



UNIVERSITÄT ROSTOCK

Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau

# **HoRisK - B: Belastungen von Küstenschutzanlagen und Konsequenzen des Versagens im Bereich der Ostseeküste**

Formeller Teil

**Zwischenbericht 2011**

25. April 2012

<b>Förderkennzeichen:</b>	<b>03KIS079</b>
<b>Zuwendungsempfänger:</b>	<b>Universität Rostock</b> <b>Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät</b> <b>Institut für Umweltingenieurwesen</b> <b>Fachgebiet Küstenwasserbau</b>
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>	<b>01.11.2009 bis 30.04.2013</b>
<b>Berichtszeitraum:</b>	<b>01.01.2011 bis 31.12.2011</b>

## 1 Einleitung

Die Umsetzung der „Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken“ ist auch für die sturmflutgefährdeten Küstengebiete an der deutschen Nord- und Ostseeküste von großer Bedeutung: Insgesamt werden ca. 12.000 km<sup>2</sup> niedrig liegende Küstengebiete mit 2,4 Mio. Einwohnern durch Küstenschutzanlagen vor Sturmfluten geschützt. Für die Umsetzung der Richtlinie können die für den Bereich des Hochwasserschutzes (im Binnenland) entwickelten Methoden nur bedingt angewendet werden.

Ziel des Verbund-Forschungsvorhabens HoRisk ist die Ableitung von küstenschutzbezogenen Ansätzen und Methoden für die anwendungsorientierte Schadens- bzw. Risikoanalyse als Grundlage für die Erarbeitung von Hochwassergefahrenkarten, Hochwasserrisikokarten und Hochwasserrisiko-Managementplänen. Die im Projekt entwickelten Ansätze sollen am Beispiel ausgewählter typischer Küstenabschnitte in Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern angewendet werden. Diese Methodik für eine Schadens- bzw. Risikoanalyse kann als eine wesentliche Grundlage für die Umsetzung der Hochwasserrichtlinie für den Küstenbereich an der deutschen Nord- und Ostseeküste dienen.

## 2 Forschungsansatz

Die im Forschungsvorhaben HoRisk zu entwickelnden Methoden und Verfahren sind auf Anwendungsorientierung und Umsetzbarkeit fokussiert. Grundlagen für die Untersuchungen sollen daher soweit möglich verfügbare Daten für den Küstenbereich bilden – neu abgeleitete Daten werden nur in Ausnahmefällen generiert und verwendet.

Im Rahmen des Projekts werden alle Bausteine von Schadens- bzw. Risikoanalyse-Verfahren entsprechend der Zielsetzung des Vorhabens berücksichtigt. Die Projektbearbeitung erfolgt in 9 Arbeitspaketen (AP) die jeweils unter der Federführung einer Arbeitsgruppe stehen. Im Folgenden werden die Arbeitspakete und der jeweils federführend verantwortliche Projektpartner genannt. Der aktuelle Stand der Arbeiten ist im Abschnitt 5 beschrieben.

**AP 0:** Definition von Begriffen im Zusammenhang mit Schadens- und Risikoanalyse-Verfahren (Federführung RWTH Aachen)

**AP1:** Vergleichende Darstellung und Diskussion der verfügbaren Schadens- bzw. Risikoanalyse-Verfahren und Küstenschutzstrategien (Federführung RWTH Aachen)

**AP2:** Belastungen (Federführung Universität Rostock)

**AP3:** Versagensmechanismen und Versagenswahrscheinlichkeiten (Federführung RWTH Aachen)

**AP4:** Konsequenzen des Versagens – Überflutung (Federführung NLWKN)

**AP5:** Schadenspotentiale und Schäden (Federführung RWTH Aachen)

**AP6:** Risikoanalyse (Federführung RWTH Aachen)

**AP7:** Schadens- und Riskominimierung (Federführung NLWKN)

**AP8:** Anwendung auf ausgewählte Küstengebiete in Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein (Federführung RWTH Aachen)

Die Universität Rostock ist für das AP2 federführend verantwortlich. In den Arbeitspaketen 0, 1, 5, 6, 7 und 8 beteiligt sich die Universität Rostock im Rahmen ihrer Projektverantwortung ebenfalls mit. In AP3 werden durch die Universität Rostock ostseespezifische Anlagentypen und Fragestellungen bearbeitet und in AP4 bzw. AP8 Modellrechnungen (u.a. ebenfalls zu ostseespezifischen Fragestellungen) durchgeführt.

### 3 Projektorganisation

An der Universität Rostock wurden für die Bearbeitung zwei **Projektstellen** zum 01.05.2010 besetzt. Frau Dipl.-Ing. Dörte Salecker bearbeitet schwerpunktmäßig den Projektteil AP2, Frau M.Sc. Angelika Gruhn ist im Wesentlichen für AP3 und AP4 zuständig.

Der **Verwertungsplan** bleibt gegenüber dem Projektantrag unverändert. Die praktische Verwertung der erzielten Forschungsergebnisse ist zum einen durch die Fokussierung der im Projekt entwickelten Methoden auf Anwendungsorientierung und Umsetzbarkeit und zum anderen durch die intensive Mitarbeit der zuständigen Küstenschutzbehörden (NLWKN, LKN, StALU) gesichert.

#### 3.1 Projekttreffen 2011

Im Berichtszeitraum wurden vier Treffen mit den Projektpartnern durchgeführt.

Am 27.01.2011 fand in Aachen das **zweite Statusseminar** im Projekt HoRisk statt.

Am 26.01.2011, dem Tag vor dem Statusseminar, fand eine Vorbesprechung mit Mitarbeitern der projektinternen Gruppe (NKWN, RWTH Aachen, Universität Rostock) statt. Nachdem zunächst Organisatorisches geklärt wurde, wurde über den Fortschritt der Vergabe von Unteraufträgen informiert. Die RWTH Aachen informierte über die abschließenden Ergebnisse aus dem Arbeitspaket 0 „Definition von Begriffen im Zusammenhang mit Schadens- bzw. Risikoanalyseverfahren“. Den Hauptteil dieser Vorbesprechung nahm die Vorstellung der Bearbeitungsstände der Arbeitspakete durch die jeweiligen bearbeitenden Projektpartner sowie die Diskussion der Ergebnisse ein. Ein weiterer Schwerpunkt dieser Besprechung waren Erörterungen zur Datenverfügbarkeit und Zusammenstellung, der im Projekt benötigten Daten. Bedingungen für die Verteilung bzw. Herausgabe der Daten an die Projektpartner wurden konkretisiert.

Auf dem **Statusseminar** am 27.01.2011 waren neben der projektinternen Gruppe auch Mitarbeiter des Staatlichen Amtes für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg (StALU MM), des Ingenieurbüros HKV Hydro Kontor sowie der Landwirtschaftskammer Niedersachsen und des Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN) vertreten. Auf dem Statusseminar wurde der Projektgruppe die Zusammensetzung der projektbegleitenden Gruppe bekannt gegeben. Die Bearbeitungsstände der jeweiligen Arbeitspakete wurden den Projektpartnern vorgestellt und in der erweiterten Projektgruppe diskutiert. Erneut ist über die Projektgebiete diskutiert worden. Bestehende Gebiete wurden bestätigt. Neu hinzugekommen ist das Gebiet „Pellworm“.

