

KFKI-Projekt DÜNEROS [03KIS063]

Schlussbericht

NLWKN, Forschungsstelle Küste

R. Kaiser, H.D. Niemeyer, H. Dirks und M. Witting

12. November 2008

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
1 Einleitung	7
1.1 Veranlassung und Problemstellung	7
1.2 Das Untersuchungsgebiet	9
2 Stand der Forschung	11
3 Aufbau der Messketten	15
3.1 Überblick	15
3.2 Messfeld Norderney	16
3.2.1 Topographie	16
3.2.2 Hydrographische Messeinrichtungen	17
3.3 Messfeld Langeoog	22
4 Ergebnisse der Messungen	23
4.1 Topographie	23
4.1.1 Überblick	23
4.1.2 Erosionsbereich Insel Norderney	25
4.1.3 Erosionsbereich Insel Langeoog	25
4.2 Hydrodynamik	27
4.2.1 Sturmflut Tilo	27
4.2.2 Position Düneros4 / MW-Linie	27
4.2.3 Datenfilter für die Log-A-Level-Geräte	30
5 Bewertung der Messkonfiguration	33
5.1 Konfiguration während der Pilotphase	33
5.2 Empfehlungen zu den eingesetzten Messverfahren	36
5.2.1 Vermessung	36
5.2.2 ADCP-online	36
5.2.3 AWAC-Systeme	36
5.2.4 Log-A-level-System	37
6 Zusammenfassung	39
7 Literaturverzeichnis	41

Abbildungsverzeichnis

1.1	Lage der Messfelder für das Forschungsvorhaben Düneros auf den Inseln Norderney und Langeoog	8
1.2	Stau der Sturmfluten der letzten Jahre, mit Einordnung der Sturmfluten nach DIN 4049. Die für das Projekt wesentliche Sturmflut vom 8. November 2007 ist in rot dargestellt.	9
1.3	Seegang (signifikante Wellenhöhe, Energieperiode und zugehörige Richtungen) im Seegebiet vor Norderney — 40-jährige Zeitreihe	10
2.1	Ansatz zur Berechnung des Gleichgewichtsprofils (Edelman 1969)	12
3.1	Lage des Messfeldes Norderney	16
3.2	ADCP Modell Workhorse Rio Grande (600 kHz), (RD Instruments)	17
3.3	ADCP beim Auslegen auf der MS Burchana	17
3.4	Kommunikationsboje des ADCP	18
3.5	Prinzip der Bojenverankerung	18
3.6	Ausbringen des AWAC	19
3.7	Lage der hydrographischen Messeinrichtungen des Projektes; Wassertiefen bezogen auf NN	20
3.8	Log-A-Level-Sensoren an Position Düneros4	21
3.9	Höhenlage der Messpfähle der Log-A-Level-Systeme	21
3.10	Lage des Messfeldes Norderney	22
4.1	Messfeld Norderney, Profil 215	23
4.2	Messfeld Norderney, Profil 215 – Ergebnisse der Linienlotung im Vorstrandbereich	25
4.3	Messfeld Langeoog, Profil 37	26
4.4	Messfeld Langeoog, Profil 38	26
4.5	Verlauf des Wasserstands am Pegel Norderney vom 8./9.11.2007	27
4.6	Standbilder des Videofilms mit dem Pfahl an Düneros4 / Messaufzeichnung der fotografierten Wellen	28
4.7	Wasserstandsverlauf an Position Düneros4 / MW-Linie	29
4.8	Verlauf von Wellenhöhe H_s , mittlerer Wellenperiode T_m und der Wassertiefe an Position Düneros4	29
4.9	Rohdaten der Messposition MW-Linie/Düneros4 von 4:45 Uhr -10:45 Uhr	30
4.10	Beispiel für Rohdaten und gefilterte Daten des Log-A-Level-Systems an Düneros4	31
5.1	Gestell für die ADCPs an den Standorten Düneros Pos. 2 und Pos. 3, hier noch ohne die Betonauffüllung im unteren Ring	33

5.2	Einsatz von Tauchern und Side-Scan-Sonar unter Mithilfe der DLRG am Profil Norderney	34
5.3	Leichte Schrägstellung des Messpfahls nach der Sturmflut. (Aufnahmedatum/-uhrzeit: 2007:11:16 10:57:08)	35

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Veranlassung und Problemstellung

Für verschiedene Fragestellungen im Küsteningenieurwesen (u.a. für die Verifizierung von Modellen, die für die Bemessung von Küstenschutzbauwerken genutzt werden, sowie vertiefend für Forschung auf den Gebieten der Bemessung auf wahrscheinlichkeitstheoretischer Grundlage oder morphodynamische Modellierung) wird von der Forschungsstelle Küste des NLWKN eine breite Datengrundlage von Seegangsmessungen im küstennahen Bereichen insbesondere im Bereich des Norderneyer Seegats und seines Küstenvorfelds erhoben. Diese Messungen sollen in Zukunft für den Bereich des Vorstrandes und Strandes der Insel Norderney so erweitert werden, dass die gewonnenen Daten auch für die Kalibrierung und Verifikation einer neuen Generation von Dünenerosionsmodellen, die auf Grund ihrer dynamischen Berechnung der Dünenerosion instationäre Randbedingungen benötigen, genutzt werden können. Um für diesen Zweck eine geeignete Messinfrastruktur aufzubauen, wurde beim BMBF über das KFKI die Förderung einer Pilotstudie beantragt, über die vertiefte Erkenntnisse für eine später zu errichtende permanente Messkette gewonnen werden sollten.

Am Festland der deutschen Nordseeküste besteht nur an wenigen Stellen wie bei Dangast in der Friesischen Wehde, an der nordöstlichen Wurster Küste oder bei St. Peter-Ording in Dithmarschen ein natürlicher Sturmflutschutz durch Kliffs oder Dünen, die alle pleistozänen Ursprungs sind. Auf den Ostfriesischen Dünen- und einigen der Nordfriesischen Geestkerninseln besteht hingegen ein überwiegend natürlicher Sturmflutschutz durch holozäne Dünen. Insbesondere auf den Ostfriesischen Inseln sowie auf Sylt und Amrum werden wesentliche Siedlungsbereiche und -insbesondere auf den Fremdenverkehr ausgerichtete- Infrastrukturen durch Dünen geschützt. Sie stellen hier sowohl den Schutz für Leib und Leben als auch für Einrichtungen dar, die der Wertschöpfung dienen. Auch an der deutschen Ostseeküste wird die Sicherheit gegen Sturmfluten für erhebliche Gebiete durch Dünen gewährleistet.

Bisher erfolgt -von Ausnahmen abgesehen- die Prüfung der Sturmflutsicherheit nach empirischen Gesichtspunkten, die sich in der Regel an Erfahrungen über Erosion bei Sturmfluten orientieren. Angesichts der Bedeutung des Sturmflutschutzes durch Dünen für die Sicherheit einer großen Zahl von Menschen und erheblicher Werte, aber auch wegen des Erfordernisses, die verfügbaren Mittel für den Insel- und Küstenschutz optimal einzusetzen, ist dieser Zustand als äußerst unbefriedigend anzusehen. Von daher sind bereits vor längerer Zeit im deutschen Küsteningenieurwesen Ansätze zur Modifikation und An-

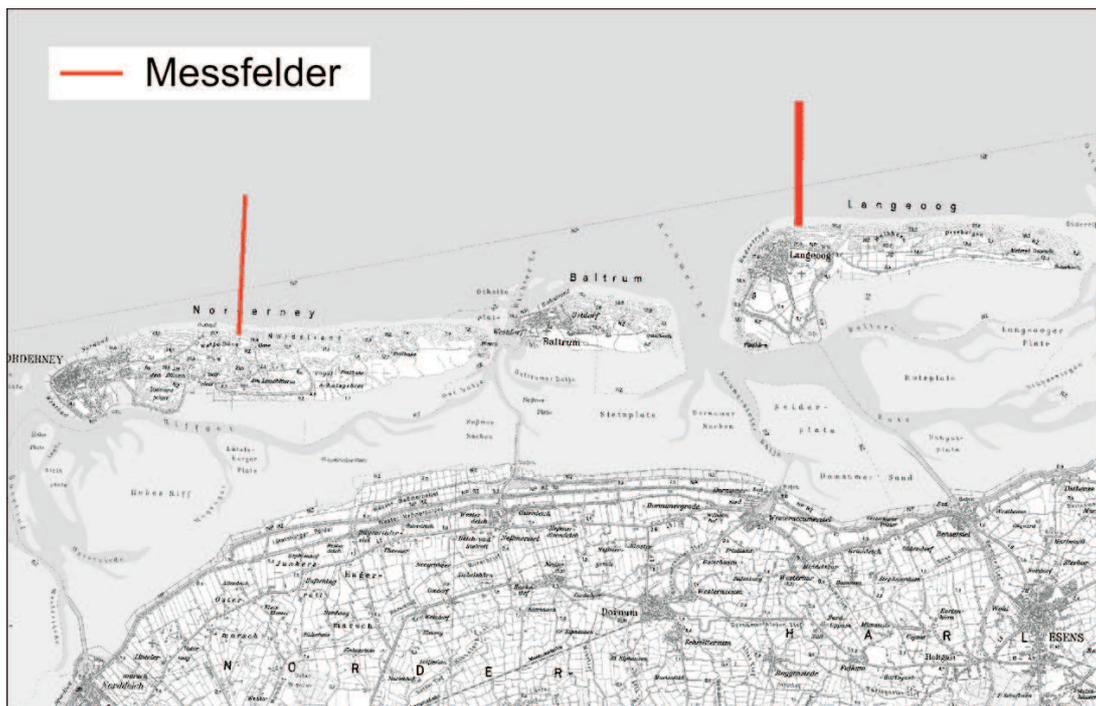


Abbildung 1.1: Lage der Messfelder für das Forschungsvorhaben Düneros auf den Inseln Norderney und Langeoog

passung entsprechender Verfahren aus dem internationalen Bereich vorgenommen worden (Niemeyer 1985; Newe 2005). Sie sind allerdings für das Nordseeküstengebiet nur auf einer unzureichenden Datengrundlage hinsichtlich ihrer Naturähnlichkeit geprüft worden. Überlegungen zur Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur vorausschauenden Ermittlung der Dünenerosion für den Eintritt des Bemessungswasserstandes und dem Auftreten des Bemessungsseegangs sind auf der Ebene der Beratergruppe Küstenforschung bereits vor Jahren angestellt worden und in das Forschungskonzept des KFKI (2001) aufgenommen worden. Eine dazu vom Antragsteller vorgelegte und in der Beratergruppe Küstenforschung des KFKI positiv bewertete Projektskizze zu dieser Thematik ist nicht weiter verfolgt worden, da sich bei Voruntersuchungen herausgestellt hat, dass für die Entwicklung eines Verfahrens zur Dünenerosion keine hinreichenden Datengrundlagen verfügbar waren. Aus diesem Grund wurde ein Antrag gestellt, um über diese Förderung verbesserte Voraussetzungen zur Schaffung einer geeigneten Datengrundlage für eine zukünftige Verfahrensentwicklung zu erhalten.

Da die Forschungsstelle Küste seit mehr als anderthalb Jahrzehnten eingehend daran arbeitet, die Naturähnlichkeit von mathematischen Seegangsmoellen zu prüfen und in Zusammenarbeit mit deren Entwicklern deren Verfeinerung zu erreichen, stehen einerseits hinreichend erprobte Modelle für die Berechnung der Eingangsbedingungen für Dünenerosionsmodelle sowie ergänzend abstützende Daten aus Messungen im Einzugsbereich des Norderneyer Seegats und dessen Küstenvorfeld zur Verfügung. Weil der Eintritt von Sturmfluten, die an Randdünen für die vorgesehenen Untersuchungen hinreichend erosionswirksam sind, in seinem zeitlichen Ablauf unvorhersehbar ist, wurde auf die Beschäftigung von geförderten wissenschaftlichem Personal verzichtet. Dies soll -bei Vorliegen hinreichender Datengrundlagen- in einem späteren Folgevorhaben zur Verfahrensentwicklung erfolgen.

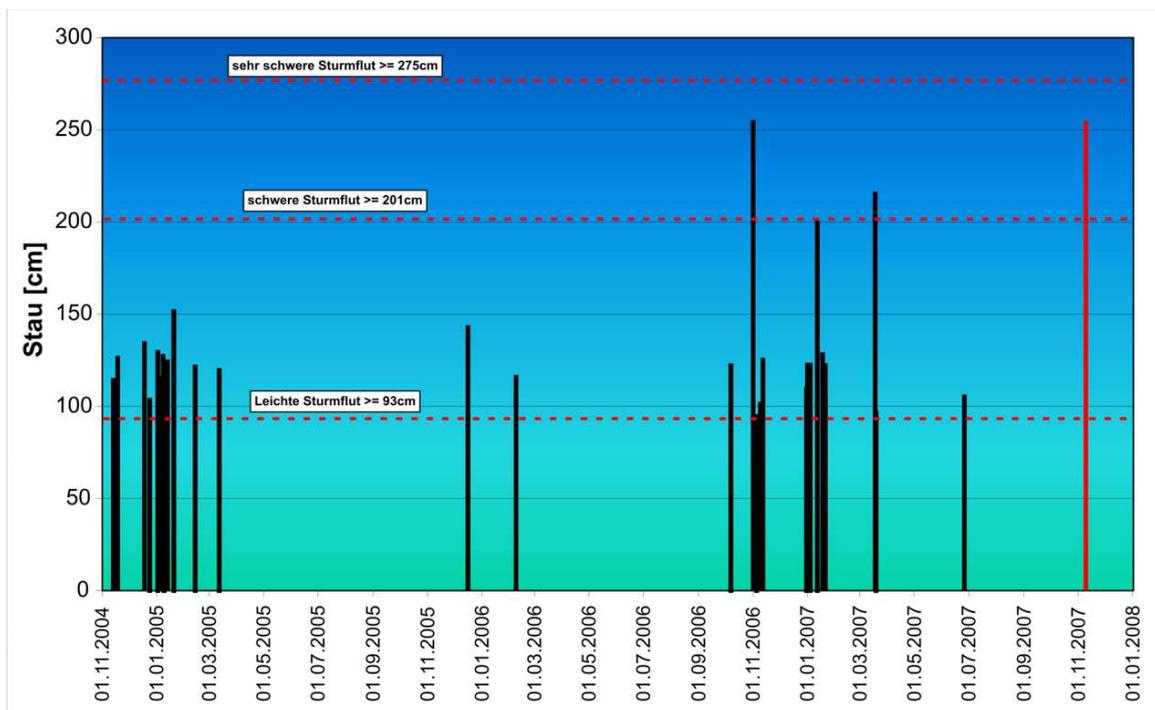


Abbildung 1.2: Stau der Sturmfluten der letzten Jahre, mit Einordnung der Sturmfluten nach DIN 4049. Die für das Projekt wesentliche Sturmflut vom 8. November 2007 ist in rot dargestellt.

