KG. Düsseldorf. URL: [https://www.bender-rekultivierungen.de/fileadmin/user\\_upload/Bilder/leistungen/ingenieurbiologie/STA\\_06-2012\\_S-362-370.pdf](https://www.bender-rekultivierungen.de/fileadmin/user_upload/Bilder/leistungen/ingenieurbiologie/STA_06-2012_S-362-370.pdf) (besucht am 03. 12. 2019).
- Brasseur, G. P., D. Jacob und S. Schuck-Zöller (2017). *Klimawandel in Deutschland*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-50396-6. DOI: 10.1007/978-3-662-50397-3.
- Bruun, P. (1954). *Coast Erosion and the Development of Beach Profiles: Beach Erosion Board, hrsg. von Technical Memo. No. 44*. Vicksburg. URL: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uiug.30112088627325&view=1up&seq=7> (besucht am 19. 12. 2019).
- BSH (2005). *Sturmfluten in der südlichen Ostsee (westlicher und mittlerer Teil)*. Hrsg. von Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Hamburg. URL: [https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand\\_und\\_Gezeiten/Sturmfluten/sturmfluten\\_node.html](https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/sturmfluten_node.html) (besucht am 23. 11. 2019).
- BSH (2012). *Sturmflutvorhersage für Hamburg: 1962 und heute*. Hrsg. von Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Hamburg. URL: [https://www.bsh.de/DE/DATEN/Wasserstand\\_Nordsee/\\_Anlagen/Downloads/2012\\_1\\_\\_sturmflutvorhersage\\_fuer\\_hamburg.pdf;jsessionid=C3AE16E963C1185A3B47829F5BA93552.live21301?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bsh.de/DE/DATEN/Wasserstand_Nordsee/_Anlagen/Downloads/2012_1__sturmflutvorhersage_fuer_hamburg.pdf;jsessionid=C3AE16E963C1185A3B47829F5BA93552.live21301?__blob=publicationFile&v=3) (besucht am 10. 01. 2020).
- BSH (2019). *Berichte zu Sturmfluten und extremen Wasserständen*. Hrsg. von Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Hamburg. URL: [https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand\\_und\\_Gezeiten/Sturmfluten/sturmfluten\\_node.html](https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/sturmfluten_node.html) (besucht am 23. 11. 2019).
- Bugajny, N., K. Furmańczyk, J. Dudzińska-Nowak und B. Paplińska-Swerpel (2013). „Modelling morphological changes of beach and dune induced by storm on the

- Southern Baltic coast using XBeach (case study: Dziwnow Spit)“. In: *Journal of Coastal Research* 65, S. 672–677. DOI: 10.2112/SI65-114.1.
- Dean, R. G. (1977). *Equilibrium Beach Profiles: US Atlantic and Gulf Coasts*: Ocean Eng. Rep. No. 12. Hrsg. von Dept. of Civil Eng.
- den Heijer, C., J. van de Graaff und P. van Gelder (2008). Probabilistic sensitivity analysis of dune erosion calculations. Hrsg. von The Institute for Catastrophic Loss Reduction. Toronto. URL: [https://d1rkab7tlqy5f1.cloudfront.net/TBM/Over%20faculteit/Afdelingen/Values%2C%20Technology%20and%20Innovation/People/Full%20Professors/Pieter%20van%20Gelder/69\\_denHeijer.pdf](https://d1rkab7tlqy5f1.cloudfront.net/TBM/Over%20faculteit/Afdelingen/Values%2C%20Technology%20and%20Innovation/People/Full%20Professors/Pieter%20van%20Gelder/69_denHeijer.pdf) (besucht am 05. 11. 2019).
- DIN (1994). DIN 4049-3, Oktober 1994. *Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie*.
- Donker, J., M. van Maarseveen und G. Ruessink (2018). „Spatio-Temporal Variations in Foredune Dynamics Determined with Mobile Laser Scanning“. In: *Journal of Marine Science and Engineering* 6.4, S. 126. DOI: 10.3390/jmse6040126.
- EurOtop (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures: An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. URL: [http://www.overtopping-manual.com/assets/downloads/EurOtop\\_II\\_2018\\_Final\\_version.pdf](http://www.overtopping-manual.com/assets/downloads/EurOtop_II_2018_Final_version.pdf) (besucht am 26. 09. 2019).
- Farneböck, G. (2003). „Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion“. In: *Image Analysis*. Hrsg. von Josef Bigun und Tomas Gustavsson. Bd. 2749. *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin und Heidelberg: Springer, S. 363–370. ISBN: 978-3-540-40601-3. DOI: 10.1007/3-540-45103-X{\textunderscore}50.
- FARO (2016). *FARO Laser Scanner FOCUS 3D X 130 HDR: Bedienungsanleitung*. Lake Mary. URL: <https://faro.app.box.com/s/l9fxphdn0h3cdp8a9f41cvm3hphvgee4/file/66024739417> (besucht am 11. 01. 2020).
- Foppe, K., Hrsg. (2005). *Terrestrisches Laserscanning: (TLS) ; ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft ; Beiträge zum 65. DVW-Seminar am 21. und 22. November 2005 in Fulda*. Bd. 48. *Schriftenreihe des DVW*. Augsburg: Wißner. ISBN: 9783896395115.
- Galvin, B., B. McCane, K. Novins, D. Mason und S. Mills (1998). „Recovering Motion Fields: An Evaluation of Eight Optical Flow Algorithms“. In: *Proceedings of the Ninth British Machine Vision Conference*. Hrsg. von Paul H. Lewis und Mark S. Nixon. Southampton: British Machine Vision Association, S. 20.1–20.10. ISBN: 1-901725-04-9. DOI: 10.5244/C.12.20.
- GeoSeaPortal (2019). *Das Geodatenportal des BSH*. Hrsg. von Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Hamburg. URL: <https://www.geoseaportal.de/mapapps/resources/apps/bathymetrie/index.html?lang=de> (besucht am 14. 11. 2019).
- Göpfert, J. (2006). „Assessment of LiDAR DTM accuracy in coastal vegetated areas“. In: *International archives of photogrammetry and remote sensing* 36.part 3. ISSN: 0256-1840. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/8caa/a580a256082c6d2db49b66607dc20b20e5da.pdf>.