Das zweite Jahrestreffen 2011 der projektinternen Gruppe fand am 14. und 15.07.2011 (**4. Projekttreffen**) in Norden statt. Die Projektpartner wurden über den Bearbeitungsstand der einzelnen Arbeitspakete unterrichtet. Es fand eine intensive Diskussion über die im Projekt benötigten Daten und deren Beschaffung statt. Von der Universität Rostock wurde einer Methode für die statistische Auswertung von Wasserstandsdaten und die Ableitung von Ganglinien für die Nordsee vorgestellt und diskutiert. Weiterhin wurde eine Methode zur Typisierung von potentiellen Überflutungsflächen an der Ostsee vorgestellt. Abschließend wurde das erste Arbeitstreffen der Projekte HoRisk und XtremRisk vorbereitet. Es wurde über die Verteilung und Gegenstand der Vorträge, welche auf diesem Arbeitstreffen gehalten werden sollen, diskutiert und entschieden. Am Folgetag, dem 15.07.2011, fand eine Fachexkursion zu ausgewählten Küstenabschnitte an der Nordsee statt. Es wurden verschiedene typische Küstenschutzsysteme im Projektgebiet Norden vorgestellt und besichtigt, darunter ein gestaffeltes Küstenschutzsystem (Hilgenriedersiel), ein Schar- bzw. Vorlanddeich („Roter Pfahl“-Utlandshörn) und eine Sperrwerksbesichtigung (Emssperrwerk Gandersum).

Am 31.08.2011 fand das **erste Arbeitstreffen der Projekte HoRisk und XtremRisk** in Braunschweig statt. Ziel des Treffens war es, Kontakte zwischen den Mitarbeitern beider Projekte zu knüpfen und einen fachlichen Austausch zu initiieren. Weiterhin war es das Anliegen des Treffens Schwerpunkte für die Zusammenarbeit zu identifizieren, zu diskutieren und Vereinbarungen über eine künftige Zusammenarbeit zu treffen. Im ersten Teil des Treffens wurden die beiden Projekte von den jeweiligen Projektkoordinatoren vorgestellt. Im Anschluss daran wurden dann Schlüsselergebnisse zu den verschiedenen Arbeitspaketen bzw. Teilprojekten vorgestellt und zur Diskussion gestellt. So wurde beispielsweise intensiv über die statistische Auswertung von Wasserstandsdaten (auch im Hinblick auf Standorte mit schlechter Datenlage), die Parametrisierung von Sturmflutganglinien und die Implementierung eines Sturmflutgenerators diskutiert. Weiterhin wurden die Methoden der Risiko- und Schadensermittlung im Projekt XtremRisk näher erörtert und diskutiert.

Das letzte Treffen im Berichtszeitraum 2011 fand am **13.09.2011** im Bremen statt. Auf diesem Treffen kamen erstmals das Projektteam mit der projektbegleitende Gruppe zusammen. Das Projektteam stellte dabei die bisherigen Ergebnisse aus den Teilprojekten vor. Von der projektbegleitenden Gruppe kamen praxisorientierte Hinweise für die Bearbeitung der Projekthalte.

#### **4 Mittelabfluss**

Die für das Projektjahr 2011 eingeplanten Projektmittel wurden fristgemäß beim Projektträger abgerufen. Der Mittelabfluss erfolgte planmäßig.

#### **5 Stand der Arbeiten**

Die Projektbearbeitung im Projekt HoRisk konzentrierte sich an der Universität Rostock im Wesentlichen auf die AP 2, AP3 und AP4. Die in AP 0 und AP1 federführend von der RWTH Aachen erstellten Dokumente wurden an der Universität Rostock in Abstimmungsgespächen begleitet und im Abstimmungsprozess begutachtet. Die in AP 2, AP3 und AP4 durchgeführten Untersuchungen sind in einzelnen Fachberichten sowie im Zwischenbericht des Ver-

bund-Forschungsvorhabens umfangreicher aufgeführt. Im Folgenden werden die Arbeiten kurz zusammenfassend vorgestellt.

## 5.1 Arbeitspaket 2

Als Grundlage für die statistische Bewertung von Sturmflutereignissen wurden für Ostseestationen die Jahresmaxima der Wasserstände und die Füllen von Sturmflutganglinien statistisch untersucht und bewertet. An die einzelnen Größen (Variable), sowie an bivariate Stichproben wurden Verteilungsfunktionen angepasst, die für die bivariaten Stichproben mittels Copula Funktionen verknüpft wurden. Im Ergebnis wurden sowohl den einzelnen Größen als auch Kombinationen von Füllen und Wasserständen Wahrscheinlichkeiten zugeordnet.

Für Ostseestationen ist zudem eine Methode entwickelt worden, mit der die tatsächliche Formenvielfalt von dimensionslosen Sturmflutganglinien mathematisch/statistisch nachgebildet werden kann. Die entwickelte Methode wurde beispielhaft auf vier Ostseepegel (Wismar, Rostock – Warnemünde, Stralsund und Greifswald) angewendet. Mithilfe von Kombinationen von Füllen und Wasserständen einer bestimmten Wahrscheinlichkeit können dimensionslose Ganglinien in der Höhe und in der Fülle entsprechend der Eintrittswahrscheinlichkeiten skaliert werden.

Hierzu wurde die erste Version eines Sturmflutgenerator abgeleitet, mit sich für die vier Stationen per Monte-Carlo Simulation beliebig viele zufällige Sturmflutganglinien einer beliebigen (vom Anwender bestimmten) Wahrscheinlichkeit erzeugen (simulieren) lassen.

Für die Nordseepegel Norderney und Borkum sind erste Sturmflutganglinien für Nordseestationen abgeleitet worden. Für Sturmfluttiden ist damit begonnen worden Untersuchungen zu Flut- und Ebbedauern durchzuführen sowie zum Wasserstandverlauf zwischen Thw und Tnw bzw. Tnw und Thw.

## 5.2 Arbeitspaket 3

Im Berichtszeitraum 2011 wurde im Arbeitspaket 3 ein Berechnungsprogramm zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit von Dünen auf Grundlage des Dünenerosionsansatzes von Van Gent et. al. (2008) erstellt. Dieses Programm erstellt zum einen das Ausgangsprofil der Initialdüne und zum anderen das Erosionsprofil der Düne nach den Erosionsansatz von Van Gent et. al. (2008). Die resultierende Kronenbreite im Gleichgewichtsprofil wird mittels numerischer Integration ermittelt. Die Versagenswahrscheinlichkeit wird mit Hilfe von Monte Carlo Analysen bestimmt. In einem ersten Schritt werden die Versagenswahrscheinlichkeiten für verschiedene Wiederkehrintervalle von Eingangsdaten berechnet und verglichen. Weiterhin ist geplant, ein numerisches Modell (XBeach) anzuwenden, welches neben dem Küstenquertransport des Sedimentes auch Einflüsse aus dem Küstenlängstransport berücksichtigt.

## 5.3 Arbeitspaket 4

Im Berichtszeitraum 2011 wurden im Arbeitspaket 4 die folgenden Arbeiten durchgeführt:

Auswertung der Sensitivitätsuntersuchungen für die Bewertung verschiedener Modellansätze und Modellgenauigkeiten am Projektgebiet Markgrafenheide (Vergleichsrechnungen)

Vorbereitung und Durchführung systematischer Sensitivitätsuntersuchungen zur Untersuchung des Einflusses verschiedener hydrodynamischer und versagensspezifischer Faktoren

Ableitung typischer potentieller Überflutungsflächen nach Flächengröße und Geländehöhe für die Nordseeküste und Ostseeküste

Aufbau einfacher Bathymetrien als Grundlage für die Durchführung von numerischen Simulationen

Ableitung von Sturmflutganglinien für Nordsee- und Ostseebedingungen für die Anwendung als hydrodynamischer Randbedingungen in den numerischen Simulationen

Untersuchung des Einflusses der versagensspezifischen Faktoren: Breschenbreite, Breschenlokation & Versagensdauer

Untersuchung des Einflusses der hydrodynamischen Faktoren: Wiederkehrintervall der Sturmflut, Sturmflutfülle & Tideeinfluss

Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich der maximalen Einstauhöhe, erzielten Fließgeschwindigkeiten & Verweildauer der maximalen Überflutung

#### 5.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der **Projektfortschritt den Planungen entspricht**. Es sind keine grundsätzlichen Aufgabenverschiebungen geplant. Derzeit wird davon ausgegangen, dass die **Projektziele unverändert** erreicht werden können.