1.2 Das Untersuchungsgebiet

Die im Rahmen des Projektes eingerichteten Messfelder/-profile befinden sich im zentralen Bereich der Insel Norderney, östlich der Platanenlandung und damit außerhalb des abschirmenden Riffbogens, und am Weststrand der Insel Langeoog nördlich des Pirolatals wo in den letzten Jahren die durch Erosion gefährdeten Dünen durch Hinterfüllungen geschützt werden mussten (Abb. 1.1). Der gesamte Bereich ist gekennzeichnet durch eine sehr hohe zeitliche und räumliche Variabilität von Wasserständen, Strömung und Seegang. Die überlagerte Wirkung von Gezeiten, Witterungsverhältnissen und komplizierter Topographie führt dazu, dass sowohl experimentelle als auch numerische Untersuchungen des Systems sehr hohe Anforderungen an naturnahe Mess- und Modellierungsverfahren stellen.

Die Tide im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste ist nach den üblichen Klassifikationen als mesoskalig einzuordnen. Folgerichtig hat sich im Zusammenwirken mit dem regionalen Seegangsklima eine Küste mit einem dynamischen, aber geordneten System von Düneninseln, Seegaten und zugehörigen Tidebecken mit sublitoralen Rinnen und ambibischen Bereichen, den Watten ausgebildet (Niemeyer 1990).

Der mittlere Tidenhub am Pegel Norderney beträgt 2.44 m, am Pegel Langeoog 2.67 m (Zeitreihe 1996/2005, Quelle: WSA Emden). Sturmfluten treten am Pegel Norderney in der Klassifikation nach DIN 4049 bei Wasserständen über dem MTHW von 0.93 m (leichte Sturmflut), 2.01 m (schwere Sturmflut) und 2.75 m (sehr schwere Sturmflut) [Schwellenwerte aus der Zeitreihe 1948/2007] (siehe Abb. 1.2). Der Seegang kommt dabei überwiegend aus Nordwest (Abb. 1.3).

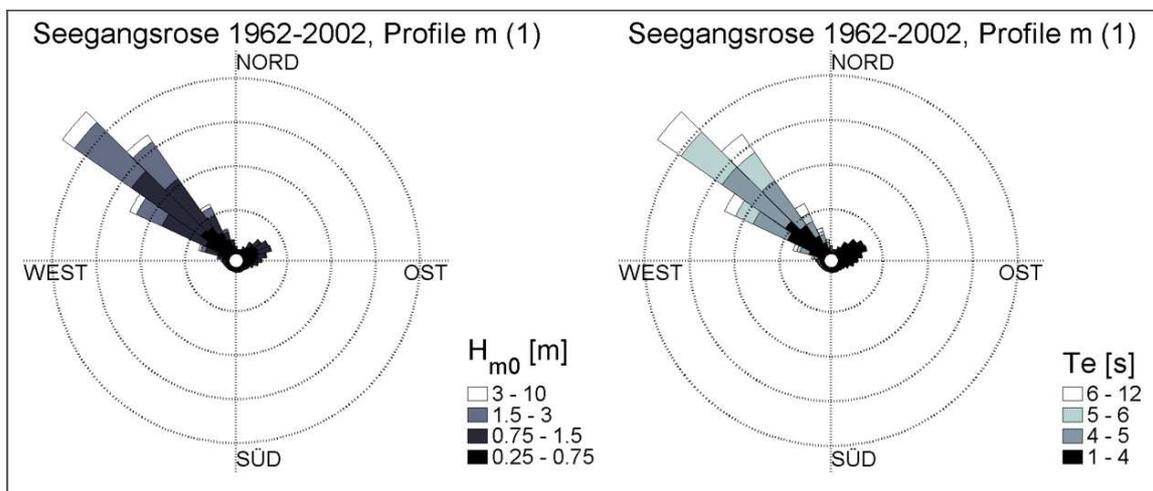


Abbildung 1.3: Seegang (signifikante Wellenhöhe, Energieperiode und zugehörige Richtungen) im Seegebiet vor Norderney — 40-jährige Zeitreihe

Kapitel 2

Stand der Forschung

Vielfach wird bereits bei Sturmfluten früherer Jahrhunderte auf die starke Erosion von Randdünen bei Sturmfluten oder aber auf deren daraufhin erfolgten Durchbruch hingewiesen (Arends 1833; Hagen 1863; Niemeyer et al. 1996). Erst die verheerende Sturmflutkatastrophe von 1953 in den Niederlanden hat dazu geführt, dass dort -ebenso wie für Deiche- Überlegungen angestellt worden sind, wie ein vorsorglicher Sturmflutschutz an Insel- und Küstenabschnitten mit Randdünen zu gestalten sei. Ziel war es, über eine vorausschauende quantitative Ermittlung der Dünenerosion bei Sturmfluten deren Bruch-sicherheit für den Bemessungsfall zu prüfen. Die Motivation für derartige Anstrengungen sind u. a. auch in den dortigen natürlichen Gegebenheiten begründet, da Randdünen an dreihundert der insgesamt achthundert Kilometer langen niederländischen Küste in dicht-besiedelten Gebieten mit teilweise sehr hoher Wertschöpfung den Sturmflutschutz bilden. Zudem ist in den Niederlanden künstliche Dünenerstellung ein übliches Verfahren im Insel- und Küstenschutz, wodurch die Entwicklung entsprechender Bemessungsverfahren noch zweckdienlicher wurde.

Grundlegende, noch heute bestimmende Ansätze hat Edelman (1969) auf der Basis langer und intensiver Untersuchungen in der Natur und vor allem in hydraulischen Modellen erstmals im internationalen Rahmen präsentiert: Ausgehend von einer Umlagerung des an den Dünen erodierten Materials in einem durch die Wechselwirkungsprozesse mit dem Seegang begrenzten Bereichs des Materials wurde in einem Profil das Gleichgewicht zwischen erodierter und in den Vorstrand umgelagerter Sedimentmengen in Abhängigkeit von den hydrodynamischen Randbedingungen Wasserstand und Seegang so ermittelt, dass ein rechnerisches Abbruchprofil als Ergebnis vorlag (Abb. 2.1).

Allerdings war der Ansatz von Edelman (1969) nur ein erster Abschluss vielfältiger Untersuchungen, die zur Entwicklung eines operationell verfügbaren Verfahrens weiter fortgesetzt wurden und 1972 in die Veröffentlichung einer Richtlinie mit Vorläufigkeitscharakter durch die dafür vom Fachministerium eingesetzte Regierungskommission (TAW 1972) mündete, mit der die operationelle vorsorgliche Berechnung von Sturmprofilen an Randdünen für den Bemessungsfall möglich wurde. Zu deren Vorbereitung waren in systematischer Form umfangreiche hydraulische Modellversuche in einem Wellenkanal vorgenommen worden und in eine deterministische empirische Formulierung für ein Gleichgewichtsprofil eingeführt, das vom Ausgangsprofil vor der Sturmflut, vom Sturmflutseitel und von der seeseitigen Grenze der wellenhöhenabhängigen Grenze der Flachwasserbrandung abhing (Van de Graaf 1977).

Aber bereits nach Sturmfluten in den Jahren 1972 und 1973 wurde die allgemeine An-

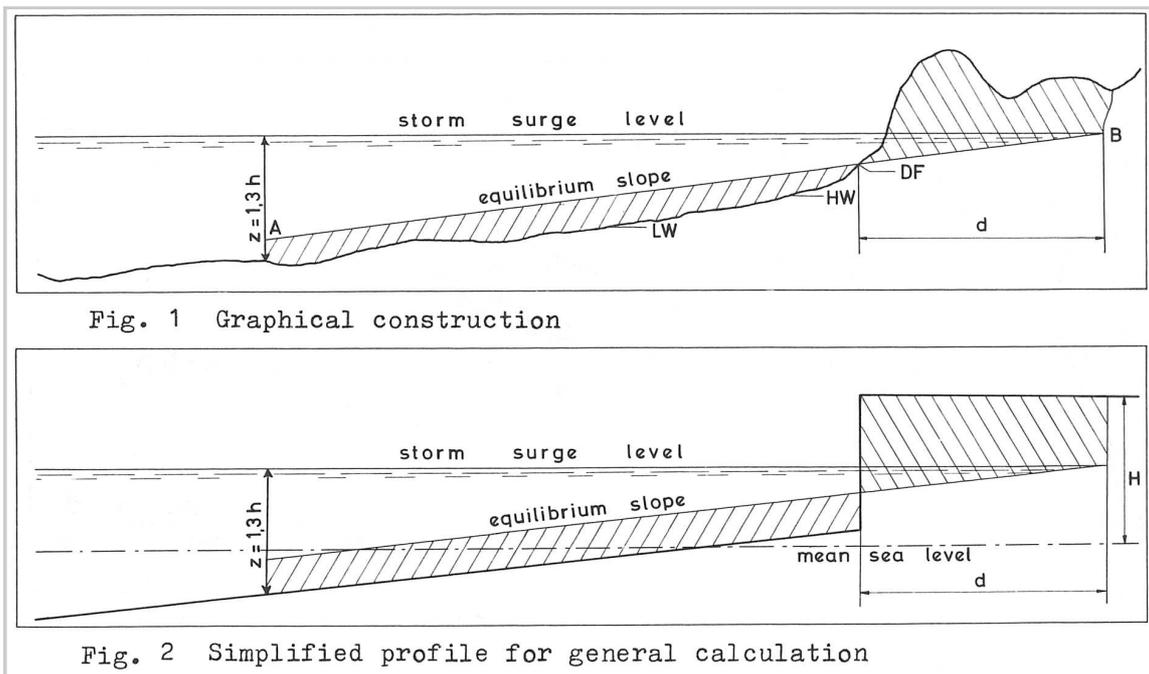


Abbildung 2.1: Ansatz zur Berechnung des Gleichgewichtsprofils (Edelman 1969)

wendbarkeit des Ansatzes nach Messungen auf der westfriesischen Insel Ameland in Zweifel gezogen und für die dortigen Verhältnisse eine Formulierung mit anderen empirischen Koeffizienten empfohlen (WL 1974). Ebenso ergaben Einmessungen von Sturmprofilen nach den Sturmfluten vom Januar 1976 weitergehenden Anlass, an einer Fortentwicklung zu arbeiten (WL 1978).

Kleinmaßstäbliche hydraulische Modellversuche von van de Graaff (1977) und Vellinga (1979) gaben Bakker und Vrijling (1981) Veranlassung, den Ansatz der TAW (1972) durch Berücksichtigung der Beschaffenheit des örtlichen Sediments über die Sinkgeschwindigkeit des d_{50} -Korns zu erweitern und den Ansatz in einen wahrscheinlichkeitstheoretischen Bemessungsansatz einzuarbeiten. Grundlegend für den nächsten einzuführenden Bemessungsansatz waren dann aber die Untersuchungen von Vellinga (1979, 1982; WL 1982), die bis heute die Bemessungspraxis des niederländischen Rijkswaterstaat und erst derzeit vor einer Modifikation stehen (van Gent et. al. 2007). Anlass dazu hat die Entdeckung gegeben, dass hinsichtlich der Länge der Perioden für den Bemessungsseegang die Gefahr einer Unterschätzung besteht. Um derartige Erkenntnisse in die Prüfung der Sturmflutsicherheit von Randdünen einbringen zu können, sind umfangreiche großmaßstäbliche Versuche im Großen Wellenkanal in De Voorst vorgenommen worden und auf dieser Grundlage der Ansatz von Vellinga (1982; WL 1982) um den Parameter Peakperiode erweitert worden (van Gent et. al. 2007). In den Niederlanden wird diese Modifikation aber als derzeit -auf der bestehenden Datengrundlage- bestmöglichstes Ergebnis angesehen, dass wesentlicher Fortentwicklungen bedarf, für die ein Programm bis zum Jahr 2011 in Vorbereitung ist. Auch der jetzt entwickelte modifizierte Ansatz nach Vellinga (1982; van Gent et. al. 2007) stellt noch ein empirisches Gleichgewichtsmodell dar und kein dynamisches, prozessbasiertes.

Außerhalb der Niederlande hat es wenige Versuche gegeben, vergleichbare Ansätze zu entwickeln. Bekannt ist hier lediglich der Ansatz von Kriebel & Dean (1993), der allerdings methodisch keine Fortentwicklung gegenüber dem grundlegenden niederländischen

Ansatz von Edelman (1969) darstellt. In Deutschland hat Niemeyer (1985) den Versuch unternommen, die Eignung der Ansätze der TAW (1972), von Bakker und Vrijling (1981) sowie von Vellinga (1982) für -allerdings nur wenige- Sturmprofile an den Ostfriesischen Inseln zu prüfen: Bei allem Vorbehalt wegen der unzureichenden Datengrundlage waren die Ergebnisse enttäuschend: Für keines der Verfahren konnten naturähnliche Ergebnisse erzielt werden. Sie wurden nur nach Modifikation des Ansatzes für die Brecherwassertiefe für das eigentlich einfachste der Verfahren (TAW 1972; van de Graaf 1985) erreicht. Als Schwächen für Prüfen und Entwickeln der Verfahren haben sich damals herausgestellt:

1. mangelnde Datendichte an zeitnahen Ausgangsprofilen vor dem Eintritt von Sturmfluten und den dadurch bewirkten Erosionsprofilen,
2. unzureichende Erfassung des seeseitigen Vorstrandbereichs und hinreichend sichere Identifikation der seeseitigen Grenze der Brecherzone mit Flachwasserbrandung,
3. Bezug der Verfahren auf theoretische Tiefwasserwellenparameter, für deren Auftreten in der gesamten südlichen Nordsee bei Sturmfluten unzureichende relative Wassertiefen vorliegen.