- Grenzdörffer, G. (2016). Unbemannte Flugroboter – aktuelle technologische Entwicklungen und die wichtigsten rechtlichen Rahmenbedingungen: In: UAV 2016 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen Edition: Schriftenreihe des DVW - Band 82.
- Grenzdörffer, G. und F. Beyer (2018). Machbarkeitsstudie zur fernerkundlichen Erfassung der Vegetationsstruktur für eine Quantifizierung von Ökosystemleistungen durch Marschpflanzen. DOI: 10.5675/tibass2018{\textunderscore}ErfassungPflanzeigenschaftenFernerkundung.
- Grinsted, A., J. C. Moore und S. Jevrejeva (2010). „Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 ad“. In: *Climate Dynamics* 34.4, S. 461–472. DOI: 10.1007/s00382-008-0507-2.
- Haring, A. (2003). Modellierung terrestrischer Laserscanner-Daten. Wien. URL: [http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_119396.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_119396.pdf) (besucht am 12.12.2019).
- Heimerl, S. und B. Kohler (2015). Einsatz eines Sedimentecholots für eine Bathymetrie einschließlich Sedimentkartierung. Dresden. URL: [https://henry.baw.de/bitstream/handle/20.500.11970/103396/38\\_Heft\\_53\\_Heimerl\\_EinsatzSedimentecholot.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://henry.baw.de/bitstream/handle/20.500.11970/103396/38_Heft_53_Heimerl_EinsatzSedimentecholot.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (besucht am 19.12.2019).
- Hofstede, J., T. Buss, J.-P. Eckhold, A. Mohr, B. Jäger, T. Strotmann, F. Thorenz und N. Liebermann von, Hrsg. (2009). Küstenschutzstrategien: Bericht einer FAK-Arbeitsgruppe: Die Küste. Karlsruhe: Bundesanst. für Wasserbau (BAW). ISBN: 9783804210677.
- IPCC (2019). IPCC Press Release: Choices made now are critical for the future of our ocean and cryosphere. Hrsg. von Intergovernmental Panel on Climate Change. Monaco. URL: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/09/SROCC\\_PressRelease\\_EN.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/09/SROCC_PressRelease_EN.pdf) (besucht am 26.09.2019).
- Jeschke, L., Hrsg. (2003). Die Naturschutzgebiete in Mecklenburg-Vorpommern: Mit 287 Gebietsbeschreibungen, 7 Tabellen. Schwerin: Demmler. ISBN: 3910150527.
- Jiménez, J. A., A. H. Sallenger und L. Fauver (2007). Sediment transport and barrier island changes during massive overwash events. Hrsg. von Proceedings of the 30th International Conference Coastal Engineering. San Diego. DOI: 10.1142/9789812709554{\textunderscore}0242. URL: [https://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/9789812709554\\_0242](https://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/9789812709554_0242).
- Kaehler, C. (2018). Vortrag Kurzvorstellung Versuchsdüne. Hrsg. von Universität Rostock. Rostock.
- Koldrack, N. (2017). Schnitt und Frontansicht der Kammeraabdeckung. Hrsg. von Koldrack Nils. E-Mail.
- Koldrack, N., F. Vettermann und R. Bill (2019a). Modernes Geodatenmanagement in der Forschung. Hrsg. von GITO Verlag 2017. Berlin. URL: [http://www.geomv.de/wp-content/uploads/2017/04/978-3-95545-208-7\\_TB\\_GeoForum-2017\\_ebook.pdf](http://www.geomv.de/wp-content/uploads/2017/04/978-3-95545-208-7_TB_GeoForum-2017_ebook.pdf) (besucht am 12.11.2019).
- Koldrack, N., P. Postert und R. Bill (2019b). „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". In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten. Bd. 126. VDE Verlag GmbH Berlin, S. 104–111.
- Koppe, B. (2002). Hochwasserschutzmanagement an der deutschen Ostsee. Hrsg. von Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Rostock. Rostock. URL: <https://aquadot.de/download/diss-koppe.pdf> (besucht am 05. 12. 2019).
- Kraft, S. S. (2017). „Untersuchung von Wasserbewegungen bei Dünenerosion und Dünenbruch mittels optischen Flusses“. Masterarbeit. Rostock: Universität Rostock.
- Kramer, J. und H. Rohde, Hrsg. (1992). Historischer Küstenschutz: Deichbau, Insel-schutz u. Binnenentwässerung an Nord- u. Ostsee. Stuttgart: Wittwer. ISBN: 3-87919-163-8.
- Kriebel, D. L. (1994). Users Manual for Dune Erosion Model: EDUNE. Hrsg. von U.S. Naval Academy. Annapolis. URL: <https://cpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.udel.edu/dist/0/7241/files/2018/03/CACR-95-05-1jg3asu.pdf> (besucht am 14. 01. 2020).
- Łabuz, T. A. (2016). „A review of field methods to survey coastal dunes—experience based on research from South Baltic coast“. In: Journal of Coastal Conservation 20.2, S. 175–190. DOI: 10.1007/s11852-016-0428-x.
- Leica (2012). Leica Viva GNSS GS08plus receiver: Datasheet. Hrsg. von Leica Geosystems. Heerbrugg. URL: <http://www.surveyequipment.com/PDFs/leica-viva-gs08-plus-datasheet.pdf> (besucht am 27. 09. 2019).
- Leica (2015). Leica TPS1200 Series: Technical Data. Hrsg. von Leica Geosystems. URL: [https://osdc.ca/wp-content/uploads/2015/07/TPS1200\\_Technical\\_Data.pdf](https://osdc.ca/wp-content/uploads/2015/07/TPS1200_Technical_Data.pdf) (besucht am 26. 09. 2019).
- Mai, S., C. Paesler und C. Zimmermann (2004). Wellen und Seegang an Küsten und Küstenbauwerken: mit Seegangsatlas der Deutschen Nordseeküste. Hrsg. von Lehrstuhl für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Franzius-Institut, Universität Hannover. URL: [http://www.dr-smai.de/Literatur/Geb-4/80\\_fiheft\\_90a\\_mai\\_cpa\\_zi.pdf](http://www.dr-smai.de/Literatur/Geb-4/80_fiheft_90a_mai_cpa_zi.pdf) (besucht am 17. 09. 2019).
- Mandlbürger, G., M. Pfennigbauer, R. Schwarz, A. Haring, M. Wieser und L. Winiwarter (2017). Gewässervermessung vom UAV. Hrsg. von Herbert Wichmann Verlag, VDE VERLAG GMBH, Berlin/Offenbach. URL: [https://www.uibk.ac.at/geometrie-vermessung/gruppe\\_vermessung\\_und\\_geoinformation/geodaetische\\_wochen/obergurgl\\_2017/programm\\_vorlaeufig/papers/vo-mandlbuerger.pdf](https://www.uibk.ac.at/geometrie-vermessung/gruppe_vermessung_und_geoinformation/geodaetische_wochen/obergurgl_2017/programm_vorlaeufig/papers/vo-mandlbuerger.pdf) (besucht am 14. 10. 2019).
- Mayer, L., M. Jakobsson, G. Allen, B. Dorschel, R. Falconer, V. Ferrini, G. Lamarche, H. Snaith und P. Weatherall (2018). „The Nippon Foundation—GEBCO Seabed 2030 Project: The Quest to See the World’s Oceans Completely Mapped by 2030“. In: Geosciences 8.2, S. 63. DOI: 10.3390/geosciences8020063.
- MBLU (1993). Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg- Vorpommern. Hrsg. von Ministerium für Bau, Landesentwicklung. URL: <http://www.stalu-mv.de/serviceassistent/download?id=111970> (besucht am 01. 08. 2019).
- Mettenleiter, M., F. Hartleb, S. Kresser und C. Fröhlich (2015). Laserscanning: Phasenbasierte Lasermesstechnik für die hochpräzise und schnelle dreidimensionale