Es sind inzwischen **von Seiten Dritter keine Ergebnisse** bekannt geworden, **die die Durchführung des Vorhabens beeinflussen** (vgl. Schrifttumsnachweise in den Fachberichten).

## 6 Ausblick

Im Arbeitspaket 2 sollen für die Ostsee weitere Untersuchungen zur Eintrittswahrscheinlichkeit unterschiedlicher Formen von Sturmflutganglinien durchgeführt werden. Weiterhin werden für verschiedene Ostseepiegel in den Projektgebieten Sturmflutganglinien für die weitere Verwendung in den anderen Arbeitspaketen (Arbeitspakete 3, 4, 8) generiert. Für die Nordsee werden ebenfalls Sturmflutganglinien für verschiedenen Pegel in den Projektgebieten abgeleitet. Darüber hinaus ist mit Untersuchungen zur Flut- und Ebbedauer sowie zu den Wasserstandsverläufen zwischen Thw und Tnw bzw. Tnw und Thw begonnen worden.

Für das Arbeitspaket 3 bestehen die nächsten Arbeitsschritte in der Ableitung von Einwirkungs-Versagens-Funktionen (engl. fragility curves) für Vollschuttdünen sowie in der Untersuchung weiterer Versagensmechanismen für den Bauwerkstyp Hochwasserschutzdüne. Die Bauwerkstypen Siele und Schöpfwerke bzw. Bauwerkskombinationen sollen ebenfalls untersucht werden.

In den Arbeitspaketen 4 bzw. 8 sind weitere Überflutungsmodellierungen in den Projektgebieten geplant.



UNIVERSITÄT ROSTOCK

Institut für Umweltingenieurwesen | Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau

# **HoRisk - B: Belastungen von Küstenschutzanlagen und Konsequenzen des Versagens im Bereich der Ostseeküste**

Arbeitspaket 2: Belastungen

**Zwischenbericht 2011**

30. April 2011

**Förderkennzeichen: 03KIS079**  
**Zuwendungsempfänger: Universität Rostock**  
**Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät**  
**Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau**  
**Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2009 bis 30.04.2013**  
**Berichtszeitraum: 01.01.2010 bis 31.12.2011**

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Verfügbare Daten</b>	<b>3</b>
2.1	Wasserstände	3
2.2	Seegang	3
2.3	Wind	4
<b>3</b>	<b>Statistische Auswertungen und Bewertungen</b>	<b>4</b>
3.1	Univariate statistische Untersuchungen	4
3.1.1	Wasserstände - Ostsee	5
3.1.2	Wasserstände – Nordsee	6
3.1.3	Füllen - Ostsee	6
3.2	Bivariate statistische Untersuchungen	7
3.2.1	Kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten von Füllen und Wasserständen	8
3.3	Sturmflutganglinien - Ostsee	10
3.3.1	Vergleich von gemessenen und simulierten Ganglinienformen	10
3.3.2	Simulation von Sturmflutganglinien	12
3.3.3	Sturmflutsimulator	13
3.4	Sturmflutganglinien - Nordsee	14
3.4.1	Wasserstandverläufe	16
3.4.2	Flutdauern und Ebbedauern	19
<b>4</b>	<b>Zukünftige Arbeiten</b>	<b>20</b>
4.1	Sturmflutganglinien Ostsee	20
4.2	Sturmflutganglinien Nordsee	20
4.3	Sturmflutgenerator	20
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>Schrifttum</b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>24</b>

## 1 Einleitung

Im Oktober 2007 ist die „Richtlinie der Europäischen Union und des Rates über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken“ (Directive 2007/60/EC) veröffentlicht worden. Ziel dieser Richtlinie ist es die Gefahren, die Hochwasser auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das kulturelle Erbe und die wirtschaftliche Tätigkeiten ausüben, zu verringern und das Management im Umgang mit den Hochwassergefahren zu verbessern. Die Umsetzung dieser Direktive ist insbesondere in den Küstengebieten Deutschlands von großer Bedeutung. Auf ca. 12.000 km<sup>2</sup> werden rd. 2,4 Mio. Einwohner durch Küstenschutzanlagen geschützt.

Vor diesem Hintergrund wurde das Forschungsvorhaben „HoRisK“ (Hochwasserrisikomanagement im Küstenraum) initiiert. Die Planung erfolgte in Kooperation mit der RWTH Aachen, der Universität Rostock sowie dem NLWKN Norden/Norderney. Ziel des Projektes ist es küstenschutzbezogene Ansätze und Methoden für anwendungsorientierte Schadens- bzw. Risikoanalysen abzuleiten. Diese dienen dann als Grundlage für die Erarbeitung von Hochwassergefahrenkarten, Hochwasserrisikokarten und Hochwasserrisikomanagementplänen.

Neben den Antragstellern sind der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN), das Staatliche Amt für Umwelt und Natur, Mittleres Mecklenburg (StALU MM) sowie die Landwirtschaftskammer Niedersachsen als Projektpartner mit eingebunden. Die Arbeiten im Projekt sind in insgesamt 9 Arbeitspakete (AP0 bis AP8) eingeteilt, welche die wesentlichen Schritte einer Risiko- bzw. Schadensanalyse abbilden. Im Einzelnen sind dies:

- AP0 Definition von Begriffen in Zusammenhang mit Schadens- bzw. Risikoanalyse-Verfahren
- AP1 Vergleichende Darstellung und Diskussion der verfügbaren Schadens- bzw. Risikoanalyse-Verfahren und Küstenschutzstrategien
- AP2 Belastungen
- AP3 Versagensmechanismen und Versagenswahrscheinlichkeiten
- AP4 Konsequenzen des Versagens - Überflutung
- AP5 Schadenspotentiale und Schäden
- AP6 Risikoanalyse
- AP7 Schadens- und Risikominderung
- AP8 Anwendung auf ausgewählte Küstengebiete in Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein

Im Arbeitspaket 2 werden Untersuchungen zu den Gefährdungen und Belastungen als Grundlage für schadensbasierte und/oder risikobasierte Ansätze und Methoden in einer Risikoanalyse bzw. einer Schadensanalyse durchgeführt.

Wesentliche Belastungsgrößen sind:

- Wasserstände,
- Seegang,
- Strömungen,
- Eisgang.

Schwerpunktmäßig werden die Belastungsgrößen Wasserstand und Seegang behandelt. Unter diesem Teilaspekt sind beispielsweise Untersuchungen von Hochwasserständen und Dauern von Sturmfluten an der Nord- und Ostseeküste in Kombination mit Seegangsbedingungen sowie die statistische Abschätzung von kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten der Belastungsgrößen geplant. Der Einfluss von Strömungen und Eisgang soll wenn möglich berücksichtigt werden. Daneben wird eine Abschätzung von potentiellen Auswirkungen des Klimawandels auf die Gefährdungen und Belastungen in Form von Sensitivitätsanalysen in die Betrachtung mit einfließen.