An der Richtigkeit dieser Einschätzung hat sich seither nichts geändert; sie wird auch nicht in Frage gestellt, sondern der Aufwand zur Behebung dieser Defizite, der nur über die Vornahme langjähriger exemplarischer Naturmessungen erfolgen kann, ist bisher noch nicht betrieben worden. Deren Notwendigkeit wird einerseits durch die Dokumentation der kurzfristigen Gestaltungsänderungen von Stränden und Dünen bei Sturmfluten im Zeitmaßstab einer Tide, aber auch bei Normaltiden im Zeitraum von wenigen Wochen (Homeier 1976) und andererseits durch die Plausibilisierung dieser Vorgänge über Naturmessungen seegangserzeugter Strömungen auf Stränden für beide Ereignisformen (Niemeyer 1991; 1992) herleitbar.

Dieses wird auch an anderen Untersuchungen mit ähnlicher Zielsetzung im deutschen Nordseeküstengebiet deutlich: Die Kalibrierung des Gleichgewichtsmodells für Strände und Randdünen der nordfriesischen Insel Sylt (Dette et al. 1994) erfolgte ohne die Verwendung zeitnah zu den Sturmfluten erfaßter Ausgangszustände; die Übertragung der Ergebnisse auf die Verhältnisse der Ostfriesischen Inseln (Dette et al. 1998) ist angesichts der Erfahrungen mit der Übertragbarkeit von empirischen für -die morphodynamisch den Ostfriesischen Inseln erheblich ähnlicheren Westfriesischen Inseln- entwickelten Verfahren (Niemeyer 1985) nicht nachvollziehbar. Der Beweis der Gültigkeit konnte bisher auch nicht erbracht werden.

Methodisch konsequenter und belastbarer, weil mit der Einbringung der vermeintlich wesentlichen physikalischen Prozesse verbunden, ist der Versuch von Blum und Thorenz (2005), Dünenerosion mit dem Profilmodell UNIBEST in seiner Version für den Quertransport von WL-Delft Hydraulics – trotz unzureichender Datengrundlagen für den Bemessungsseegang – exemplarisch zu ermitteln. Allerdings machen die beiden Autoren keine Angaben, ob und inwieweit bei der Anwendung des Modells eine hinreichende Naturähnlichkeit gegeben ist.

Bei den jüngeren niederländischen Grundsatzuntersuchungen ist allerdings festgestellt worden, dass das Modell UNIBEST die Dünenerosion bei Sturmfluten erheblich unterschätzt, weshalb Untersuchungen in Gang gesetzt wurden, Dünenerosion über das prozessbasierte mathematische Modell Delft-3D-mor zu reproduzieren. Die ersten Ergebnisse

waren deutlich besser als die für UNIBEST, bleiben aber verbesserungswürdig (van de Graaf 2005).

Hinsichtlich der Erreichbarkeit einer Naturähnlichkeit bei der mathematischen Modellierung von Dünenerosion ist inzwischen einer Forschergruppe in dem vom U.S. Army Corps of Engineers-Research and Development Center geförderten Projekt Morphos-3D ein bedeutender Fortschritt gelungen (Roelvink et al. 2007): Das prozessbasierte zweidimensionale Modell Xbeach ist für die zu reproduzierenden vielfach schockartigen hydrodynamischen und morphodynamischen Vorgänge mit einer robusten Numerik ausgestattet, was auch in einer weiteren Hinsicht Vorteile birgt: Wegen der möglichen starken Gradienten muss mit hoher Auflösung gearbeitet werden. Das Modell reproduziert Seegangfortpflanzung, Strömungen, Sedimenttransport und Bodenevolution für variierende Seegangsspektren und Strömungen. Eingeschlossen ist dabei die Modulation des Wasserspiegels in Folge der Variation der Wellenhöhen durch lange Wellen. Das Modell XBEACH kann für kleinräumige Untersuchungsgebiete autonom betrieben werden und für mittel- und großskalige Modellgebiete in andere mathematische Modelle eingebettet werden, um von ihnen die antreibenden Randbedingungen zu übernehmen.

Kapitel 3

Aufbau der Messketten

3.1 Überblick

Strände und Dünen der Ostfriesischen Inseln unterliegen einer hohen, zeitlich wechselnden natürlichen Dynamik. Ihre hieraus resultierende Variabilität ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn dadurch die Sturmflutsicherheit zu schützender Gebiete beeinträchtigt werden kann. Daher werden im Rahmen der Daseinsvorsorge die Strände und Dünen der Ostfriesischen Inseln jährlich in festgelegten Messprofilen durch terrestrische und nautische Vermessungen aufgenommen, anschließend dargestellt und hinsichtlich der Entwicklung eingeordnet. Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden in Untersuchungsberichten der NLWKN-Forschungsstelle Küste jährlich veröffentlicht (zuletzt: Dirks & Stephan 2008). Die Datengrundlage der in diesem Untersuchungsbericht verwendeten Messprofile beruht auf Profilvermessungen in den Monaten April bis September. Zur Verbesserung der Datengrundlage wurden auf den Ostfriesischen Inseln Norderney und Langeoog begrenzte Abschnitte gewählt, deren exponierte Randdünen und vorgelagerten Strände und Vorstrände präventiv in regelmäßigen Abständen mit den beschafften GNSS-Vermessungssystemen und durch hydrographische Vermessungen erfasst werden. Die terrestrische Vermessung erfolgt ausgehend vom rückseitigen Dünenhang über die Dünenkrone, über den trockenen Strand bis zur Niedrigwasserlinie. Die hydrographische Vermessung erfolgt zeitnah zur terrestrischen und reicht von der Niedrigwasserlinie bis 4 km in den Vorstrand hinein.

Neben den topographischen Aufnahmen wurden im Messfeld Norderney zur Erfassung der Seegangsbeanspruchung von Strand und Randdüne fünf Mess-Stationen eingerichtet, drei ADCP-Wellenpegel auf dem Vorstrand und an der NN-10m Linie und zwei Ultraschall-Wellenpegeln auf dem Strand und vor dem Dünenfuß. Diese Messungen werden als unverzichtbare Grundlage angesehen, um ein dynamisches prozessbasiertes mathematisches Modell entwickeln, testen und gegebenenfalls verbessern zu können. Gleichzeitig werden damit Eingangsgrößen geschaffen, die eine Orientierung an den theoretischen Tiefwasserwellenparametern überflüssig werden lassen. Insofern ist auch eine bessere Einbindung in großräumige Sturmflut- und Seegangmodellierungen ohne wirklichkeitsfremde und mit einem zusätzlichen Fehlerpotenzial versehene Prozeduren möglich.

Auf eine gleichzeitige Ausdehnung der Seegangsmessungen auf das Messfeld Langeoog wird verzichtet. Sie würde einerseits den Investitionsbedarf erheblich erhöhen und andererseits wegen der Entfernung vom Standort des Untersuchungspersonals keine hinreichende Betreuung für einen erfolgreichen Messbetrieb gewährleisten. Dennoch wird der parallele geodätische Messbetrieb im Messfeld Langeoog für sinnvoll gehalten: Einerseits sind die



Abbildung 3.1: Lage des Messfeldes Norderney

Strukturen hinsichtlich des Vorfeldes und der damit verbundenen stärkeren Abbruchraten anders als auf Norderney; andererseits sind diese Daten gerade deshalb bei Entwicklung prozessbasierter Modelle auf der Grundlage der Messungen auf Norderney als zusätzliche Verifikationsgrundlage nutzbar.

3.2 Messfeld Norderney

3.2.1 Topographie

Das Messfeld befindet sich am Nordstrand der Insel Norderney, ca 1,2 km östlich der Weißen Düne. Das Messfeld hat eine ost-west Ausdehnung von 200 m. Das Messprofil Nr. 215 aus dem Regelmessprogramm Ostfriesische Inseln verläuft mittig durch das Messfeld (Abb. 3.1). Neben der Erfassung des festgelegten Messprofils wird der gewählte Abschnitt vollständig terrestrisch in einem der Topographie angepassten Raster vermessen. Die hydrographische Vermessung des Abschnitts erfolgt durch Linienlotungen, die parallel zum festgelegten Messprofil mit einem Abstand von 50 m erfasst werden. Aus diesen Daten werden über Triangulation und Rasterüberführung Geländemodelle generiert, deren Vergleich die Entwicklung des gewählten Abschnitts ermöglicht.

Aus den Mitteln des Vorhabens wurden zwei Trimble R8 GNSS (Global Navigation Satellite System) Empfänger beschafft, die durch ihre Robustheit und Leistungsfähigkeit die besonderen Voraussetzungen zur Erfassung der Strand- und Dünensituation erfüllen.

Das Trimble R8 GNSS System ist ein Mehrkanal-, Mehrfrequenz-GNSS-System und besteht aus einem Empfänger, einer Antenne und einem internen GSM/GPRS Modem. Der Empfänger unterstützt für die Positionsbestimmung den Empfang von GPS - und GLONASS Satellitensignalen, zudem verarbeitet er die im Rahmen der GPS - Moderni-



Abbildung 3.2: ADCP Modell Workhorse Rio Grande (600 kHz), (RD Instruments)



Abbildung 3.3: ADCP beim Auslegen auf der MS Burchana

sierung neuen Signale für eine noch zuverlässigere Verfolgung. Die zu erreichenden Genauigkeiten für die Lage- und Höhenkoordinaten sind: Horizontal: 10 mm + 1 ppm, Vertikal: 20 mm + 1 ppm

3.2.2 Hydrographische Messeinrichtungen

Die hydrographische Messkette Norderney besteht aus drei verschiedenen Gerätekonfigurationen.

ADCP-Boje

Das ADCP (Abb. 3.2) ist ein Ultraschall-Doppler-Gerät für die Messung von 3D Strömungsgeschwindigkeiten über die gesamte Wassersäule. Es misst die Frequenzverschiebung bei der Reflexion von Schallwellen an mit der Strömung bewegten Objekten in der Regel suspendierte Partikel. Die Vertikale wird dabei in diskrete Tiefenzellen unterteilt, für welche dann jeweils eine Mittelung der gemessenen Geschwindigkeiten vorgenommen wird. Das Gerät kann sowohl stationär (z.B. von einem Gestell am Meeresboden) als auch vom bewegten Boot aus eingesetzt werden. Sofern das ADCP an Bord eines Bootes, an einem Schwimmer oder an einer Seilanlage einer Pegelstation installiert wird, kann damit das Geschwindigkeitsprofil entlang des Schiffskurses bzw. für den Regelquerschnitt der Pegelstation bestimmt werden. Mittels der Auswertesoftware wird auf Basis der Geschwindigkeitsmessungen online der integrierte Abfluß berechnet. Sofern die Sohle in Reichweite der Schallsignale ist und das reflektierte Signal eindeutig ist, d. h. keine bewegte Sohle durch hohen Geschiebetransport oder kohäsiven Transport, dann wird auch die Sohlhöhe durch das Gerät aufgezeichnet. Im Zusammenwirken mit einem GPS kann das ADCP also auch für Vermessungen der Sohle eingesetzt werden. Weiterhin kann anhand der Qualität des Rückstreusignals auf die relative Suspensionskonzentration geschlossen werden. Auch hier ist eine Kalibrierung erforderlich um absolute Messwerte zu erhalten. Mit Hilfe eines zusätzlichen Drucksensors kann ein Richtungsspektrum des Seegangs ermittelt werden, dies ist im Forschungsprojekt Düneros das primäres Ziel des Geräteeinsatzes.

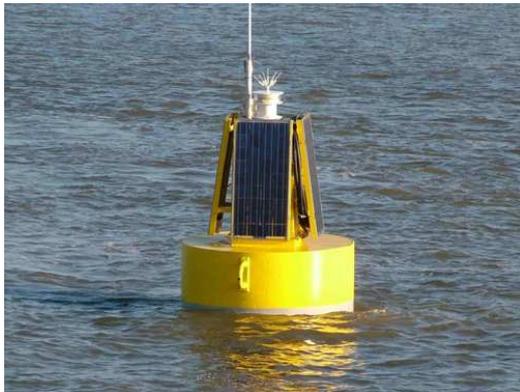


Abbildung 3.4: Kommunikationsboje des ADCP

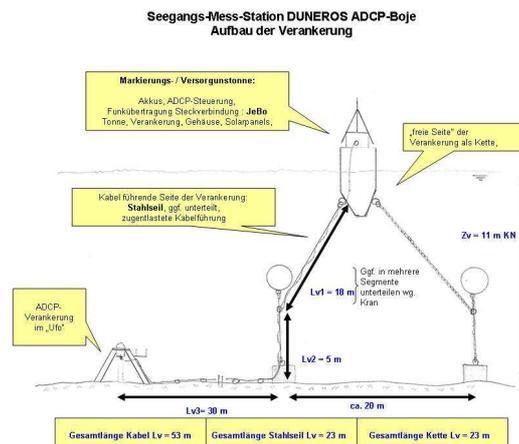


Abbildung 3.5: Prinzip der Bojenverankerung

Das Gerät ADCP-Workhorse der Fa. RDI besitzt folgende Spezifikationen:

1. Geschwindigkeitsprofile Größe der Tiefenzellen 0,1 - 8,0 m, Anzahl der Tiefenzellen 1 - 128
2. Meßbereich 0 - 5 m/s (Standard), 0 - 20 m/s (maximal)
3. Datenübertragung RS232 und RS422, mit einer Baud Rate von 9.600 (Standard) , 115.200 (Download)
4. max. Betriebstiefe 200 m, Betriebstemperatur -5 bis 45 °C
5. Standard-Sensoren: Bottomtrack oder DGPS, Temperatur, Neigung und Kompass
6. stationären Betrieb mittels internen Speicherkarten (bis zu 170 MB) möglich. Stromversorgung über 12 V Batterien.

Das eigentliche Messgerät ist in eine Einhausung montiert worden, die eine fixe, stabile Ausrichtung der Sensoren ermöglicht und das Gerät vor Schleppnetzen schützt. Die Einhausung ist daher in Form eines flachen Sechsecks aus Stahl gefertigt worden (Abb. 3.3)

Im Messfeld Norderney ist das ADCP mit einer Boje verbunden, die zum einen eine Funkverbindung zum Festland ermöglicht mit der die Funktion des Gerätes ständig überwacht werden kann, zum anderen dient die Boje als Halterung von Solarpaneele und zusätzlichen Hochleistungsakkus, welche die Stromversorgung auch für längere Zeiträume sicherstellen können. Die Funkverbindung ist unter Sichtbedingungen für eine Strecke von bis zu 30 km ausgelegt. Da die Solarpaneele optimalerweise nach Süden gerichtet sein sollten (Abb. 3.4), ist die Boje mittels 2 Verankerungen in Nord-Süd-Ausrichtung ausgelegt worden (Abb. 3.5) .