- Umgebungserfassung. Bd. Band 371. Die Bibliothek der Technik. München: Verlag Moderne Industrie. ISBN: 3862360776.
- Naumann, M., R. Bill, F. Niemeyer und E. Nitschke (2014a). Deformation Analysis of Dikes using Unmanned Aerial Systems (UAS). Hrsg. von DedgDikes. URL: [http://www.dredgdikes.eu/wp-content/uploads/13\\_Naumann\\_WEB.pdf](http://www.dredgdikes.eu/wp-content/uploads/13_Naumann_WEB.pdf) (besucht am 07.08.2019).
- Naumann, M., R. Bill und F. Niemeyer (2014b). „Generierung digitaler Geländeoberflächen mittels Bilddaten von unbemannten Flugsystemen zum Monitoring von Küstenschutzbauwerken“. In: GIS. science : die Zeitschrift für Geoinformatik. Bd. 27. VDE Verlag GmbH Berlin, S. 30–37.
- Newe, J. (2013). Neubemessung der Landesküstenschutzdünen Mecklenburg-Vorpommerns: Abschlussbericht zum Vertrag 6-1-12. Braunschweig. (Besucht am 03.10.2019).
- Niemeier, W. und F. Kern (2001). „Anwendungspotentiale von scannenden Meßverfahren“. In: Von Handaufmaß bis High Tech. Hrsg. von U. Weferling, K. Heine und U. Wulf. Mainz: Verlag Philipp von Zabern, 134–140 u. Anhang VII.
- OSM (2019). OpenStreetMap: Deutschland. Hrsg. von FOSSGIS e.V. Kirchzarten. URL: <https://www.openstreetmap.de/> (besucht am 03.12.2019).
- Ostsee-Zeitung (2019). Bundesregierung: Extreme Sturmflut gefährdet Millionen Menschen. Rostock. URL: <https://www.ostsee-zeitung.de/Nachrichten/MV-aktuell/Bundesregierung-Extreme-Sturmflut-gefaehrdet-Millionen-Menschen> (besucht am 28.10.2019).
- Otepka, J., S. Ghuffar, C. Waldhauser, R. Hochreiter und N. Pfeifer (2013). „Georeferenced Point Clouds: A Survey of Features and Point Cloud Management“. In: ISPRS International Journal of Geo-Information 2.4, S. 1038–1065. DOI: 10.3390/ijgi2041038.
- Pacheco, A., J. Horta, C. Loureiro und Ó. Ferreira (2015). „Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat 8 images: A tool for coastal monitoring in shallow waters“. In: Remote Sensing of Environment 159, S. 102–116. ISSN: 00344257.
- PADO (2019a). Flächenhafte Entwicklung der Forschungsdüne. Hrsg. von Universität Rostock. Rostock. URL: [https://www.pado.uni-rostock.de/storages/uni-rostock/Alle\\_AUF/PADO/Video\\_Oben.webm](https://www.pado.uni-rostock.de/storages/uni-rostock/Alle_AUF/PADO/Video_Oben.webm) (besucht am 18.11.2019).
- PADO (2019b). PADO-Datenportal. Hrsg. von Universität Rostock. Rostock. URL: <https://datenportal.pado-projekt.de/> (besucht am 14.11.2019).
- PADO (2019c). Prozesse und Auswirkungen von Dünendurchbrüchen an der deutschen Ostseeküste. Hrsg. von Universität Rostock. Rostock. URL: <https://www.pado.uni-rostock.de/> (besucht am 14.11.2019).
- PADO (2019d). Video der Bresche in der Sollbruchstelle. Hrsg. von Universität Rostock. Rostock. URL: [https://www.pado.uni-rostock.de/storages/uni-rostock/Alle\\_AUF/PADO/Video\\_Bresche.webm](https://www.pado.uni-rostock.de/storages/uni-rostock/Alle_AUF/PADO/Video_Bresche.webm) (besucht am 18.11.2019).
- Resnik, B. und R. Bill (2018). Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich. 4., neu bearb. und erw. Aufl. Heidelberg: Wichmann. ISBN: 978-3-87907-650-5.
- Richter, A., D. Faust und H.-G. Maas (2013). „Dune cliff erosion and beach width change at the northern and southern spits of Sylt detected with multi-temporal Lidar“. In: CATENA 103, S. 103–111. DOI: 10.1016/j.catena.2011.02.007.