Im Folgenden wird der Stand der Arbeiten im Arbeitspaket 2 „Belastungen“, für den Berichtszeitraum vom 01.01.2011 bis zum 31.12.2011 zusammenfassend dargestellt. Es wird im Wesentlichen auf Veränderungen in der Methodik, die sich im Vergleich zum Zwischenbericht 2010 ergeben haben beziehungsweise auf neue Methoden eingegangen. In den Punkten in denen sich keine Änderungen ergeben haben, wird auf den Zwischenbericht 2010 verwiesen.

Im Berichtszeitraum wurde von der Universität Rostock damit fortgefahrene verfügbare Daten zusammengetragen (Kap. 2). Für verschiedene Ostseestationen sind Sturmflutganglinien mit einer definierten Eintrittswahrscheinlichkeit abgeleitet worden (Kap. 3.3). Für die bislang untersuchten Ostseestationen wurde ein Sturmflutgenerator entwickelt mit dem beliebig viele zufällige Ganglinien simuliert werden können (Kap. 3.3.3). Für Nordseepegel ist ebenfalls damit begonnen worden Sturmflutganglinien aus Zeitreihen von Wasserständen abzuleiten (Kap. 3.4).

## **2 Verfügbare Daten**

Alle bislang im Projekt zur Verfügung stehenden digitalen Messdaten der Wasserstände, des Seegangs und des Windes verschiedener Nord- und Ostsee Stationen sind in Tab. 7.1, Tab. 7.2 und Tab. 7.3 des Anhangs zusammengestellt. Insbesondere für den Bereich der Nordsee wird die Datenlage zukünftig noch verdichtet.

### **2.1 Wasserstände**

Detaillierte Informationen zu den digital verfügbaren Wasserständen, deren Herkunft und zeitliche Auflösung können dem Zwischenbericht 2010 entnommen werden.

### **2.2 Seegang**

Detaillierte Informationen zu digital verfügbaren Seegangsdaten, deren Herkunft und zeitliche Auflösung können dem Zwischenbericht 2010 entnommen werden.

## 2.3 Wind

Detaillierte Informationen zu digital verfügbaren Winddaten, deren Herkunft und zeitliche Auflösung können dem Zwischenbericht 2010 entnommen werden.

## 3 Statistische Auswertungen und Bewertungen

Ziel der statistischen Analysen ist es, die aus den hydrodynamischen Größen resultierenden Bauwerksbelastungen als eine Eingangsgröße für eine Risikoanalyse aufzubereiten.

Grundsätzlich werden für die Risikoanalyse folgende Eingangsgrößen benötigt:

- Extremwasserstände und zugehörige Eintrittswahrscheinlichkeiten
- Sturmflutganglinien (zeitlicher Verlauf des Wasserstandes während einer Sturmflut) und zugehörige Eintrittswahrscheinlichkeiten
- Zugehörige Seegangsverhältnisse und kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten
- Zugehörige Strömungen und kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten
- Zugehörige Eisverhältnisse und kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten

Im Folgenden wird der derzeitige Stand der statistischen Auswertungen einzelner Belastungsgrößen sowie von Wasserstandverläufen während einer Sturmflut für die Ostseestationen Wismar, Rostock – Warnemünde, Stralsund und Greifswald sowie die Nordseestationen Norderney und Borkum zusammenfassend dargestellt.

### 3.1 Univariate statistische Untersuchungen

An Stichproben einzelner Belastungsgrößen sind die in Tab. 3.1 aufgeführten Extremwertverteilungen mit Hilfe der Maximum Likelihood Methode angepasst worden. In Tab. 3.1 sind neben den Verteilungsfunktionen  $F(x)$  die logarithmierten likelihood Funktionen ( $\log L$ ) verschiedener Extremwertverteilungen aufgeführt.

Die Anpassungsparameter der einzelnen Funktionen werden bestimmt, indem die jeweilige logarithmierte Likelihood Funktion nach dem gesuchten Parameter abgeleitet, gleich Null gesetzt und für den Parameter gelöst wird.

Die Güte der Anpassung wird optisch bestimmt, indem die angepasste Verteilungsfunktion gemeinsam mit den Messgrößen dargestellt wird.

Jedem Messwert der Stichprobe wird mit Hilfe der plotting position Hazen (3.1) eine Wahrscheinlichkeit zugewiesen.

$$p_i = \frac{i - 0.5}{n} \quad (3.1)$$

Auf die Bedeutung der plotting Position ist im Zwischenbericht 2010 eingegangen worden.

Tab. 3.1: Verteilungsfunktionen  $F(x)$  und logarithmierte Likelihood Funktionen  $\log L$  einiger Funktionen (Johnsson et al. 1994, EAK 2002, Coles 2001)

$F(x)$	$\log L$
Weibull	
$1 - e^{-\left(\frac{x_i}{\beta}\right)^\alpha}$	$\beta^{-\alpha} \left( \beta^\alpha \left( n(\log \alpha - \alpha \log \beta) + (-1 + \alpha) \sum_{i=1}^n \log x_i \right) - \sum_{i=1}^n x_i^\alpha \right)$
Log-Normal	
$\frac{1}{2} \operatorname{Erfc} \left[ \frac{\mu - \log x_i}{\sqrt{2}\sigma} \right]$	$-\frac{n(\mu^2 + \sigma^2 \log(2\pi) + 2\sigma^2 \log \sigma) + 2(-\mu + \sigma^2) \sum_{i=1}^n \log x_i + \sum_{i=1}^n \log x_i^2}{2\sigma^2}$
GEV	
$e^{-\left(1 + \frac{\xi(-\mu + x_i)}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}}$	$-\frac{(1 + \xi) \sum_{i=1}^n \log \left( 1 + \frac{\xi(-\mu + x_i)}{\sigma} \right) + \xi \left( n \log \sigma + \sum_{i=1}^n \left( 1 + \frac{\xi(-\mu + x_i)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right)}{\xi}$
Gumbel	
$e^{-e^{-\frac{\alpha - x_i}{\beta}}}$	$-\frac{n(\alpha + \beta \log \beta) - \beta \sum_{i=1}^n e^{-\frac{\alpha - x_i}{\beta}} + \sum_{i=1}^n x_i}{\beta}$

### 3.1.1 Wasserstände - Ostsee

Auf die Vorgehensweise bei der Korrektur von Wasserstandzeitreihen (Umrechnung auf ein einheitliches Bezugssystem, Trendermittlung, Trendelimination) ist im Zwischenbericht 2010 eingegangen worden. Pro Jahr wird der jeweils höchste Wasserstand ausgewählt. Alle ausgewählten Wasserstände werden zu einer Stichprobe zusammengefasst.

Wie der Tab. 7.1 entnommen werden kann, stehen für die meisten Ostseestationen zwei Datenkollektive zur Verfügung. Zum einen sind stündliche Messwerte vorhanden, für einzelne Stationen kann darüber hinaus auf längere Zeitreihen zurückgegriffen werden. Diese Daten liegen in Form von Jahresmaxima vor.

Aufgrund der Tatsache, dass viele sehr hohe Hochwasserereignisse aufgetreten sind bevor stündliche Messungen des Wasserstandes durchgeführt wurden, ist wo Daten vorhanden waren, für die statistische Auswertung der Wasserstände auf die die längeren Zeitreihen zurückgegriffen worden.

Von den in Tab. 3.1 aufgeführten Verteilungsfunktionen lieferte für alle vier bislang untersuchten Ostseestationen die Gumbel Verteilung die beste Anpassung an die Wasserstandsdaten. Die jeweiligen Anpassungsparameter sind in der Tab. 3.2 aufgeführt.