AWAC

Das grundlegende physikalische Messprinzip der AWAC-Geräte der Fa. Nortek ist dasselbe wie bei dem ADCP der Fa. RDI. Die Messzellen der AWAC-Systeme sind jedoch im



Abbildung 3.6: Ausbringen des AWAC

Gegensatz zu dem ADCP-System nicht fixiert in ihrer Größe. Bei schwankendem Wasserspiegel ändert sich kontinuierlich die Messzellengröße, so dass die Wassersäule immer mit der vorgegebenen Anzahl von Messzellen vermessen wird. Besonders bei stark schwankenden Wasserspiegellagen kommt dieses positive Ausstattungsmerkmal der AWAC-Systeme zum tragen. Zusätzlich hat das AWAC-Gerät einen Messsensor der die Wasseroberfläche direkt abtastet und somit im Vergleich zu einem Drucksensor genauer die momentane Wasserspiegelauslenkung messen kann. Daher eignen sich diese Geräte sehr gut für spektrale Seegangsmessungen. Die Messergebnisse die beim Testen der Geräte vor Norderney erzielt wurden, sind von hoher Qualität und kongruent zu denen von Wellenmessbojen. Die Systeme arbeiteten in der Testphase ohne Beanstandung. Das AWAC läuft im Gegensatz zum ADCP autonom mit einer 12V-Batterie zur Stromversorgung und einem Datenlogger, der direkt mit der Sensoreinheit verbunden sind. Alle Bestandteile des AWAC-Systems wurden auf einem Stahlrahmen montiert, der an den Auflagern Rammdorne aufweist und zur zusätzlichen Lagesicherung eine Betonauffüllung an den unteren Verstrebungen erhielt (Abb. 3.6).

Die AWACs sind in einer Tiefe von 6,0 m (Düneros2) und 4,0 m (Düneros3) ausgebracht worden (siehe Abb. 3.7).

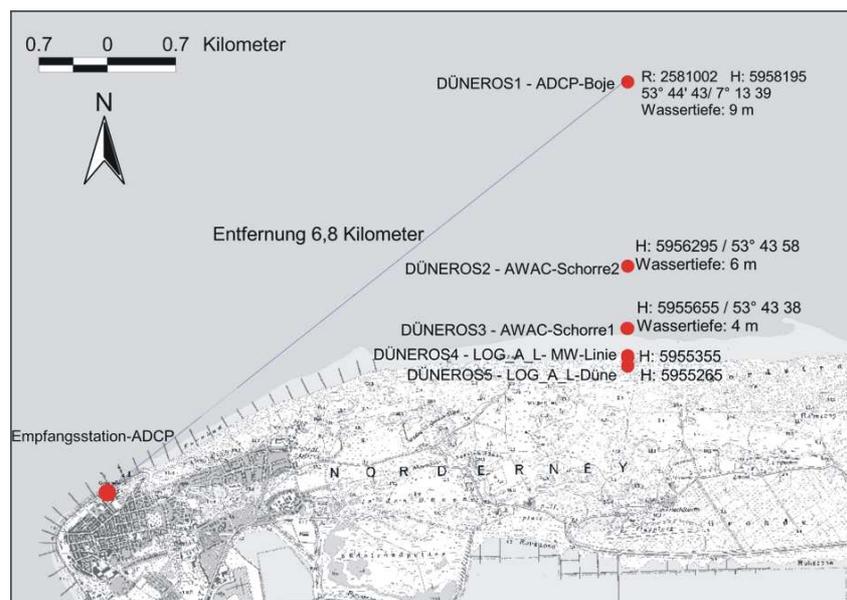


Abbildung 3.7: Lage der hydrographischen Messeinrichtungen des Projektes; Wassertiefen bezogen auf NN

Log-A-Level-Pegelstationen

Das Log-A-Level-Messsystem ist eine autark arbeitende Pegelmessstation, die die Wasseroberfläche mittels Ultraschall von oben durch die Luft vermisst. Aufgrund der hohen Messrate von bis zu 5 Hz kann das System auch sehr kurzperiodische Wellen mit einer Auflösung in der Vertikalen von 1 mm messen. Die Schallsensoren und -emittenten sind über dem Wasser angebracht und messen die Laufzeit der Ultraschallsignale. Zur Messung der Schallgeschwindigkeit ist eine Referenzstrecke im System integriert. Die Genauigkeit der Messung wird vom Hersteller GeneralAcoustics mit 1 mm angegeben. Aufgrund der 3 Sensoren (Abb. 3.8) ist das Messsystem unempfindlich gegen Gischt und Schaumbrechen.

Die Messdaten werden per GPRS Handy an einen Provider (T-Online) übermittelt und direkt ins Internet eingespeist. Mit Hilfe eines dynamischen DNS-Servers kann das Signal auf den gewünschten Rechner umgeleitet werden. Die Messsysteme sind in Echtzeit online einzusehen. Zusätzlich ist ein Datenspeicher eingebaut, der den Datenstrom immer zusätzlich speichert, so dass im Fall von Verbindungsausfällen Datensicherheit besteht. Der Speicher ist als Ringspeicher ausgelegt, der sich nach etwa 4 Monaten wieder überschreibt.

Der Sensor ist robust gegenüber Wettereinflüssen wie Frost und Starkregen und auch vor Eisgang geschützt, da er einen Messbereich von 10 m hat und so ausreichend hoch angebracht werden kann. Die Stromversorgung erfolgt über einen 12V-Bleiakkumulator mit 100 Ah Speicherkapazität. Dieser wird mittels eines Windrotors mit 75 W Leistung bei 20 m/s Windgeschwindigkeit wieder geladen, sodaß ein autarker wartungsarmer bis wartungsfreier Betrieb möglich ist. Die beiden Messsysteme sind in einer Geländehöhe von -0,2 m ü. NN (Düneros4 - Log-A-Level-MW-Linie) und 1,53 m ü. NN (Düneros5 - Log-A-Level-MW-Düne) an eingespülten Stahlpfählen von 30 cm Durchmesser befestigt, wobei die Kragarme mit den Sensoren parallel zu den erwarteten Wellenkämmen ausgerichtet sind, um Reflektionen vom Pfahl in den Messungen zu vermeiden (Abb. 3.9).



Abbildung 3.8: Log-A-Level-Sensoren an Position Düneros4

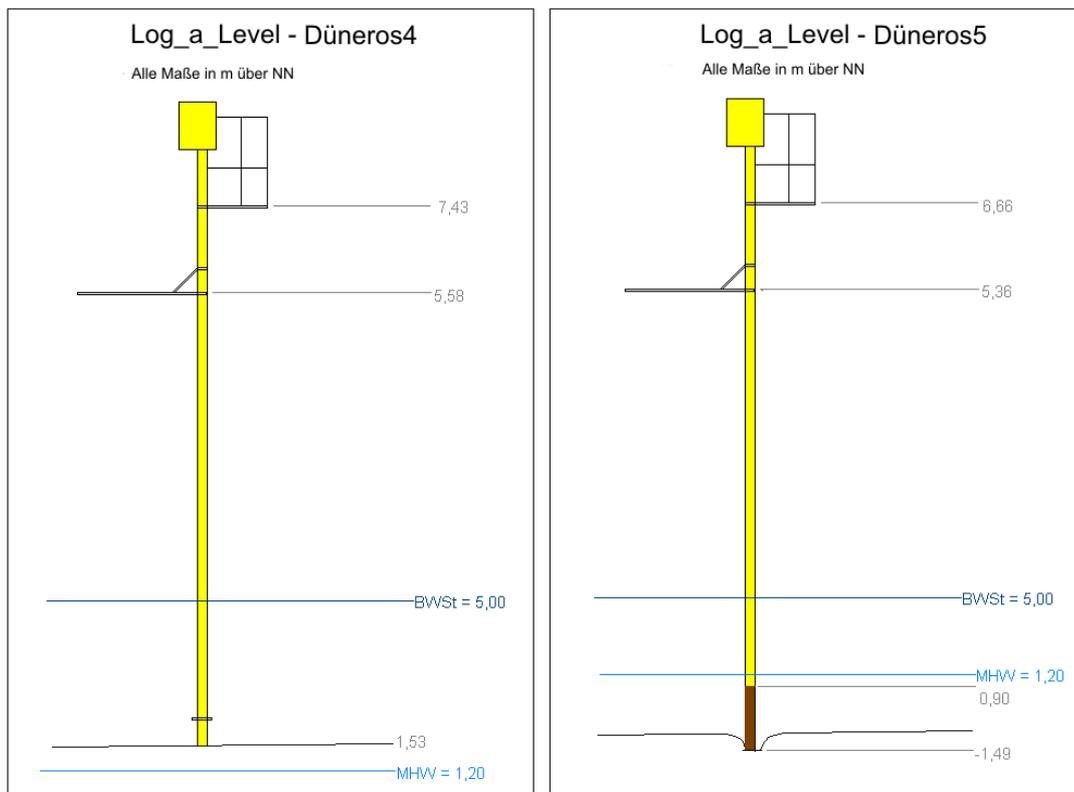


Abbildung 3.9: Höhenlage der Messpfähle der Log-A-Level-Systeme

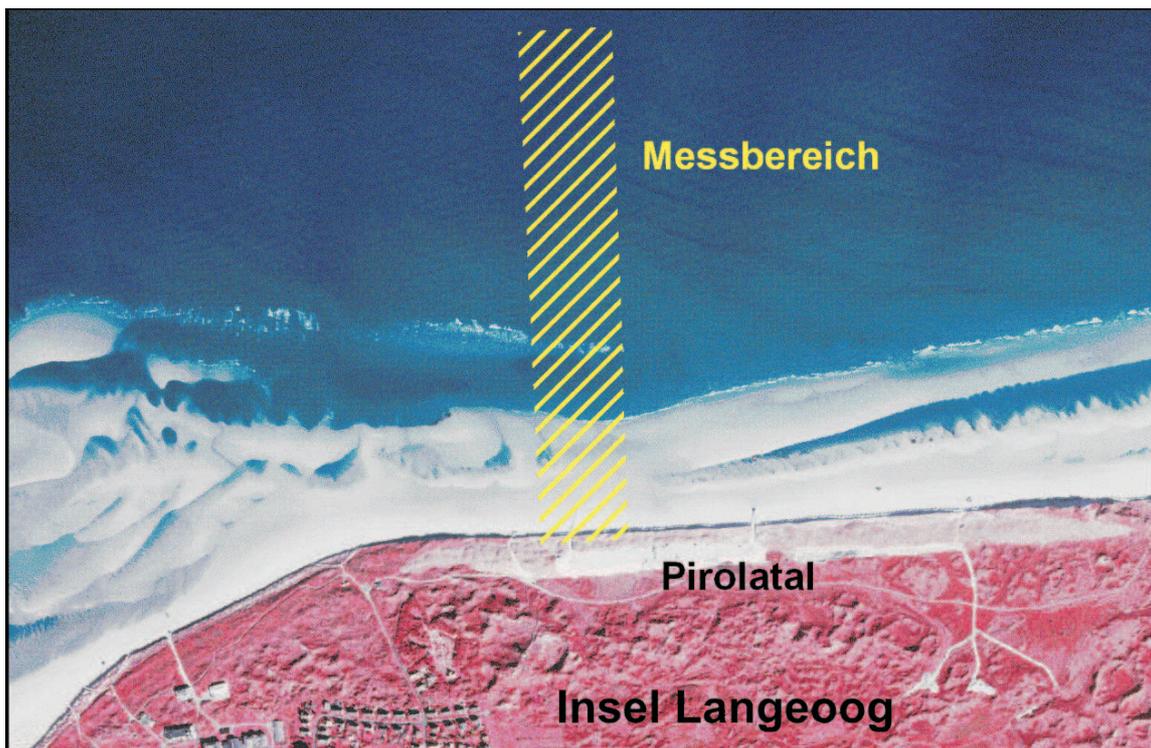


Abbildung 3.10: Lage des Messfeldes Norderney

3.3 Messfeld Langeoog

Das Messfeld befindet sich am Nordstrand der Insel Langeoog (Abb. 3.10). Südlich der im Messfeld befindlichen Randdüne liegt das Pirolatal, das Einzugsgebiet der Inselfrühwasserlinse. Die Randdünen in diesem Bereich wurden in den letzten Jahren mehrmals rückseitig verstärkt. Das Messfeld hat eine ost-west Ausdehnung von 200 m. Die Messprofile Nr. 37 und 38 des Regelmessprogramms Ostfriesische Inseln liegen im Messfeld. Die profil- und flächenhafte Vermessung erfolgt analog zum Messfeld Norderney (siehe Abschn. 3.2 auf S. 16).

Kapitel 4

Ergebnisse der Messungen

4.1 Topographie

4.1.1 Überblick

Die erhobenen Datensätze für die beschriebenen Erosionsbereiche der Inseln Norderney und Langeoog sind zusammen mit den vom Sturmflutwarndienst der NLWKN-Forschungsstelle Küste registrierten Sturmfluten in der Tabelle 4.1 aufgeführt. Für die Insel Norderney wurde im Januar 2007 ein neuer Erfassungsbereich gewählt, da der unter starken morphologischen Veränderungen stehende Vorstrand des Abschnitts im Bereich des Regelmessprofils Nr. 206 das Einrichten der hydrographischen Messeinrichtungen nicht zuließ.