- Roelvink, D., A. Reniers, A. van Dongeren, J. van Thiel de Vries, R. McCall und J. Lescinski (2009). „Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands“. In: *Coastal Engineering* 56.11-12, S. 1133–1152. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2009.08.006.
- Saathoff, F. (2016). *Processes and Implications of Dune Breaching at the German Baltic Sea Coast, Lead application in response of the 2nd BMBF call*. Hrsg. von Universität Rostock. Rostock.
- Saathoff, F. und C. Kaehler (2018). *Zwischenbericht Forschungsvorhaben PADO: Prozesse und Auswirkungen von Dünendurchbrüchen an der deutschen Ostseeküste*. Hrsg. von Universität Rostock. Rostock.
- Saathoff, F., C. Kaehler und S. Fürst (2019). *Zwischenbericht Forschungsvorhaben PADO: Prozesse und Auswirkungen von Dünendurchbrüchen an der deutschen Ostseeküste*. Hrsg. von Universität Rostock. Rostock.
- Schweiger, C., N. Koldrack, C. Kaehler und H. Schüttrumpf (2020a). „Influence of nearshore bathymetry changes on the numerical modelling of dune erosion“. In: *Journal of Coastal Research; Coastal Education & Research Foundation* (akzeptiert).
- Schweiger, C., N. Koldrack, C. Kaehler und H. Schüttrumpf (2020b). „Numerical studies of dune breaching due to the hydrodynamic impact of storm surges based on large-scale field research dune“. In: *Proceedings of the Fifth International Conference in Ocean Engineering (ICOE)*. (akzeptiert).
- SonTek (2015). *RiverSurveyor: Discharge, bathymetry and current profiling*. San Diego. URL: <https://www.sontek.com/media/pdfs/riversurveyor-s5-m9-brochure.pdf> (besucht am 27.09.2019).
- Spektrum (2020). *Lexikon der Kartographie und Geomatik*. Hrsg. von Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Heidelberg. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/kartographie-geomatik/> (besucht am 09.01.2020).
- StALU (2009). *Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern: Vermessungsrichtlinie und digitale Datenformate*. Hrsg. von Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern. Rostock. (Besucht am 01.07.2019).
- StALU MM (2018). *Das Interne Messnetz Küste (IMK)*. Hrsg. von Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt. Rostock. URL: <http://www.stalu-mv.de/serviceassistent/download?id=112103> (besucht am 01.07.2019).
- Sztobryn, M. et al. (2005). *Sturmfluten in der südlichen Ostsee (westlicher und mittlerer Teil)*. Hrsg. von Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie. URL: [https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/\\_Anlagen/Downloads/Meer\\_und\\_Umwelt/Berichte-des-BSH/Berichte-des-BSH-39-deutsch.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/_Anlagen/Downloads/Meer_und_Umwelt/Berichte-des-BSH/Berichte-des-BSH-39-deutsch.pdf?__blob=publicationFile&v=7) (besucht am 05.06.2019).
- Thompson, D. M., N. G. Plant und M. E. Hansen (2015). *Analysis of bathymetric surveys to identify coastal vulnerabilities at Cape Canaveral, Florida*. Reston, VA. URL: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20151180> (besucht am 27.03.2019).
- Tiepol, L. (2018). *Das interne Messnetz Küste (IMK)*. Hrsg. von Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg. URL: <http://www.stalu-mv.de/serviceassistent/download?id=112103> (besucht am 04.06.2019).