Tab. 3.2: Anpassungsparameter  $\alpha$  und  $\beta$  der Gumbel Verteilung

	Wismar	Warnemünde	Stralsund	Greifswald
Gumbel $\alpha$	122,91	111,22	100,30	114,50
Gumbel $\beta$	27,72	22,54	20,30	22,53

### 3.1.2 Wasserstände – Nordsee

Für viele Nordseestationen stehen ebenfalls zwei Datenkollektive zur Verfügung: Zum einen Minutenwerte des Wasserstandes, diese Aufzeichnungen beginnen jedoch größtenteils erst im Jahr 2000 und beinhalten dementsprechend wenig Informationen über sehr hohe Sturmfluten. Wie der Tab. 7.1 entnommen werden kann, stehen für einige Stationen darüber hinaus auch Zeitreihen von Tidehochwassern (Thw) und Tideniedrigwassern (Tnw) zur Verfügung. Diese Zeitreihen umfassen längere Zeiträume und beinhalten daher auch mehr Informationen über hohe Sturmflutwasserstände. Aus den Zeitreihen der Thw und Tnw sind für die Pegel Norderney und Borkum jeweils die Jahresmaxima ermittelt und statistisch untersucht worden.

Tab. 3.3: Anpassungsparameter  $\mu$  und  $\sigma$  der Log-Normal Verteilung sowie  $\mu$ ,  $\sigma$  und  $\xi$  der GEV

	Norderney	Borkum
Log-Normal $\mu$	5,680	
Log-Normal $\sigma$	0,147	
GEV $\mu$		255,346
GEV $\sigma$		33,411
GEV $\xi$		-0,074

Die Jahresmaxima der Wasserstände des Pegels Norderney lassen sich am besten durch die Log-Normal Verteilung beschreiben. Für den Pegel Borkum lieferte die GEV die beste Anpassung. Die jeweiligen Anpassungsparameter sind in der Tab. 3.3 zusammengefasst.

### 3.1.3 Füllen - Ostsee

Füllen von Sturmflutganglinien sind definiert als Fläche zwischen einem Grenzwasserstand und dem Wasserstandsverlauf während eines Hochwassers über die Zeit. Detaillierte Informationen zur Ermittlung von Füllen von Sturmflutganglinien können dem Zwischenbericht 2010 entnommen werden.

Um Füllen von Sturmflutganglinien ermitteln zu können, sind Wasserstandsdaten in einer zeitlichen Auflösung von mindestens einer Stunde erforderlich. Wasserstandsdaten mit dieser Auflösung stehen für die vier untersuchten Stationen etwa ab Mitte der 50er Jahre zur Verfügung.

Ausgewählt und statistisch untersucht wurden die Füllen von Sturmfluten über einem Grenzwasserstand von 60 cm NHN, die jeweils zeitgleich mit dem Jahresmaximum des Wasserstandes aufgetreten sind. Für die Stationen Wismar und Warnemünde konnte die Fülle am besten mit der Log-Normal Verteilung beschrieben werden. Für die Stationen Stralsund und

Greifswald hat die Weibull Verteilung die beste Anpassung geliefert. Die jeweiligen Anpassungsparameter sind in der Tab. 3.4 zusammengestellt worden.

Tab. 3.4: Anpassungsparameter  $\alpha$  und  $\beta$  der Weibull Verteilung bzw.  $\mu$  und  $\sigma$  der Log-Normal Verteilung

	Wismar	Warnemünde	Stralsund	Greifswald
Weibull $\alpha$			1,621	1,731
Weibull $\beta$			1022,234	1280,547
Log-Normal $\mu$	6,923	6,696		
Log-Normal $\sigma$	0,568	0,640		

### 3.2 Bivariate statistische Untersuchungen

Eine Verteilungsfunktion für eine bivariate Stichprobe kann mit Hilfe von Randverteilungen und einer Copula Funktion aufgestellt werden. Die Randverteilungen beschreiben die Verteilungen der univariaten Stichproben, die Copula beschreibt die Abhängigkeitsstruktur zwischen den beiden Zufallsvariablen.

Die Stärke des Zusammenhanges zwischen zwei Zufallsvariablen wird durch den Rang Korrelationskoeffizienten Kendall's  $\tau$  (3.2) ausgedrückt.  $\tau$  kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei  $\tau = 0$  darauf hindeutet, dass kein Zusammenhang zwischen den Zufallsvariablen besteht. Nimmt  $\tau$  die Werte 1 bzw. -1 an, besteht ein perfekter positiver bzw. negativer Zusammenhang zwischen den Zufallsvariablen.

$$\tau = \frac{P_n - Q_n}{\binom{n}{2}} \quad (3.2)$$

$P_n$  und  $Q_n$  sind die Anzahlen der konkordanten und diskordanten Paare,  $n$  ist die Anzahl der Beobachtungen.

Verschiedene Copula Funktionen stehen zur Verfügung, um den Zusammenhang zwischen hohen Wasserständen und Füllen zu beschreiben. Die Copula Funktionen, die an die Daten angepasst wurden, sind in Tab. 3.5 zusammengestellt.

Der Parameter  $\Theta$  der Copula Funktion wurde bestimmt, indem der ermittelte Rang Korrelationskoeffizient sowie die jeweilige Generator Funktion  $\varphi(t)$  beziehungsweise deren erste Ableitung in (3.3) eingesetzt und anschließend nach  $\Theta$  aufgelöst wurde.

$$\tau = 1 + 4 \int_0^1 \frac{\varphi(t)}{\varphi'(t)} dt \quad (3.3)$$

Beliebigen Kombinationen von  $(u,v)$  im Intervall  $(0,1)_u$  und  $(0,1)_v$  können damit Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden.

Tab. 3.5: Verteilungsfunktionen  $C(u,v)$  und Generatorfunktionen  $\varphi(t)$  einiger Copulas (Nelson 2006)

Copula	$C(u,v)$	$\varphi(t)$
Clayton	$(u^{-\Theta} + v^{-\Theta} - 1)^{-\frac{1}{\Theta}}$	$\frac{t^{-\Theta} - 1}{\Theta}$
Gumbel	$e^{\left[ -\frac{1}{\Theta} \left( (-\log u)^{\Theta} + (-\log v)^{\Theta} \right) \right]}$	$ \log t ^{\Theta}$
Frank	$-\frac{1}{\Theta} \log \left[ 1 + \frac{(e^{-\Theta u} - 1)(e^{-\Theta v} - 1)}{e^{-\Theta} - 1} \right]$	$-\log \frac{e^{-\Theta t} - 1}{e^{-\Theta} - 1}$
Joe	$1 - \left[ (1-u)^{\Theta} + (1-v)^{\Theta} - (1-u)^{\Theta} (1-v)^{\Theta} \right]^{\frac{1}{\Theta}}$	$-\log \left[ -1(1-t)^{\Theta} \right]$

Durch Einsetzen von  $(u,v)$  in die Umkehrfunktion der am besten angepassten Verteilungsfunktion im univariaten Fall können die Randverteilungen beschrieben werden.

$$(x, y) = (F_1^{-1}(u), F_2^{-1}(v)) \quad (3.4)$$

Die Güte der Anpassung wird bestimmt, indem gemessene Kombinationen von Wasserständen und Füllen mit simulierten Kombinationen verglichen werden. Dazu wird zunächst eine beliebige Anzahl von gleichverteilten Zufallsvariablen  $(u, u^*)$  im Intervall  $(0,1)_u$  und  $(0,1)_{u^*}$  erzeugt. Durch Einsetzen von  $u^*$  in die Umkehrfunktion der Ableitung der Copula Funktion nach  $u$  (3.6) werden voneinander abhängige Zufallsvariablen  $(u, v)$  erzeugt.

$$Q_u(v) = \frac{\partial}{\partial u} C(u, v) \quad (3.5)$$

$$v = Q_u^{-1}(u^*) \quad (3.6)$$

Diese Zufallsvariablen  $(u, v)$  werden wiederum in die Umkehrfunktionen der Randverteilungen eingesetzt (3.4), um die simulierten Datenpaare in die tatsächlichen Einheiten umzurechnen.