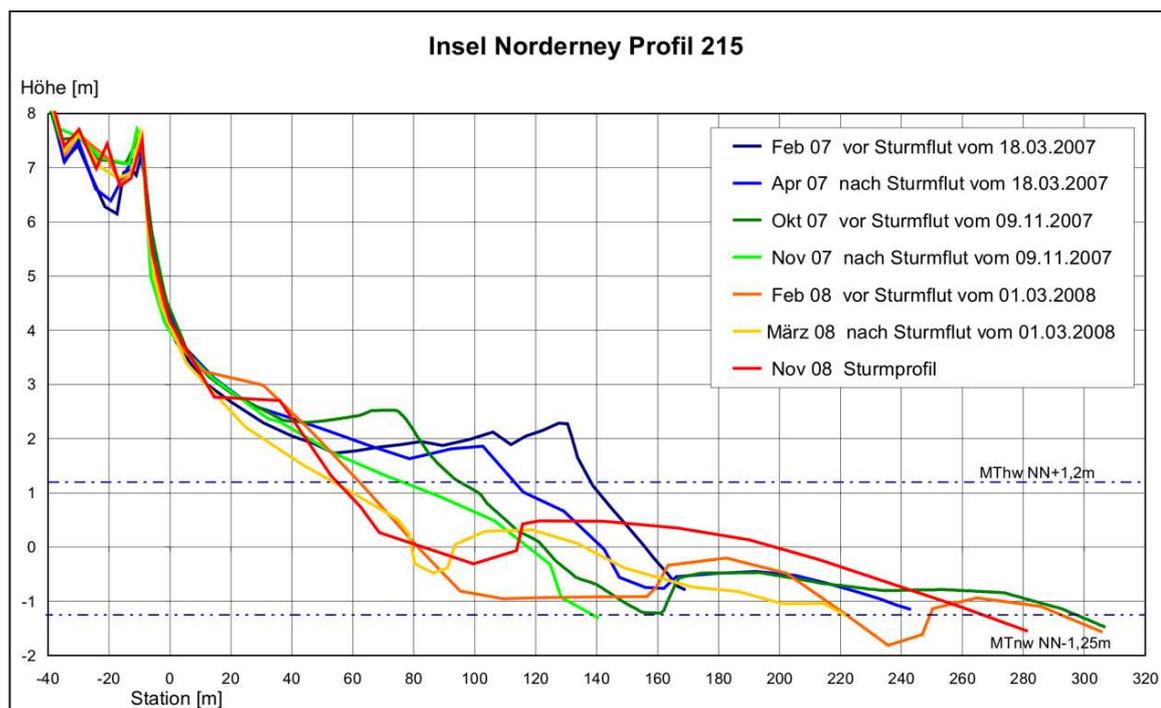


Abbildung 4.1: Messfeld Norderney, Profil 215

Tabelle 4.1: Übersicht über die die Erfassung der Strandlage

Insel Norderney, Profil 215		Insel Langeoog, Profil 37 u. 38	
Datum	Ereignis / Messung	Datum	Ereignis / Messung
Profilwechsel von Nr. 206 auf Nr. 215		23.11.2005	terrestrische Strandvermessung
		05.01.2006	Sturmflut
		23.01.2006	terrestrische Strandvermessung
		08.03.2006	terrestrische Strandvermessung
		12.10.2006	terrestrische Strandvermessung
		01.11.2006	Sturmflut
		02.11.2006	terrestrische Strandvermessung
		09.11.2006	Sturmflut
		12.11.2006	Sturmflut
		27.11.2006	terrestrische Strandvermessung
		31.12.2006	Sturmflut
21.01.2007	Sturmflut	01.01.2007	Sturmflut
30.01.2007	terrestrische Strandvermessung	04.01.2007	Sturmflut
21.02.2007	hydrographische Vermessung	12.01.2007	Sturmflut
26.02.2007	terrestrische Strandvermessung	18.01.2007	Sturmflut
18.03.2007	Sturmflut	21.01.2007	Sturmflut
19.03.2007	Sturmflut	21.01.2007	Sturmflut
10.04.2007	terrestrische Strandvermessung	25.01.2007	terrestrische Strandvermessung
26.06.2007	Sturmflut	18.03.2007	Sturmflut
22.08.2007	terrestrische Strandvermessung	19.03.2007	Sturmflut
11.10.2007	hydrographische Vermessung	12.04.2007	terrestrische Strandvermessung
18.10.2007	terrestrische Strandvermessung	26.06.2007	Sturmflut
06.11.2007	Sturmflut	15.10.2007	terrestrische Strandvermessung
08.11.2007	Sturmflut	15.10.2007	hydrographische Vermessung
09.11.2007	Sturmflut	06.11.2007	Sturmflut
09.11.2007	Sturmflut	08.11.2007	Sturmflut
12.11.2007	terrestrische Strandvermessung	09.11.2007	Sturmflut
22.11.2007	hydrographische Vermessung	09.11.2007	Sturmflut
25.11.2007	Sturmflut	12.11.2007	terrestrische Strandvermessung
25.11.2007	Sturmflut	22.11.2007	hydrographische Vermessung
07.12.2007	Sturmflut	25.11.2007	Sturmflut
17.12.2007	terrestrische Strandvermessung	25.11.2007	Sturmflut
17.01.2008	terrestrische Strandvermessung	07.12.2007	Sturmflut
25.01.2008	Sturmflut	25.01.2008	Sturmflut
26.01.2008	Sturmflut	26.01.2008	Sturmflut
01.02.2008	Sturmflut	29.01.2008	terrestrische Strandvermessung
11.02.2008	hydrographische Vermessung	01.02.2008	Sturmflut
12.02.2008	terrestrische Strandvermessung	13.02.2008	hydrographische Vermessung
22.02.2008	Sturmflut	22.02.2008	Sturmflut
27.02.2008	Sturmflut	27.02.2008	Sturmflut
01.03.2008	Sturmflut	01.03.2008	Sturmflut
12.03.2008	Sturmflut	12.03.2008	Sturmflut
13.03.2008	Sturmflut	13.03.2008	Sturmflut
17.03.2008	terrestrische Strandvermessung	10.04.2008	terrestrische Strandvermessung
21.07.2008	Sturmflut	21.07.2008	Sturmflut
02.10.2008	Sturmflut	02.10.2008	Sturmflut
17.10.2008	Sturmflut	17.10.2008	Sturmflut
05.11.2008	terrestrische Strandvermessung	05.11.2008	terrestrische Strandvermessung

4.1.2 Erosionsbereich Insel Norderney

Die aktuellen Profilvermessungen ergeben im Bereich des Messprofils Nr. 215 ähnliche Entwicklungen wie im Vorjahr (Dirks & Stephan 2008). Weitere Höhenabnahmen des nassen Strandes sind zu erkennen (Abb. 4.1). Der trockene Strand hat vom Feb 2007 mit 101,2 m bis Nov. 2008 mit 11,8 m deutlich an Breite verloren. Der nasse Strand hingegen hat nach der Sturmflut vom 09.11.2007 mit 62,6 m zur aktuellen Vermessung vom Nov. 2008 mit 211,8 m deutlich an Breite gewonnen.

Der Bereich des Vorstrandes von MTnw bis zur Tiefe NHN -7 m (Abb. 4.2) unterlag im betrachteten Bereich entgegen der in Abschn. 4.1.1 getroffenen Vermutung erheblichen morphologischen Veränderungen. Die im Oktober 2007 eingebrachten Messinstrumente bei Station 618 m und 1+236 m waren im Februar 2008 mit 27 cm und 110 cm Sand bedeckt (Abb. 4.2).

4.1.3 Erosionsbereich Insel Langeoog

Aus den Profilvermessungen 2008 ergeben sich für den gewählten Dünenabschnitt der Messprofile Nr. 37 und Nr. 38 ähnliche Entwicklungen wie im Vorjahr. Der Strand- und Dünenabschnitt im Bereich des Pirolatals erodiert weiterhin. Die Breite des trockenen Strandes ist bei beiden Profilen mit einem Betrag von 28 m ausgeglichen. Der nasse Strand hat im Profil Nr. 37 nach der Sturmflut vom 09.11.2007 bis zum Juni diesen Jahres 70 m an Breite verloren (Abb. 4.3). Das Profil Nr. 38 weist hingegen eine konstante Breite von 160 m auf (Abb. 4.4).

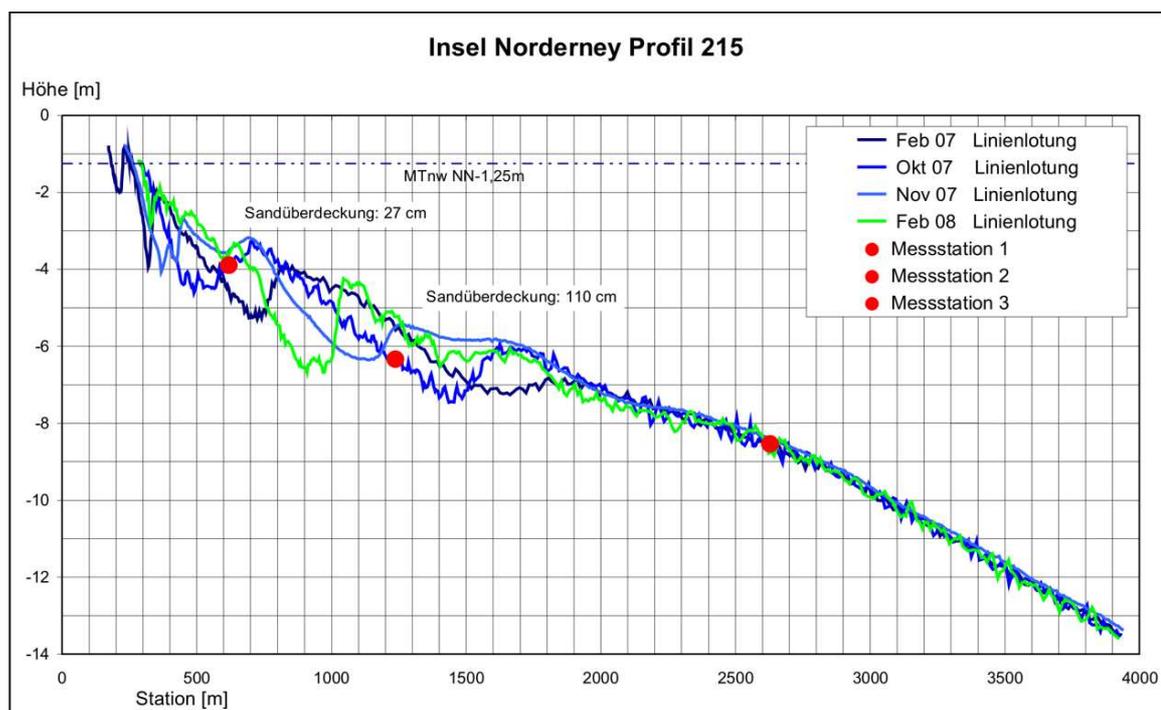


Abbildung 4.2: Messfeld Norderney, Profil 215 – Ergebnisse der Linienlotung im Vorstrandbereich