- Tschirschwitz, F., K. Mechelke, H. Jansch, K. Uliczka und T. Kersten (2016). Ein automatisches Monitoringsystem für Buhnen an der Elbe durch terrestrisches Laserscanning. Hrsg. von Wißner-Verlag GmbH. Augsburg. URL: [https://geodaesie.info/zfv/heftbeitrag/5835/zfv\\_2016\\_5\\_Tschirschwitz\\_et-al.pdf](https://geodaesie.info/zfv/heftbeitrag/5835/zfv_2016_5_Tschirschwitz_et-al.pdf) (besucht am 16.08.2019).
- van de Graaff, J., M.R.A. van Gent, M. Boers, F.L.M. Diermanse, D. J. Walstra und H. J. Steetzel (2007). Technisch rapport Duinafslag. Hrsg. von D. W.W. Rijkswaterstaat. URL: [https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/144720/tr30\\_technischrapportduinafslag.pdf](https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/144720/tr30_technischrapportduinafslag.pdf) (besucht am 05.11.2019).
- van Rijn, Leo C. (2009). „Prediction of dune erosion due to storms“. In: Coastal Engineering 56.4, S. 441–457. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2008.10.006.
- WetterKontor (2019). Wetterrückblick Rostock-Warnemünde (Ostseebad). Hrsg. von WetterKontor GmbH. URL: <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/rueckblick.asp?id=147&datum=07.06.2018&t=4> (besucht am 15.11.2019).
- WSV (2019). Gewässerkundliches Informationssystem. Hrsg. von Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. URL: <https://www.pegelonline.wsv.de/gast/impressum> (besucht am 18.11.2019).
- Wunderlich, T., P. Wasmeier, J. Ohlmann-Lauber, T. Schäfer und F. Reidl (2013). Objektivierung von Spezifikationen Terrestrischer Laserscanner: Ein Beitrag des Geodätischen Prüflabors der Technischen Universität München. München. URL: <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1188634/document.pdf> (besucht am 09.10.2019).
- Zurhorst, A. und M. Zurhorst (2015). „Einsatz UAV-basierter Photogrammetrie für Liegenschaftsvermessung“. In: Hanke, K. & Weinold, T. (Hrsg.): 18. Internationale Geodätische Woche Obergurgl. VDE Verlag GmbH Berlin, S. 239–249.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Gleichgewichtsprofil nach Bruun (1954) bzw. Dean (1977) . . . . .	7
1.2	Schema eines Regelprofils einer Vollschuttdüne . . . . .	8
2.1	Interessengebiete in PADO . . . . .	11
2.2	Standort des Untersuchungsgebiets Warnemünde . . . . .	12
2.3	Untersuchungsgebiet der Bathymetrie in Warnemünde . . . . .	13
2.4	Maximale jährliche Wasserstände von 1954 bis 2019 am Wasserspiegel Warnemünde . . . . .	15
2.5	Empirische Eintrittswahrscheinlichkeiten für die mittleren 50% aller maximalen jährlichen Ereignisse . . . . .	15
2.6	Orthofoto der ersten Versuchsdüne . . . . .	17
2.7	Querschnitt der ersten Versuchsdüne . . . . .	17
2.8	Analyse der Küstenlinie für die Monate Juli 2018 bis Oktober 2018 . . . .	18
2.9	Querschnitt der zweiten Versuchsdüne . . . . .	19
2.10	Orthofoto der zweiten Versuchsdüne . . . . .	19
2.11	Metadatensatz in der Forschungsdateninfrastruktur . . . . .	20
3.1	Schematischer Aufbau des Messsystems . . . . .	23
3.2	Messtafel mit Schachbrettmuster . . . . .	24
3.3	Funktionsprinzip eines TLS . . . . .	25
3.4	Differenz der Messungen zwischen Ruhe- und Schwingungszustand . . . .	27
3.5	Kalibrierstand der Professur für Geodäsie und Geoinformatik . . . . .	28
3.6	Installation der Messtechnik am geklappten Messpfahl . . . . .	32
3.7	Aufbau der Messtechnik während der Sturmflut . . . . .	33
3.8	Aufgerichteter Messpfahl ohne seitliche Abspannung und ohne Mess- vorrichtung . . . . .	34
3.9	FARO Focus3D X130 . . . . .	35
3.10	Modell der gedruckten TLS-Schutzhülle . . . . .	36
3.11	Messvorrichtung, Weithalsfass mit eingesetzter TLS-Schutzhülle . . . . .	36
4.1	Gleichmäßiges Gitter zur visuellen Auswertung . . . . .	41
4.2	GIS-Workflow . . . . .	42
4.3	Workflow des optischen Flusses . . . . .	43
4.4	Sonarfahrt und GNSS-Punkte vom September 2017 im Teiluntersu- chungsgebiet . . . . .	44
5.1	Verlauf der Wasserstände und hierdurch induzierte Belastungen der Versuchsdüne in der Saison 2017/18 . . . . .	45
5.2	Initial-Geländehöhenmodell des Teiluntersuchungsgebiets . . . . .	46