### 3.2.1 Kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten von Füllen und Wasserständen

Die Abhängigkeitsstruktur zwischen Hochwasserständen und den zugehörigen Füllen ist mit Copula Funktionen beschrieben worden. Für jede der vier Lokationen sind die ermittelten Rangkorrelationskoeffizienten Kendall's  $\tau$  in der Tab. 3.6 zusammengestellt. Es wird deutlich, dass bei allen untersuchten Stationen ein Zusammenhang zwischen Sturmflutwasserständen und Füllen besteht. Das bedeutet, dass mit zunehmendem Wasserstand tendenziell auch die Fülle der Sturmflutganglinie zunimmt.

Aus den verschiedenen zur Verfügung stehenden Copula Funktionen ist jeweils die ausgewählt worden, die den Zusammenhang zwischen den beiden Zufallsgrößen am besten wiedergibt. Für die Stationen Wismar und Warnemünde liefert die Gumbel Copula und für die

Stationen Stralsund und Greifswald die Frank Copula die besten Ergebnisse. Die entsprechenden Anpassungsparameter sind in der Tab. 3.6 aufgeführt.

Tab. 3.6: Korrelationskoeffizient Kendall's  $\tau$  und Anpassungsparameter  $\Theta$  verschiedener Copula Funktionen

	Wismar	Warnemünde	Stralsund	Greifswald
$\tau$	0.518	0.553	0.473	0.453
Gumbel $\Theta$	2.076	2.238		
Frank $\Theta$			5.261	4.933

Als Randverteilungen sind die jeweiligen am besten angepassten Verteilungsfunktionen im univariaten Fall eingesetzt worden. (Vgl. 3.1.1 und 3.1.3)

In Abb. 3.1 sind die mit Hilfe der angepassten Copula Funktion und den entsprechenden Randverteilungen simulierten Paare aus Wasserständen und Füllen dargestellt. Jeder Wasserstand- Füllen Kombination kann eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden. Werden gleiche Wahrscheinlichkeiten verbunden, erhält man Isolinien gleicher Wahrscheinlichkeiten. Für die Wahrscheinlichkeiten 0,01; 0,005; 0,002 und 0,0001 sind diese Isolinien exemplarisch in der Abb. 3.1 dargestellt.

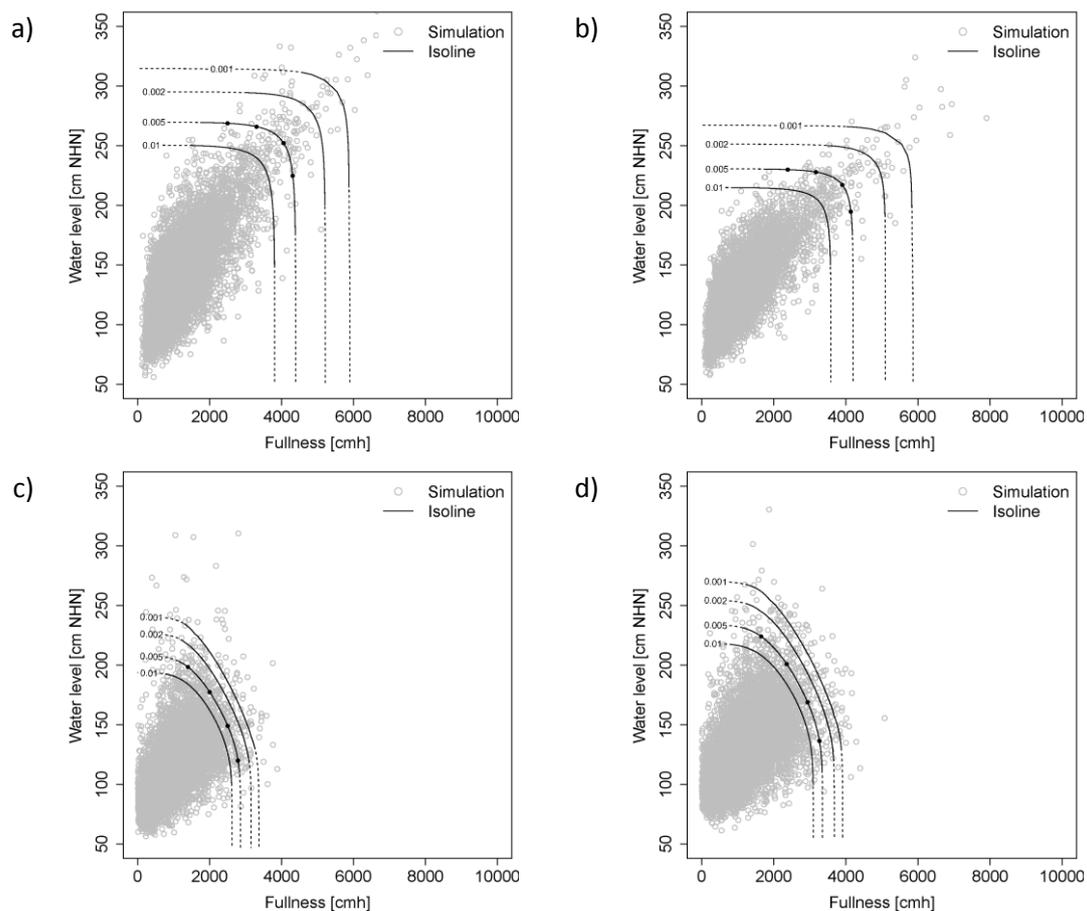


Abb. 3.1: Simulierte Datenpaare aus Füllen und Wasserständen sowie Linien gleicher Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Stationen: a) Wismar, b) Rostock (Warnemünde), c) Stralsund, d) Greifswald

### 3.3 Sturmflutganglinien - Ostsee

Für die untersuchten Stationen sind alle Sturmflutganglinien mit nur einem Peak und einem Peakwasserstand größer 100 cm NHN untersucht worden. Betrachtet wurden die Wasserstandverläufe oberhalb 60 cm NHN. Alle Sturmflutganglinien, die diese Kriterien erfüllen, sind in eine standardisierte Form gebracht worden mit Wasserständen und Dauern die von Null bis Eins reichen.

Für alle ausgewählten standardisierten Sturmflutganglinien ist der Zeitpunkt bestimmt worden zu welchem der maximale Wasserstand auftritt. Damit kann für jede Station ein Intervall eingegrenzt werden innerhalb dem der maximale Wasserstand aufgetreten kann.

Der Verlauf links und rechts des maximalen Wasserstandes wird getrennt voneinander simuliert indem die Parameter a und b in (3.7) bzw. (3.8) variiert werden.

$$r(\Theta) = \frac{a}{\sqrt{(\cos(\Theta + b))^2 (a \sin(\Theta + b))^2}} \quad (3.7)$$

$$r(\Theta) = \frac{a}{\sqrt{(\cos(\Theta - b))^2 (a \sin(\Theta - b))^2}} \quad (3.8)$$

Der Einfluss von Änderungen in den Parametern a und b sowie dem Zeitpunkt des Scheitelwasserstandes auf die resultierende Ganglinienform ist in der Abb. 3.2 exemplarisch dargestellt.