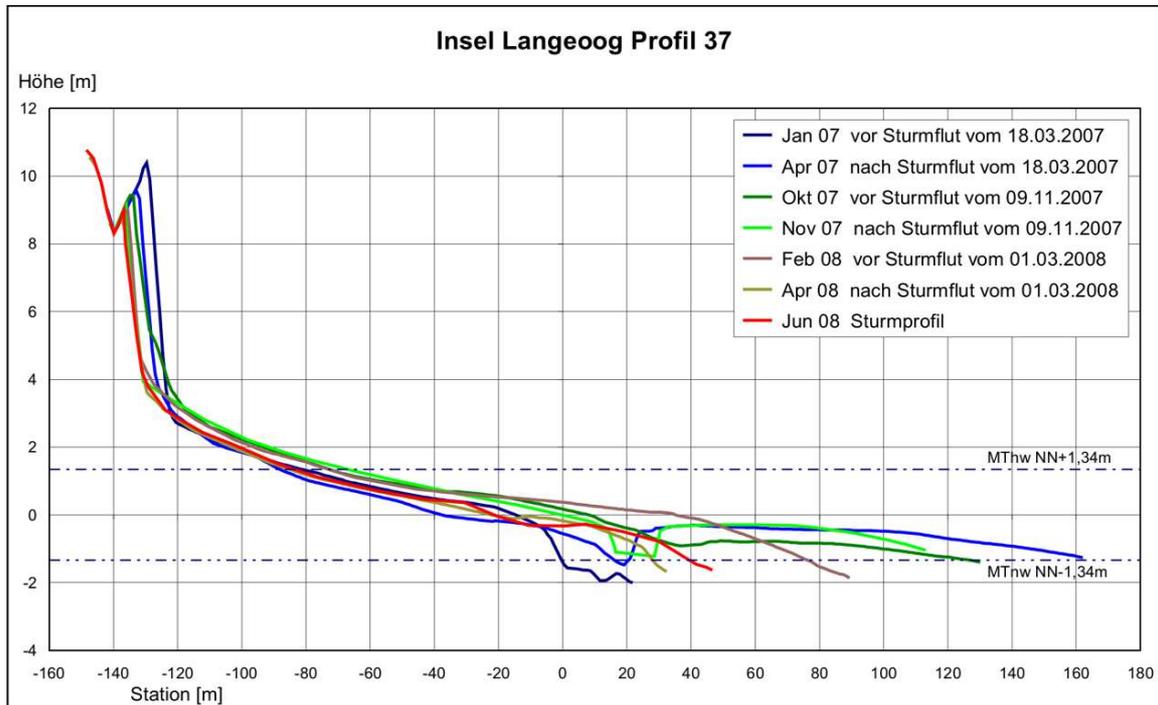


Abbildung 4.3: Messfeld Langeoog, Profil 37

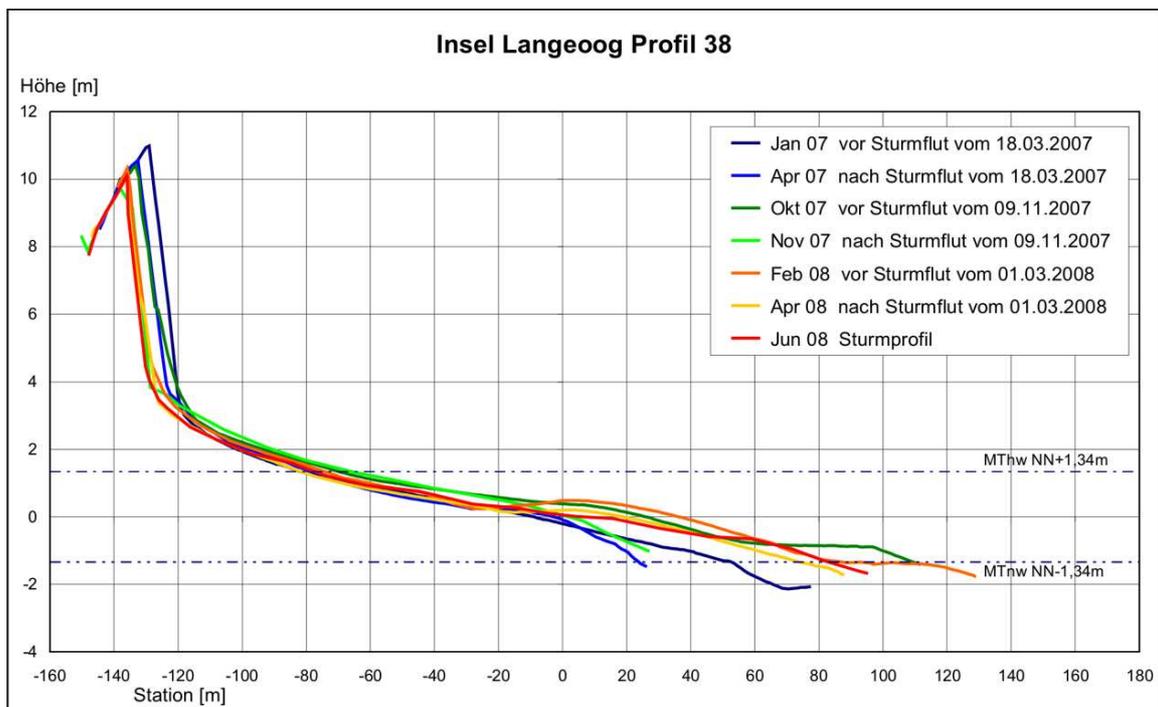


Abbildung 4.4: Messfeld Langeoog, Profil 38

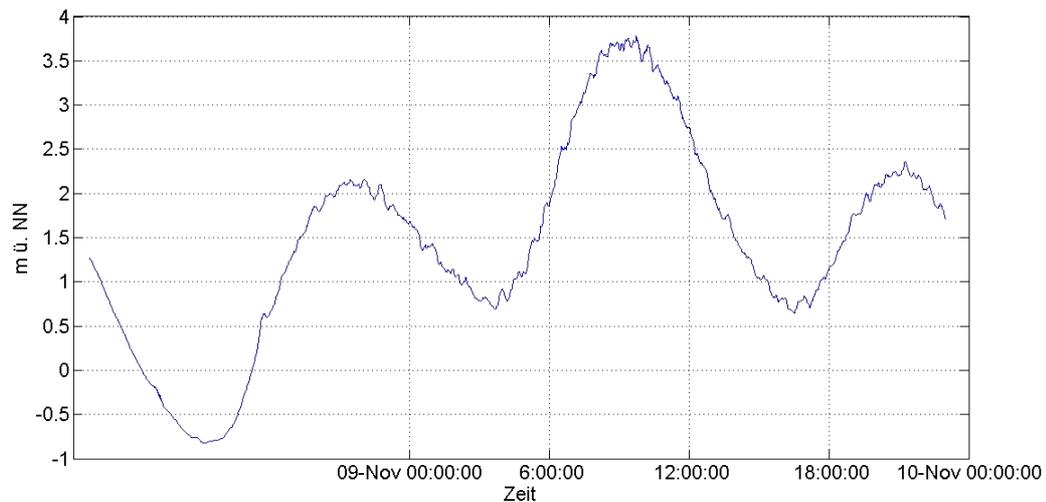


Abbildung 4.5: Verlauf des Wasserstands am Pegel Norderney vom 8./9.11.2007

4.2 Hydrodynamik

4.2.1 Sturmflut Tilo

Die Sturmflut Tilo lief am 9. November 2007 um 10:45 mit einem Scheitelwasserstand von 3,77 m ü. NN am Pegel Norderney auf (Abb. 4.5).

An der Messkette konnten bis dato lediglich Messdaten der Position Düneros4 (Mittelwasser (MW)-Linie) ausgewertet werden. Dies hat folgende Gründe:

- Die ADCP-Boje zur Übertragung der Daten an der Pos. 1 wurde abgerissen (siehe auch Kapitel Bewertung der Messkonfiguration)
- Die ADCP-Grundgestelle wurden durch die umfangreichen Umlagerungen in dem Strandprofil im Verlauf der Sturmflut vollständig mit Sand überdeckt. (siehe auch Kapitel Bewertung der Messkonfiguration)
- Das Log-A-Level-System Position Düne (Düneros5) fiel am 7.11.2007 aufgrund eines unbemerkten Rotorschadens aus. Der Schaden wurde erst bemerkt als die Batteriespannung und damit die Datenübertragung ausfiel. Das System konnte bis zum 9.11.2007 nicht wiederhergestellt werden.

Um 10.45 fiel auch das System an Messposition Düneros4/MW-Linie aufgrund von Wassereintritt aus. Daher existieren nur Daten bis zu diesem Zeitpunkt.

4.2.2 Position Düneros4 / MW-Linie

Mit Hilfe eines Videofilms konnten die gemessenen Wellenhöhen für einige Minuten in ihrer Größenordnung optisch nachvollzogen werden. Die Messung wie auch die Videoaufnahme zeigen, dass an Messposition Düneros4 / MW-Linie stark aufgestellte, nichtlineare und asymmetrische Wellen einer Höhe von etwa 3-4 m aufliefen. Die Messposition befand sich mitten in der ausgedehnten Brandungszone. Hier wird anschaulich wie hoch die Belastungen auf die Pfähle und die gesamte Konstruktion waren (Abb. 4.6). Die Messung

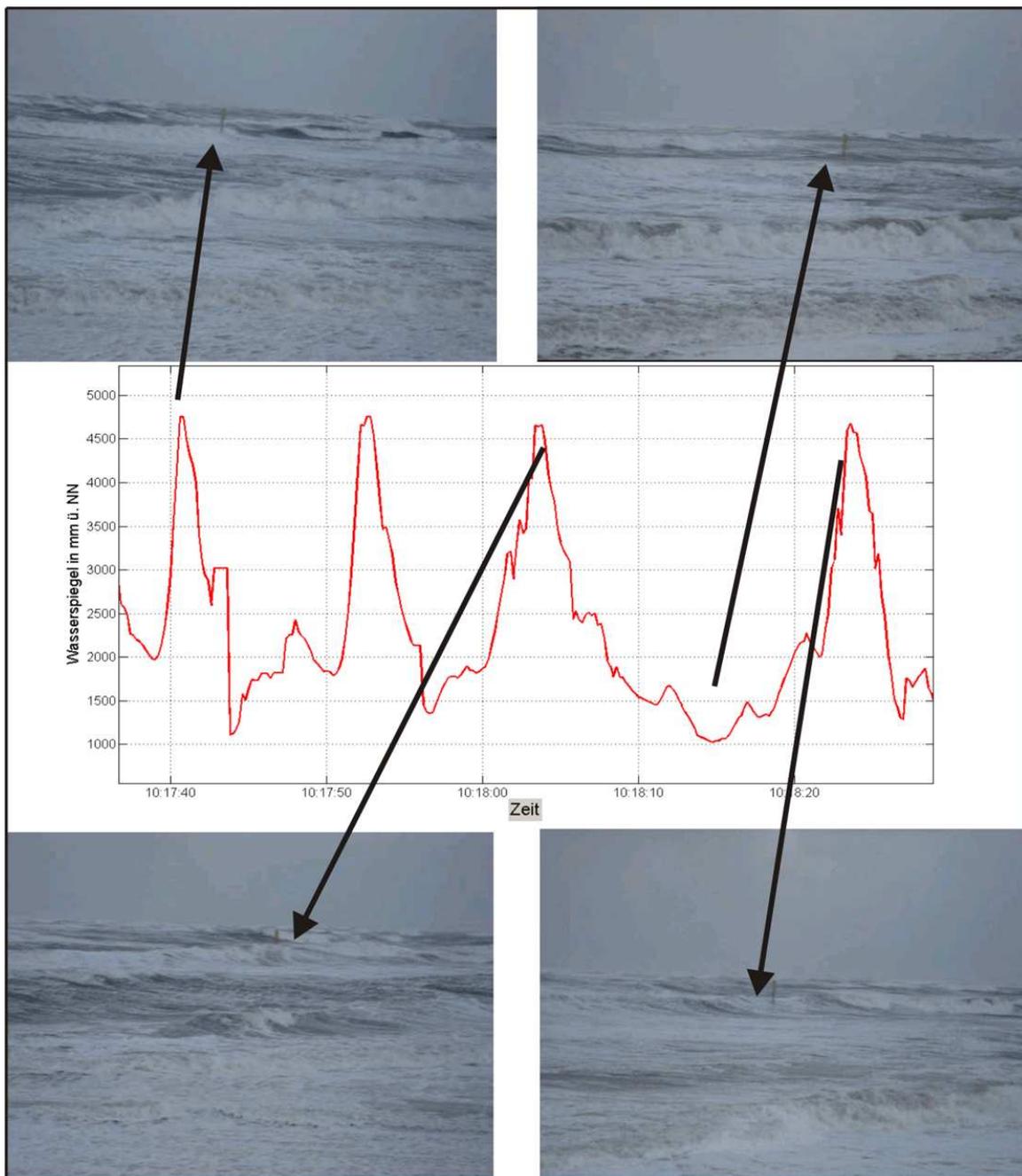


Abbildung 4.6: Standbilder des Videofilms mit dem Pfahl an Düneros4 / Messaufzeichnung der fotografierten Wellen

von drei Wellen und einem längeren Wellental sind hier mit 4 Standbildern des Videofilms dargestellt.

Der Verlauf des über 10-Minuten-Intervalle gemittelten Wasserstandes an Position Düneros4 zeigt einen Anstieg bis etwa 9:30 Uhr (Abb. 4.7). Danach fällt der Wasserstand schon wieder leicht ab.

Für die auflaufende Sturmflut ist eine Auswertung des Pegelschriebs im Zeitbereich mit jeweils 20-minütigem Zeitintervall erfolgt. Die signifikante Wellenhöhe H_s erreicht mit knapp über 4 m ihr Maximum um etwa 8:30 Uhr, während die mittlere Wellenperiode T_m jedoch erst um etwa 9:30 ihr Maximum mit $T_m = 10$ s erreicht (Abb. 4.8). Die

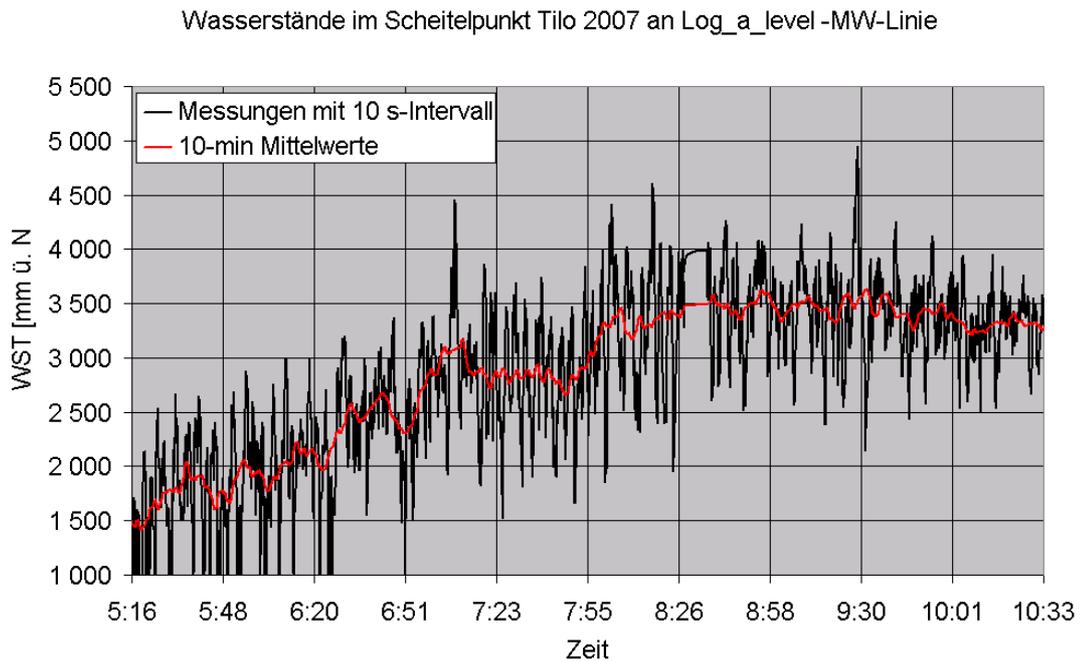


Abbildung 4.7: Wasserstandsverlauf an Position Düneros4 / MW-Linie

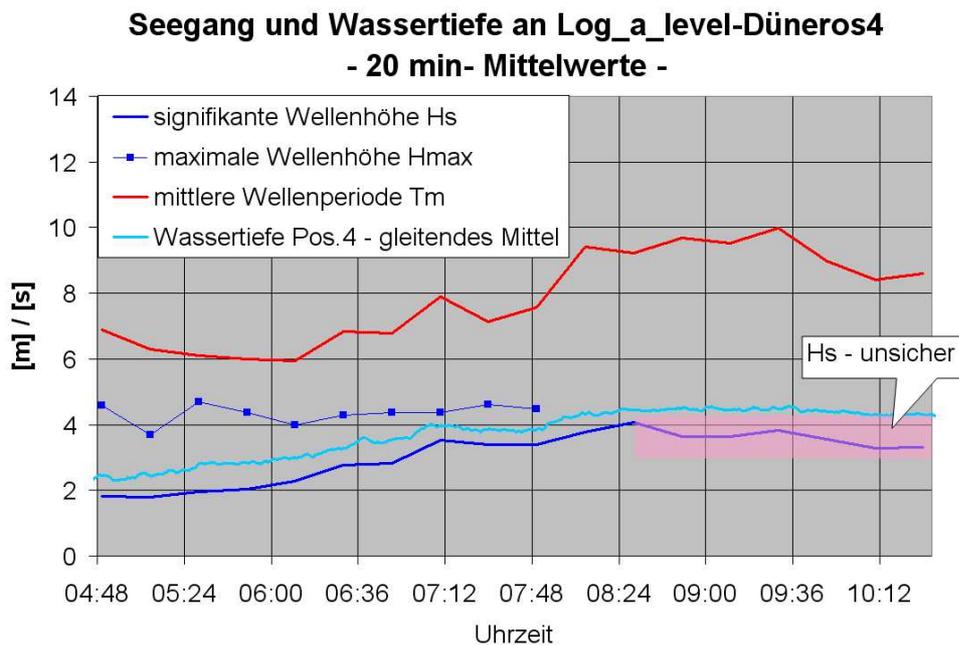


Abbildung 4.8: Verlauf von Wellenhöhe H_s , mittlerer Wellenperiode T_m und der Wassertiefe an Position Düneros4

Maximale Wellenhöhe ist anfänglich um etwa 60 Prozent höher als die Wellenhöhe H_s , der Unterschied nimmt jedoch mit steigendem Wasserspiegel ständig ab. Die maximale Wellenhöhe ist nur bis etwa 8:00 Uhr aufgetragen (Abb. 4.8).