5.3	Differenzmodell des Untersuchungsgebiets, zwischen 15. Dezember 2017 und 12. Januar 2018 . . . . .	46
5.4	Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit, 15. Dezember 2017 bis 12. Januar 2018 . . . . .	47
5.5	Differenzmodell des Untersuchungsgebiets, zwischen 12. Januar 2018 und 7. Februar 2018 . . . . .	48
5.6	Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit, zwischen 12. Januar 2018 und 7. Februar 2018 . . . . .	49
5.7	Differenzmodell des Untersuchungsgebiets, zwischen 07. Februar 2018 und 14. März 2018 . . . . .	50
5.8	Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit, zwischen 07. Februar 2018 und 14. März 2018 . . . . .	50
5.9	Differenzmodell des Untersuchungsgebiets, zwischen 14. März 2018 und 21. März 2018 . . . . .	51
5.10	Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit, zwischen 14. März 2018 und 21. März 2018 . . . . .	51
5.11	Differenzmodell des Untersuchungsgebiets, zwischen 15. Dezember 2017 und 21. März 2018 . . . . .	52
5.12	Kumulierte Stunden der Windhäufigkeit, 15. Dezember 2017 bis 21. März 2018 . . . . .	53
5.13	Wasserstandsganglinien während der Sturmflut vom 18. bis 19.11.2018 . . . . .	54
5.14	Verlauf der Wellenhöhe und -anlaufrihtung während der Sturmflut . . . . .	55
5.15	Windgeschwindigkeit und -richtung während der Messkampagne . . . . .	56
5.16	Wellenperiodendauer während der Messkampagne auf Basis der Messbojendaten . . . . .	56
5.17	Positionen der gemessenen Dünenquerprofile . . . . .	57
5.18	Querprofil Ost-Mitte in Normalhöhe . . . . .	58
5.19	Querprofil Ost-Ost in Normalhöhe . . . . .	58
5.20	Querprofil Ost-West in Normalhöhe . . . . .	59
5.21	Flächenhafte Entwicklung der Bresche im Osten der Düne . . . . .	59
5.22	Entwicklung der Breschen im Osten der Düne . . . . .	60
5.23	Entwicklung der Breschenbreite im Osten der Düne . . . . .	60
5.24	Längsprofile im Osten der Düne . . . . .	61
5.25	Querprofil Ost vor und nach der Sturmflut . . . . .	62
5.26	Querprofil Mitte-Mitte . . . . .	63
5.27	Querprofil Mitte-Ost . . . . .	63
5.28	Querprofil Mitte-West . . . . .	64
5.29	Flächenhafte Entwicklung der Bresche in der Mitte der Düne . . . . .	64
5.30	Entwicklung der Bresche an der Sollbruchstelle . . . . .	65
5.31	Entwicklung der Breschenbreite in der Sollbruchstelle . . . . .	65
5.32	Querprofil Mitte-Mitte vor und nach der Sturmflut . . . . .	66
5.33	Querprofil West-Mitte . . . . .	67
5.34	Querprofil West-Ost in Normalhöhe . . . . .	67
5.35	Querprofil West-West . . . . .	68
5.36	Querprofil West-Mitte vor und nach der Sturmflut . . . . .	68
5.37	Volumenveränderung der Versuchsdüne während der Messkampagne . . . . .	69