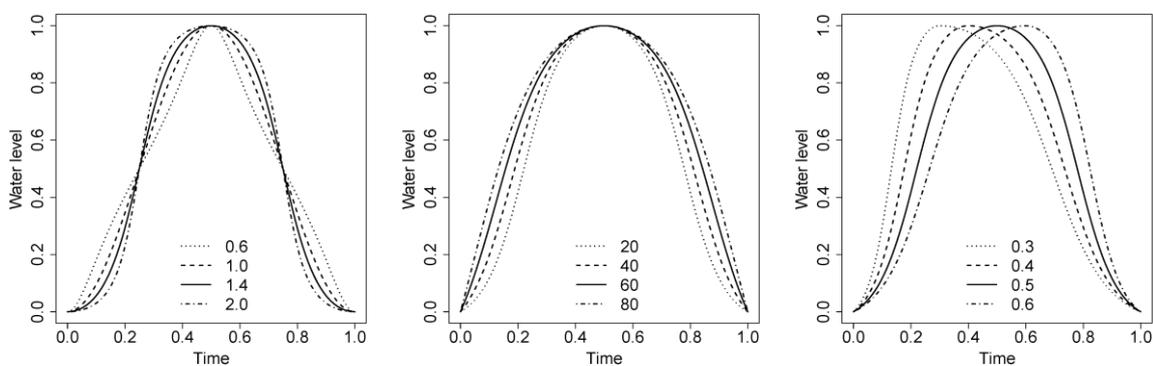


Abb. 3.2: Einfluss von Änderungen in den Parametern a (links) und b (Mitte) sowie dem Zeitpunkt des maximalen Scheitelwasserstandes (rechts) auf die resultierende Ganglinienform

#### 3.3.1 Vergleich von gemessenen und simulierten Ganglinienformen

Um das Verfahren zur Generierung von Ganglinienformen zu überprüfen, sind gemessene standardisierte Ganglinienformen mit simulierten Ganglinienformen verglichen worden. In Abb. 3.3 sind für alle untersuchten Ostseestationen eine Auswahl gemessener und simulierter Ganglinienformen zusammen dargestellt.

Für alle Stationen ist der Parameter a im Intervall von 0,5 bis 2,0 in 0,1er Schritten und der Parameter b im Intervall von 0 bis 90 in 10er Schritten variiert worden. Für die gezeigten

Vergleiche ist der Zeitpunkt des Scheitelwasserstandes auf den tatsächlichen Zeitpunkt des Scheitelwasserstandes festgesetzt worden.

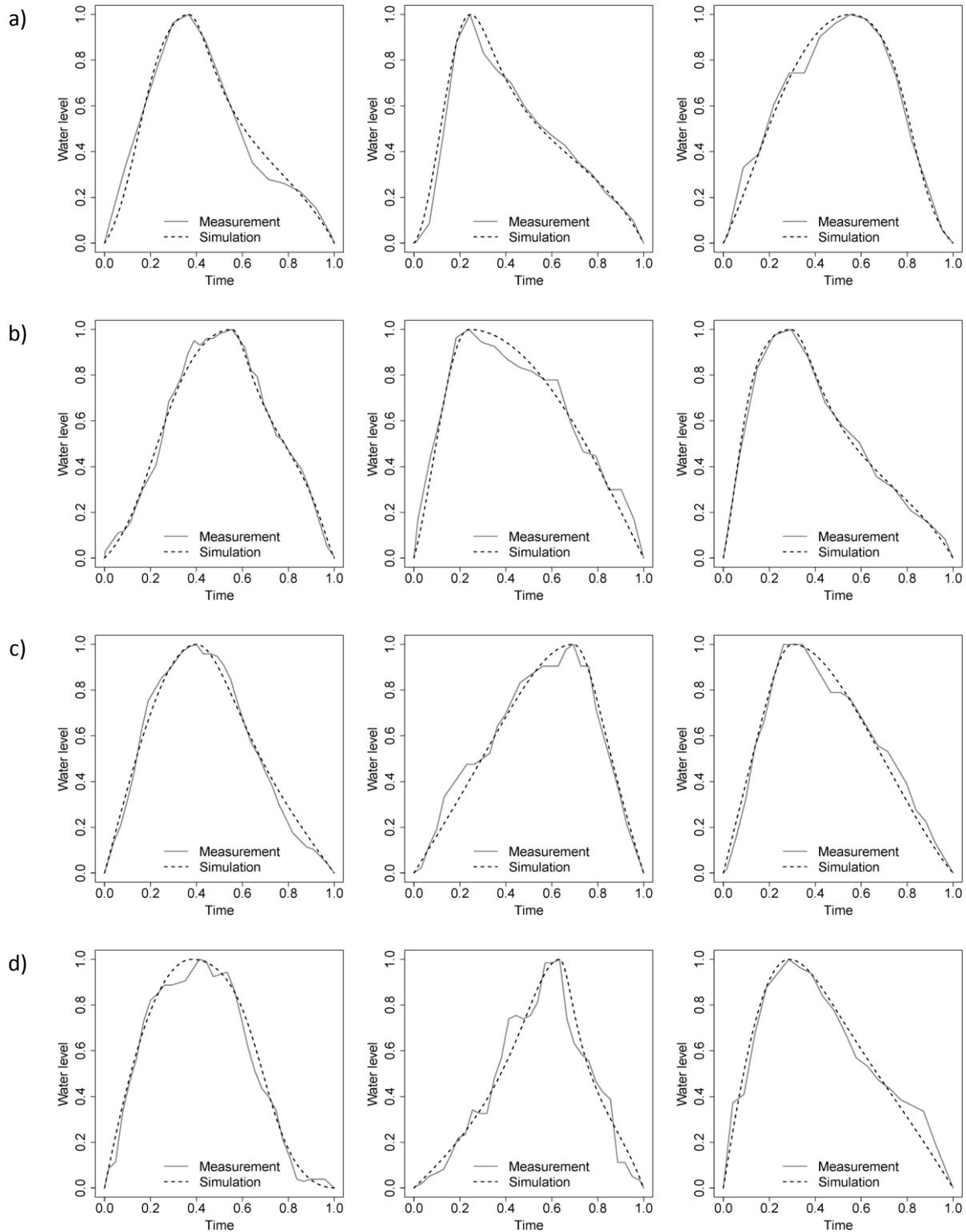


Abb. 3.3: Vergleich von simulierten und gemessenen Ganglinienformen

Die simulierten Ganglinienformen zeigen für alle Stationen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Ganglinienformen.

Es wird die Annahme getroffen, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens für alle Ganglinienformen gleich ist.

### 3.3.2 Simulation von Sturmflutganglinien

Für jede der vier Stationen sind exemplarisch vier Ganglinienformen generiert worden. Die Formen sind in Abb. 3.4 für jede Station dargestellt.