Die Erklärungen für den zeitlichen Versatz zwischen den Maxima der Wellenperiode und der Wellenhöhe sowie dem Versatz der Eintrittszeiten der Sturmflutscheitelwasserstände zwischen der Messposition Düneros4 und dem Pegel Norderney läßt sich in den

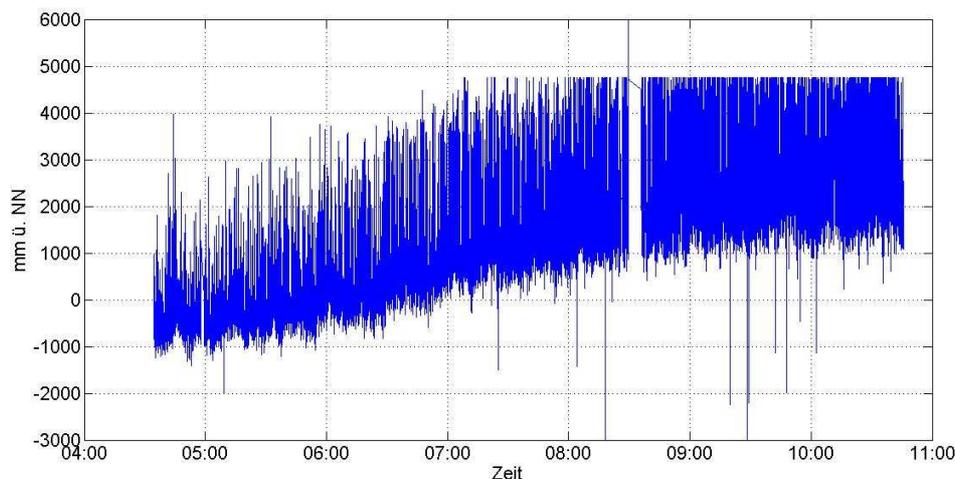


Abbildung 4.9: Rohdaten der Messposition MW-Linie/Düneros4 von 4:45 Uhr -10:45 Uhr

Rohdaten der Log-A-Level-Messungen finden (Abb. 4.9):

Deutlich ist eine obere Schranke in den Messwerten zu erkennen, an dieser Schranke werden die Messungen quasi abgeschnitten. So sind bis etwa 8:30 Uhr die Werte annähernd unbeeinflusst von dieser Schranke, im weiteren Verlauf mit steigendem Wasserstand werden immer mehr Wellenberge an dieser Schranke gekappt. Daher kommt auch die beschriebene Reduzierung des Unterschiedes zwischen H_s und H_{max} . Ursache hierfür ist die Höhenlage des Sensors und die Tatsache, dass es einen Bereich von 50 cm unterhalb des Sensors gibt, in dem aus Gründen der Messgenauigkeit keine Messungen stattfinden (sog. Blanking-Bereich). Das hat zur Folge, dass bei einer Höhe des Sensors von 5,38 ü. NN schon bei Wasserspiegellagen über 4,78 m keine Werte mehr erfasst werden können. Deswegen wird aufgrund des zu tief hängenden Sensors die Auswertung von Wellenhöhen und des Ruhewasserspiegels mit steigendem Wasserstand wegen des Abschneidens der oberen Spitzen während der Sturmflut vom 9.11.2007 ab etwa 8:30 Uhr zunehmend unsicher. Unbeeinflusst bleibt hingegen die Auswertung der Wellenperioden.

4.2.3 Datenfilter für die Log-A-Level-Geräte

Bei Messung von Wellen in der Brandungszone, bzw. allgemein bei brechenden Wellen treten infolge der Lufteinschlüsse im Wellenkamm immer Unsicherheiten bei der Definition der Wasserspiegellage auf. Das Log-A-Level-System blendet hier in der Regel einfach die Schaumkronen der Wellen aus und liefert als Signal einen gleichbleibenden Wert für die Zeit des Schaumbrecherdurchgangs. Dieses Vorgehen ist aus messtechnischer Sicht nachvollziehbar, allerdings verhält sich das resultierende Signal bei der Auswertung im Zeitbereich und bei linearen Analysen ungünstig, sodass ein Datenfilter für die Rohdaten der Log-A-Level-Systeme entwickelt wurde.

Der Filter hat die Eigenschaft, die Plateaubereiche der Schaumbrecherdurchgänge durch stetig verlaufende, graduell gekrümmte Datenverläufe zu ersetzen, wie man an dem Ausschnittsbeispiel an vier Wellen gut erkennen kann (Abb. 4.10).

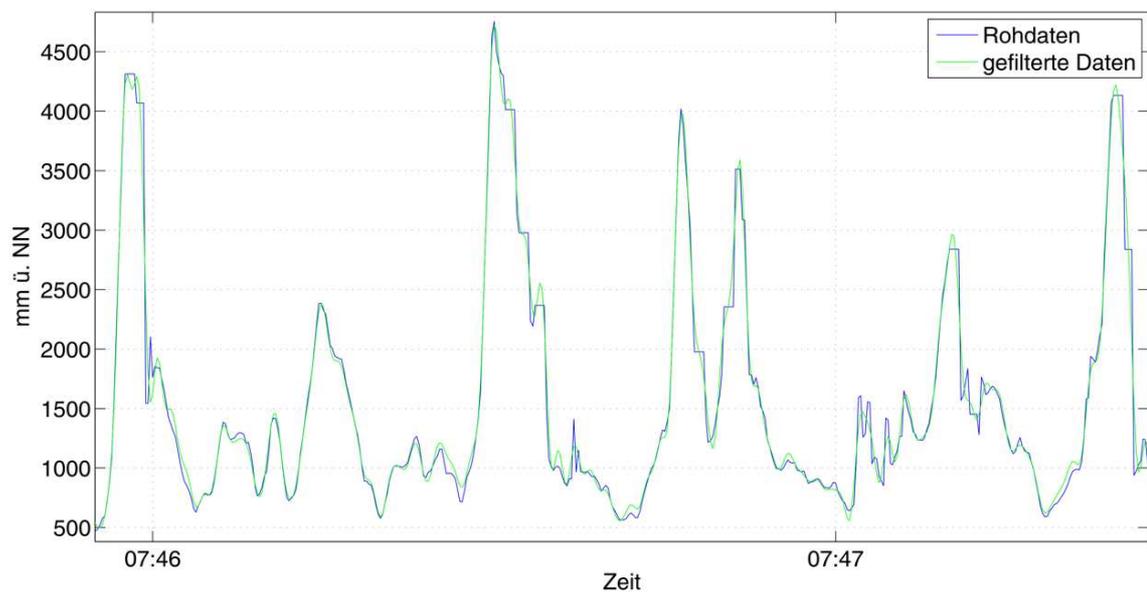


Abbildung 4.10: Beispiel für Rohdaten und gefilterte Daten des Log-A-Level-Systems an Düne-ros4

Kapitel 5

Bewertung der Messkonfiguration

5.1 Konfiguration während der Pilotphase

Die grundsätzliche Konzeption der Messkette Norderney sah zur Erfassung des auf den Strand auflaufenden Seegangs drei Messpositionen in 10 m, 5 m und 2 m unter dem Wasserspiegel vor, die mit ADCP-Messgeräten vom Grund nach oben messend sowohl den Seegang aufzeichnen als auch die Strömung über möglichst die gesamte Wassersäule erfassen sollten. Im Bereich des nassen Strandes und oberhalb von MThw kurz vor der Dünenkette sollte der Seegang von oben mit Ultraschall-Wellenpegeln erfasst werden.

Die Auswahl der Mess-Sensoren wurde vor allem durch die zu erwartenden Seegangsbedingungen bei Sturmfluten gewählt, wobei brechende Wellen von jenseits der 10m Tie-



Abbildung 5.1: Gestell für die ADCPs an den Standorten Düneros Pos. 2 und Pos. 3, hier noch ohne die Betonauffüllung im unteren Ring



Abbildung 5.2: Einsatz von Tauchern und Side-Scan-Sonar unter Mithilfe der DLRG am Profil Norderney

fenlinie bis zum Dünenfuß erwartet werden müssen und damit die Auswahl an möglichen Sensoren beschränkt ist. Daneben sind Umformungen des Strandprofils insbesondere bei Sturmfluten zu erwarten, die für die ADCP-Sensoren die optimale Lage - am Boden, um möglichst die gesamte Wassersäule zu erfassen - nicht zulassen. So wurde ein Gestell entwickelt, das an die Erfahrungen, die im Nordweststrandbereich des Nordwestkopfes von Norderney anknüpfte (Abb. 5.1). Die Messebene der ADCPs lag ungefähr in 80 cm Höhe, wobei der Sensor in einem großzügig dimensionierten pyramidenförmigen Gestell eingebunden wurde, das auch Belastungen aus örtlichen Fischereiaktivitäten überstehen sollte. Zudem wurden stabile Ösen angebracht, um die Gestelle nach starken Seegangseignissen mit entsprechenden Umformung der Strandprofils bergen zu können. In diesem Fall sollten die Daten ausgelesen und das Gestell, angepaßt an das neue Profil, erneut ausgebracht werden.

Am 9. November 2007 um 10:45 trat die erste Sturmflut des Winters mit einem Scheitelwasserstand von 8,77m PN am Pegel Norderney ein. Damit wurde die Planung hinfällig, einen optimalen Kompromiss aus Ansprüchen an Datenumfang, Aufwand und Robustheit in einem allmählichen Verbesserungsprozess zu erlangen. Die bei dieser Sturmflut auftretende erhebliche Seegangenergie führte zu folgenden Schäden an der Messkette:

- Am 9. November 2007 um 10:45 trat die erste Sturmflut des Winters mit einem Scheitelwasserstand von 8,77m PN am Pegel Norderney ein. Damit wurde die Planung hinfällig, einen optimalen Kompromiss aus Ansprüchen an Datenumfang, Aufwand und Robustheit in einem allmählichen Verbesserungsprozess zu erlangen. Die bei dieser Sturmflut auftretende erhebliche Seegangenergie führte zu folgenden Schäden an der Messkette:
- Die Boje zur Übertragung der Daten an der Pos. 1 wurde abgerissen (Dies war bei sehr schweren Seegang mit brechenden Wellen als möglich betrachtet worden. Es waren deshalb Vorkehrungen getroffen worden, dass dies nicht planmäßig zu einem Ausfall der Messeinrichtung führen sollte. Wichtig war vor allem die Sicherstellung der Bereitschaft dieser Position vor einem Sturmflutereignis). Die Boje wurde am Strand von Baltrum geborgen.
- Obwohl mit Hinblick auf die zu erwartenden Umlagerungen im Vorstrandbereich für dieses Vorhaben das Profil im Hinblick auf eine möglichst geringe Variation



Abbildung 5.3: Leichte Schrägstellung des Messpfahls nach der Sturmflut. (Aufnahmedatum/-uhrzeit: 2007:11:16 10:57:08)

im Vorstrandbereich ausgewählt wurde, sind die ADCP-Grundgestelle durch die umfangreichen Umlagerungen in dem Strandprofil im Verlauf der Sturmflut vom 9.11.2007 vollständig mit Sand überdeckt worden (Abb. 4.2 auf S. 25). Eine Bergung der Messgeräte direkt nach der Sturmflut scheiterte. Daraufhin wurde entschieden, für die Bergung auf die Umformung des Strandprofils auf das Sommerprofil zu warten.

- Die Bemühungen zur Bergung der ADCP-Stationen haben wegen der starken Umlagerung trotz aller Anstrengungen mit dem Einsatz von Side-Scan-Sonar und Tauchern unter Mithilfe der Ortsgruppe Norderney der DLRG (Abb. 5.2) noch nicht zum Erfolg geführt. Eine Auswertung der hochinteressanten Daten dieser Stationen wird nachgeholt, sobald die Geräte von ihren bekannten aber zur Zeit nicht zugänglichen Positionen geborgen worden sind.
- Die Nichtlinearität der Wellen führte an der Pos. 4 (Ultraschall-Sensor) dazu, dass einzelne sehr hohe Wellen um Tidehochwasser in ihrem Berg über den abtastbaren Bereich des Sensors aufliefen. Die Umformung des Profils führte zu einer geringeren Einbindetiefe des eingespülten Pfahls, wodurch bei der aufgetretenden Seegangsbelastung eine – allerdings geringe – Neigung des Pfahls verursacht wurde (Abb. 5.3).

5.2 Empfehlungen zu den eingesetzten Messverfahren

5.2.1 Vermessung

Die gewählten Messmethoden und die zeitlich dicht aufeinander folgenden Vermessungen der ausgewählten Inselabschnitte und Inselprofile bilden eine verdichtete Datengrundlage für die Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur vorsorglichen Ermittlung der Dünenerosion bei Eintritt des Bemessungswasserstandes und dem Auftreten des Bemessungsseegangs. Die aus den Projektmitteln beschafften GNSS-Vermessungssysteme erfüllen gerade in Hinblick auf ihre Funktionalität und Robustheit vollständig die Erwartungen. Eine Erfassung der beschriebenen Inselabschnitte verlangt gerade in den Sturmflutmonaten eine besonders hohe Zuverlässigkeit der Messtechnik, Systemausfälle konnten bisher nicht verzeichnet werden.

5.2.2 ADCP-online

In der Messkette Norderney wurde das ADCP-Gerät der Fa. RDI über eine Boje mit einer autonomen Stromversorgung mit Solarpaneele und mit einer Funkverbindung ergänzt. Die Boje wurde an zwei Tonnensteinen befestigt, sodass eine Ausrichtung der Solarpaneele nach Süden erreicht wurde. Diese Anordnung (Abb. 3.5) ist in der Praxis nur mit hohem Aufwand an dem exponierten Standort bei 10 m Wassertiefe auszubringen. Weiterhin wird durch die schräge Zugrichtung der Seile ein kleinerer Winkel vorgegeben, der zu einer stärkeren horizontalen Kraft auf die Tonnensteine führt. Es wird daher empfohlen die Ausrichtung der Boje nach Süden aufzugeben und eine richtungsunabhängige Anordnung der Solarpaneele zu installieren. Die Mehrkosten für die zusätzlichen Solarpaneele sind leicht mit denen der aufwendigen Ausbringung und des zusätzlichen Verankerungsseils zu verrechnen. Zudem sollte für die einfache Verbindung ein schwererer Tonnenstein gewählt werden und auch an eine Dämpfung der Verankerung der - inklusive Technik und Akkus - etwa 1,5 t schweren Boje gedacht werden. Auch die Form der Boje sollte schlanker sein und nur graduelle Übergänge ohne Knicke aufweisen, die sich strömungsgünstig auswirken.