5.38	Höhendifferenz zwischen dem 16.11. und 19.11.2019 . . . . .	70
5.39	Orthofoto der zweiten Versuchsdüne nach der Sturmflut . . . . .	70
5.40	Darstellung der Wellenbewegung in der östlichen Bresche, auf Basis des optischen Flusses . . . . .	71
5.41	Einordnung der ausgewerteten Videoausschnitte in Bezug auf den Wasserspiegel . . . . .	72
5.42	Wellenperiodendauer auf Basis der Kameradatenauswertung zwischen 16:00 und 17:00 Uhr . . . . .	72
5.43	Wellenperiodendauer auf Basis der Kameradatenauswertung zwischen 00:00 und 01:00 Uhr . . . . .	73
5.44	Wellenaufbauhöhe im Bereich der Sollbruchstelle, auf Basis der visuellen Auswertung zwischen 16:00 und 17:00 Uhr . . . . .	73
5.45	Wellenaufbauhöhe im Bereich der Sollbruchstelle, auf Basis der visuellen Auswertung zwischen 0:00 und 01:00 Uhr. . . . .	74
5.46	Wassertiefe und Tiefenveränderungen des Untersuchungsgebiets von Juli bis Oktober 2017 . . . . .	76
5.47	Minimale und maximale Wassertiefen des Meeresbodens 2017 . . . . .	77
5.48	Wassertiefe und Tiefenveränderungen des Untersuchungsgebiets von Mai bis August 2018 . . . . .	79
5.49	Wassertiefe und Tiefenveränderungen des Untersuchungsgebiets von September bis November 2018 . . . . .	80
5.50	Minimale und maximale Wassertiefen des Meeresbodens 2018 . . . . .	81
5.51	Wassertiefe und Tiefenveränderungen des Untersuchungsgebiets vor und nach der Sturmflut . . . . .	82
6.1	Abschattungsbereiche durch Wellenaufbau . . . . .	85
6.2	Referenzierungsfehler der einzelnen Scans . . . . .	87
6.3	Dichte der Punktwolke der Versuchsdüne . . . . .	88
6.4	Gemessener Winkel des Neigungssensors je Scan . . . . .	88
6.5	Betongewichte nach der Sturmflut . . . . .	88
6.6	Körnungslinien der drei Entnahmestellen im Teiluntersuchungsgebiet . . . . .	89
6.7	Vergleich der Messdaten mit den Gleichgewichtsprofilen . . . . .	90
A.1	Betongewichte zur seitlichen Abspannung . . . . .	104
A.2	Forschungsdüne zum Beginn der Messkampagne . . . . .	105
A.3	Forschungsdüne während der Messkampagne . . . . .	105
A.4	Bresche im östlichen Bereich der Düne . . . . .	106
A.5	Sollbruchstelle während der Messkampagne . . . . .	106
A.6	Erodierte Sollbruchstelle . . . . .	107
A.7	Messpfahl nach der Messkampagne . . . . .	107