Es ist trotz der vorgeschlagenen Maßnahmen fraglich ob eine solche Boje überhaupt unter Sturmflutbedingungen Stand halten würde. Antenne und Solarpaneele bilden zudem fragile Angriffspunkte die konstruktiv nur schwer in den Griff zu bekommen sind. Eine bessere Lösung wäre das Einspülen eines Pfahls der jedoch, falls er zur Datenübertragung per Funk genutzt werden sollte, einen Durchmesser von etwa 60 cm aufweisen müßte.

5.2.3 AWAC-Systeme

Es hat sich gezeigt, dass die Sedimentumlagerungen im Schorrebereich beträchtlich sind und eine Gefahr für die Messgeräte darstellt. Das Wiederauffinden der AWAC-Messsysteme im Falle einer kompletten Einsandung könnte durch die Befestigung der Geräte an einem Pfahl verhindert werden. Dabei müßte der Pfahl nicht so hoch über dem mittleren Wasserspiegel ragen wie die Log-A-Level-Stationen, da die Messsensoren der AWAC-Systeme prinzipbedingt unter Wasser liegen.

5.2.4 Log-A-level-System

Die Qualität der Messergebnisse der mit 3 Sensoren ausgestatteten Systeme ist sehr gut, was sich in den dargestellten Messergebnissen zeigt. Selbst bei widrigsten Bedingungen bei Starkregen und Gischteinfluss ist die Fehlerrate in den Rohdaten weit unter 1 Prozent. Bei Weißwasser in der Brandungszone sind die Zeiträume der Brecherkrone sehr kurz, der Messalgorithmus findet hinter dem Wellenkamm wieder sehr schnell eine nicht diffusiv reflektierende Wasseroberfläche. Das Messprinzip ist daher für die Brandungszone geeignet.

Das Log-A-Level Messsystem ist mit einer autonomen Stromversorgung über Windrotoren ausgestattet. Schon vor der Sturmflut fiel der Rotor an der Messposition Düneros5 / Düne aus. Während der Sturmflut ist auch der Rotor an Messposition Düneros4/ MW-Linie ausgefallen. Schon in früheren Einsätzen des Messsystems im Wattenmeer zeigte sich, dass die Belastungen auf die Rotorblätter, dessen Steuerung und den internen Leistungswiderständen bei Starkwind enorm sind. Aus diesem Grund sind an den Positionen Düneros4 und Düneros5 spezielle Starkwindrotoren eingesetzt worden. Trotzdem erlitten die Rotorblätter während der Sturmflut vom 9. Nov. Schaden. Mittlerweile sind an diesen Systemen die Rotorblätter ausgetauscht worden und durch nochmals verstärkte Rotorblättern ersetzt worden.

Die im Projekt verwendeten Stahlpfähle an Messposition Düneros4 und Düneros5 wurden von der MS Burchana aus in den Sandboden eingespült. Der Pfahl an Messposition Düneros4 hatte eine Einbindetiefe von 4 m bei einer Auskragung von etwa 7.50 m bis zur Wartungsplattform (Abb. 3.9). Höhere Auskragungen waren bei dem zu erwartenden Seegang mit diesen Pfählen nicht möglich. Selbst diese große Einbindetiefe konnte nicht verhindern, dass dieser Pfahl im Verlauf der Sturmflut Tilo durch Seegangsbelastung schief gestellt wurde (Abb. 5.3).

Bei einem Wasserstand von 4.75 m – ca. 0.5m unter dem Bemessungswasserstand – herrscht an Position Düneros4 eine Wassertiefe von ca. 5.75 m und es sind dann dort Wellenhöhen H_s von etwa 5.25 m und eine maximale Wellenhöhe von etwa 6.25 m zu erwarten (Abb. 4.8). Dies bedeutet, dass der Sensor 12.5 m über dem Gelände angebracht werden müsste um auch beim höchsten momentan zu erwartenden Wasserstand die höchsten Wellenberge zu messen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind für die Messsaison 2008/2009 speziell an der Einspannstelle verstärkte Messpfähle eingespült worden, die eine maximale Sensorhöhe von 12 m über Gelände ermöglichen. Einerseits liegt dieser Wert 0.5 m niedriger als für die maximal zu erwartende Welle notwendig; andererseits stellt diese Lösung aber einen guten Kompromiss dar, um auch bei geringeren Wassertiefen bei einem maximalen Abtastbereich von 10 m für die Log-A-Level-Systeme die unteren Wellentäler zu erfassen. Eine Gefährdung des Messensors ist nicht gegeben, da dieser um den Blanking-Bereich von 50 cm höher liegt.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Bisher erfolgt -von Ausnahmen abgesehen- die Prüfung der Sturmflutsicherheit nach empirischen Gesichtspunkten, die sich in der Regel an Erfahrungen über Erosion bei Sturmfluten orientieren. Angesichts der Bedeutung des Sturmflutschutzes durch Dünen für die Sicherheit einer großen Zahl von Menschen und erheblicher Werte, aber auch wegen des Erfordernisses, die verfügbaren Mittel für den Insel- und Küstenschutz optimal einzusetzen, ist dieser Zustand als äußerst unbefriedigend anzusehen. Zur Etablierung von quantitativen Methoden muss eine erweiterte Datenbasis der Bemessungsgrundlagen für die Dünenerosion infolge Sturmflutwasserstände und Sturmflutseegang geschaffen werden. Im Forschungsprojekt DÜNEROS wurden im Rahmen der Pilotphase 2 Profile an an den seeseitigen Stränden der Inseln Norderney und Langeoog vor und nach Sturmfluten vermessen und eine etwa 3 km lange hydrologische Messkette zur Seegangs- und Wasserstandsmessung untersucht. Im Vorhaben wurden Messsensoren und Installationen erprobt, um für eine permanente Installation einer Messkette zur Erfassung der Belastung von Randdünen die notwendigen Grundlagen zu ermitteln.

Die dabei durchgeführten Profilvermessungen machten deutlich, welche hohe Umlagerungen im Strand- und Schorrebereich durch Sturmfluten verursacht werden. Kleinräumige Transport- und Formänderungsprozesse sind während Sturmflutereignisse besonders bedeutend. Die im Schorre- und Strandbereich ablaufenden Prozesse der Riff- und Rinnenverlagerungen stehen in direkter Wechselwirkung mit dem Seegangsklima vor Schutzdünen und Bauwerken. Umlagerungsprozesse sind bei Extremereignissen insbesondere eine Folge des seegangsinduzierten Sedimenttransports. Die Vermessungsdaten lassen Abschätzungen der Transportraten zu und bilden eine Datengrundlage für morphologische Modelluntersuchungen.

Die gewählte hydrologische Messinfrastruktur erwies sich für den Einsatz in Sturmflutbedingungen in der exponierten Lage als anfällig, wobei hier vor allem die Vorsorge vor Verdriftung und Einsandung zu nennen ist. Erfahrungen aus dem Vorstrandbereich von Norderney, der wegen des vorgelagerten Riffbogens als geschützter anzusehen ist, konnten nicht auf das Messprofil von DÜNEROS übertragen werden. Als Grundidee für die Messung unter Sturmflutbedingungen hat sich während der Projektarbeiten die starre Befestigung der Geräte an fest eingespülte Pfähle durchgesetzt. Neben einer Verdriftungs- und Verlustversicherung bietet diese Variante eine stabile Ausrichtung der Messgeräte. Insgesamt ist das Einspülen von Standardpfählen auch in Wassertiefen von 4-5 m in der Praxis leichter zu bewerkstelligen, als das Auslegen von sehr schweren Verankerungssteinen bzw. Doppelverankerungssystemen.

Die Stromversorgung der Log-A-Level-Systeme über Windrotoren, die im Wattgebiet von Norderney erfolgreich erprobt wurde, erwies sich an den exponierten Standorten ebenfalls als zu anfällig. Es traten Schäden an den zwei handelsüblichen Systemen auf. Es wird nun eine verstärkte Version von Rotorblättern an einer Messposition untersucht. Alternativ ist jedoch auch die Bestückung der Stationen ohne Generatoren denkbar. In einem Stromsparbetrieb - wie er dann langfristig eingestellt werden könnte - und einem zusätzlichen Akku wären dann allerdings Wartungsintervalle von 4-6 Monaten nötig.

Die hydrologischen Messsonden selbst arbeiteten in der Testphase ohne Beanstandung und lieferten qualitativ hochwertige Daten. Für die Log-A-Level-Systeme ist für die Ausblendung von Weißwasserphasen während brechender Wellen ein Filter entwickelt worden, der es ermöglicht, diese Bereiche physikalisch plausibel aufzufüllen und so den Pegelschrieb einer linearen Analyse besser zugänglich zu machen.

Die Erkenntnisse der Pilotphase sind bereits in die Verbesserung der Geräteauslegung eingeflossen, wobei eine stärkere Wichtung auf Einbau, Zugänglichkeit und Zuverlässigkeit der Datenerfassung unter schwersten Randbedingungen zu Lasten einer optimalen Erfassung der Hydrodynamik in der gesamten Wassersäule gewählt wurde.

Kapitel 7

Literaturverzeichnis

1. Arends, F. (1833): Physische Geschichte der Nordsee-Küste und deren Veränderungen durch Sturmfluthen seit der Cymbrischen Fluth bis jetzt. Band 1 und 2, Emden 1833
2. Bakker, W.T.; Vrijling, H. (1981): Probabilistic Design of Sea Defences. *Proc. 17th Int. Conf. Coast. Engg.* Sydney/Australia. Am. Soc. Civ. Engs., New York.
3. Blum, H.; Thorenz, F. (2005): Risk Assessment for the Island of Langeoog - COM-RISK Subproject 9. *Die Küste*, H. 70
4. Dette, H.H.; Neue, J.; Peters, K. (1994): Numerische Modellierung des Küstenabbruchs an der Westküste der Insel Sylt. *Berichte Leichtweiß-Institut für Wasserbau*. Nr. 778, Technische Universität Braunschweig
5. Dette, H.H.; Neue, J.; Ladage, F. (1998) Kalibrierung des Dünenabbruchmodells NewDune am Beispiel der ostfriesischen Inseln Borkum, Juist, Langeoog und Wangerooge. *Bericht Nr. 838*, Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, November 1998
6. Dirks, H.; Stephan, H.-J. (2008): Situation der Strände und Dünen auf den Ostfriesischen Inseln -Dokumentation der Peilungen und Vermessungen 2007-. *Untersuchungsbericht 01/2008*. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz –Forschungsstelle Küste–
7. Edelman, T. (1969): Dune Erosion during Storm Conditions. *Proc. 11th Int. Conf. Coast. Engg. Am. Soc. Civ. Engs.*, New York.
8. Hagen, G. (1863): Handbuch der Wasserbaukunst. 3. Theil: Das Meer. Verlag von Ernst & Korn. Berlin
9. Homeier, H. (1976): Die Auswirkungen schwerer Sturmtiden auf die ostfriesischen Inselstrände und Randdünen. *Jber. 1975 Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz*, Bd. 27
10. Kriebel, D.; Dean, R. G. (1993): Convolution method for time-dependent beach-profile response, *J. Waterway Port Coast. Ocean Eng.*, vol. 119, no. 2, pp. 204-227

11. Neue, J. (2005): Bemessung der Landesküstenschutzdünen Mecklenburg Vorpommerns mit variablen Wasserständen. *Abschlussbericht für das Staatliche Amt für Umwelt und Natur Rostock*, Ingenieurbüro Neue, 30. Oktober 2005
12. Niemeyer, H.D. (1985): Zur rechnerischen Ermittlung von Sturmprofilen an Randdünen und Stränden. *Jber. 1984 Forschungsstelle Küste*, Bd. 36
13. Niemeyer, H.D. (1990): *Morphodynamics of tidal inlets. CEEC (Civ. Eng. European Courses-Progr. o. EC Continuing Education, Syll.*. Delft Univ. o Techn.
14. Niemeyer, H.D.; Eiben, H.; Rohde, H. (1996): History and Heritage of German Coastal Engineering. In: N. Krauss: *History and Heritage of Coastal Engineering*. Am. Soc. Civ. Eng., New York
15. Roelvink, D.; Reniers, A.; van Dongeren, A.; Thiel de Vries, J. van; Lescinski, J.; Walstra, D.-J. (2007): Modeling Hurricane Impacts on Beaches, Dunes and Barrier Islands. *Proc. 10th Waves Workshop*. Oahu/Hawaii
16. TAW (Technische Adviescommissie voor de Watekeringen) (1972): *Richtlijn voor de Berekening van Duinafslag tengevolge van een Stormvloed*. Staatsuitgeverij, s-Gravenhage
17. Van de Graaff, J. (1977): Dune Erosion during a Storm Tide. *Coast. Engg.* Vol. 1, No. 2
18. Van de Graaff, J. (2005): Persönliche Kommunikation, TU Delft.
19. Van Gent, M.R.A.; Coefeld, E.M.; Walstra, D.J.R.; Van de Graaff J.; Steetzel, H.J.; Boers, M. (2007): Dune Erosion Test to Study the Influence of Wave Periods. *Proc. 30th Int. Conf. Coast. Engg.* San Diego, Ca./USA. Am. Soc. Civ. Eng., Reston, Va./USA
20. Vellinga, P. (1979): Movable Bed Model Tests on Dune Erosion. *Proc. 16th Int. Conf. Coast. Engg. Honolulu, Hi./USA*. Am. Soc. Civ. Eng., New York. Vellinga, P. (1982): Beach and Dune Erosion during a Storm Surge. *Coast. Engg.* Vol. 6, No. 4
21. WL (Waterloopkundig Laboratorium) (1974): Zeewering Nordzeekust Ameland. *Rapp. R 587*
22. WL (Waterloopkundig Laboratorium) (1978): Duinafslag ten Gevolge van de Stormvloed op 3 Januari 1976 - Toetsing van de voorlopige Richtlijn. *Versl. Onderzoek R 587*
23. WL (Waterloopkundig Laboratorium) (1982): Rekenmodel voor de Verwachting van Duinafslag tijdens Stormvloed. *Versl. Onderzoek M 1263-Deel IV*