# Tabellenverzeichnis

2.1	Monatliche Häufigkeitsverteilung der Hochwasserereignisse von 1855 bis 2017 . . . . .	16
2.2	Maximale Geländeänderungen in Lage und Höhe an den jeweiligen Bühnenreihen innerhalb der untersuchten Monate. . . . .	18
2.3	Übersicht über die verfügbaren Umweltdaten nach Saathoff et al. (2019). . . . .	20
3.1	Technische Daten des FARO Focus3D X 130 . . . . .	26
3.2	Kalibrierungsparameter für die GoPro Hero3+ . . . . .	29
3.3	Kalibrierungsparameter für die GoPro Hero4 . . . . .	29
3.4	Angaben zur Messpfahl-Konstruktion nach Saathoff und Kaehler (2018). . . . .	33
4.1	Übersicht der UAV-Flüge während der Projektzeit. . . . .	39
4.2	Scaneigenschaften des TLS während der Messkampagne. . . . .	40
4.3	Übersicht der Bathymetrie während der Projektzeit. . . . .	43

## Anhang A

# Anhang



ABBILDUNG A.1: Betongewichte zur seitlichen Abspannung (Foto: Christian Kaehler).





ABBILDUNG A.2: Forschungsdüne zum Beginn der Messkampagne (Foto: Christian Kaehler).



ABBILDUNG A.3: Forschungsdüne während der Messkampagne (Foto: Christian Kaehler).



ABBILDUNG A.4: Bresche im östlichen Bereich der Düne (Foto: Christian Kaehler).



ABBILDUNG A.5: Sollbruchstelle während der Messkampagne (Foto: Christian Kaehler).



ABBILDUNG A.6: Erodierte Sollbruchstelle (Foto: Christian Kaehler).



ABBILDUNG A.7: Messpfahl nach der Messkampagne.

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich durch eigenhändige Unterschrift, die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben. Die aus den Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Dissertation ist in dieser Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

Rostock, den 04.02.2020

.....