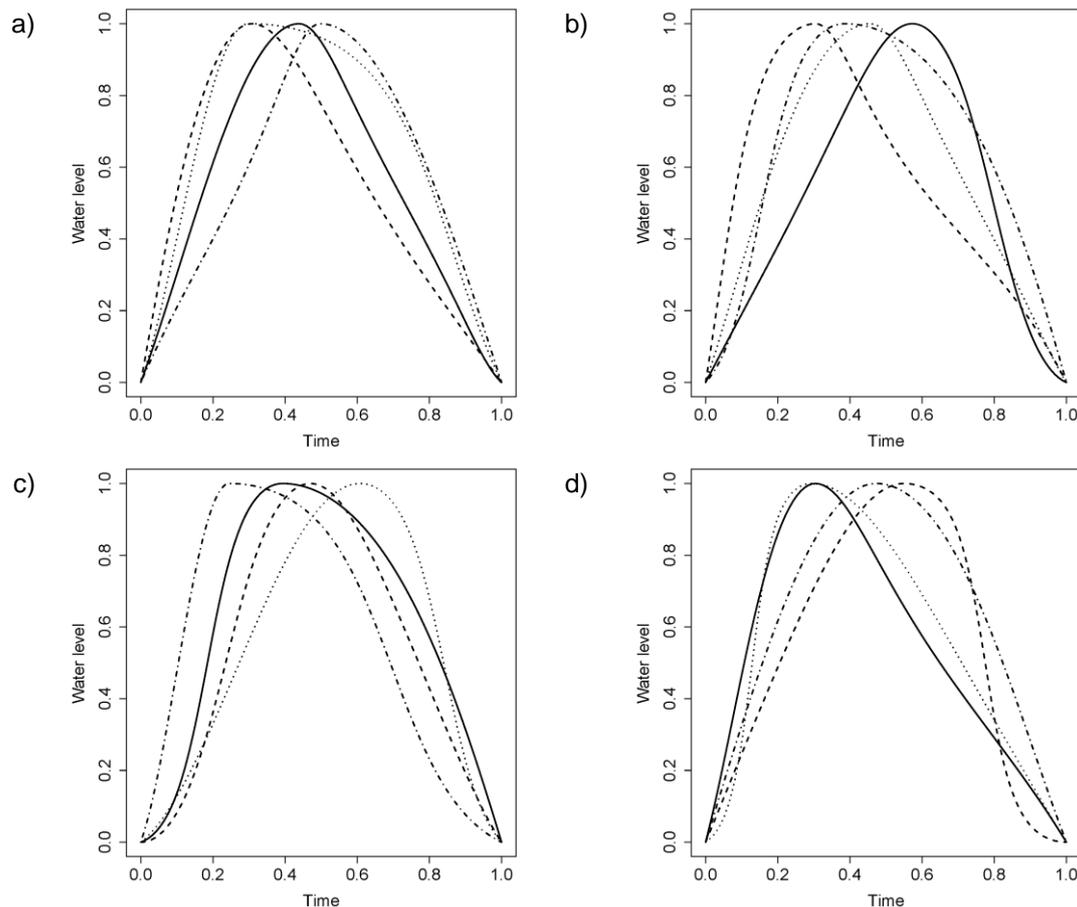


Abb. 3.4: Zufällig erzeugte Formen von Sturmflutganglinien für die Stationen: a) Wismar, b) Rostock (Warnemünde), c) Stralsund, d) Greifswald

Die erzeugten Ganglinienformen müssen sowohl in der Höhe als auch in der Breite skaliert werden. Dazu werden die Kombinationen von Wasserständen und Füllen denen eine bestimmte Wahrscheinlichkeit zugeordnet wurde heran gezogen.

In Abb. 3.1 sind auf der 0,005 Isolinie je 4 Kombinationen von Wasserständen und Füllen als schwarze Punkte markiert. Jede zufällige Ganglinienform wird mit Hilfe einer Wasserstand-Füllen Kombination skaliert. Zunächst erfolgt die Skalierung in der Höhe durch Multiplikation des gewünschten Scheitelwasserstandes. Anschließend erfolgt die Skalierung in der Breite durch Multiplikation des Verhältnisses aus gewünschter und der tatsächlichen Fülle.

Für die vier untersuchten Ostseestationen sind die jeweils vier skalierten Ganglinien in der Abb. 3.5 dargestellt. Da alle Kombinationen von Wasserständen und Füllen eine gemeinsame Eintrittswahrscheinlichkeit von 0,005 haben und angenommen wird, dass der Form der

Ganglinie keine Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden kann, haben alle dargestellten Ganglinien die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit von 0,005. Das entspricht einem Wiederkehrintervall von 200 Jahren.

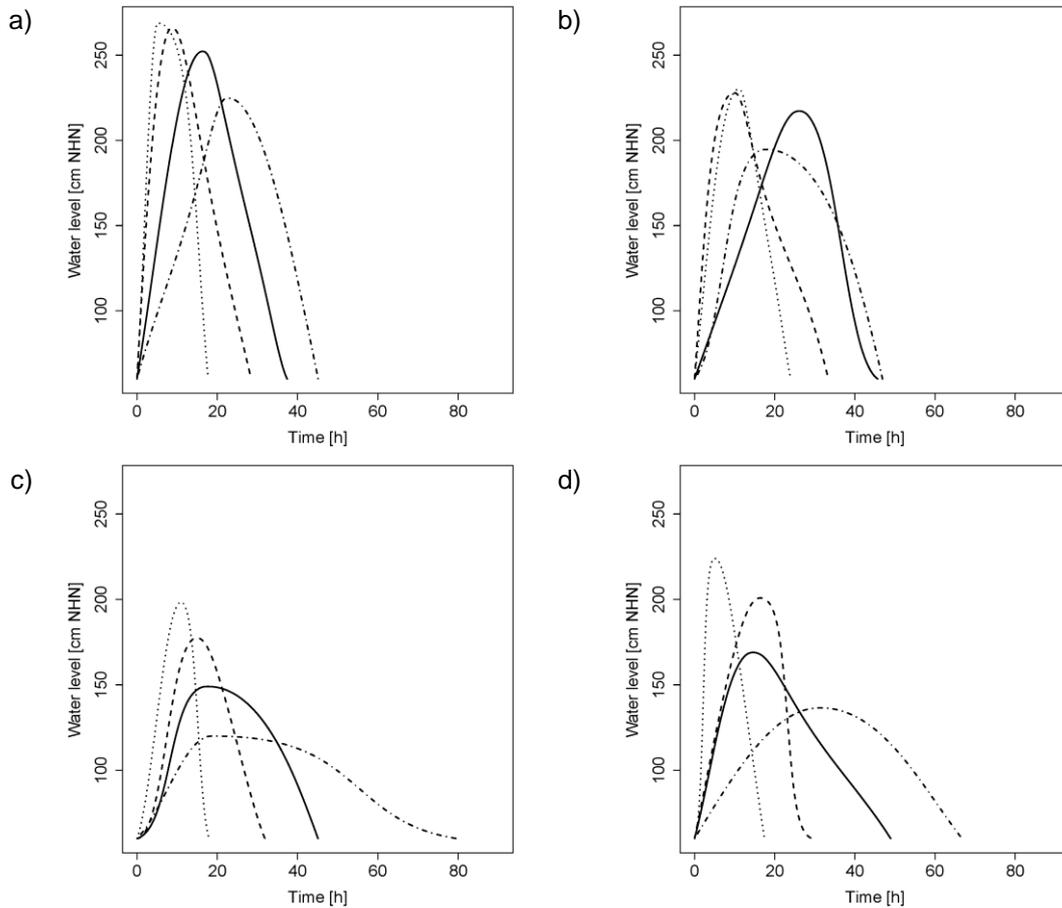


Abb. 3.5: Simulierte Sturmflutganglinien mit einem Wiederkehrintervall von 200 Jahren für die Stationen: a) Wismar, b) Rostock (Warnemünde), c) Stralsund, d) Greifswald

### 3.3.3 Sturmflutsimulator

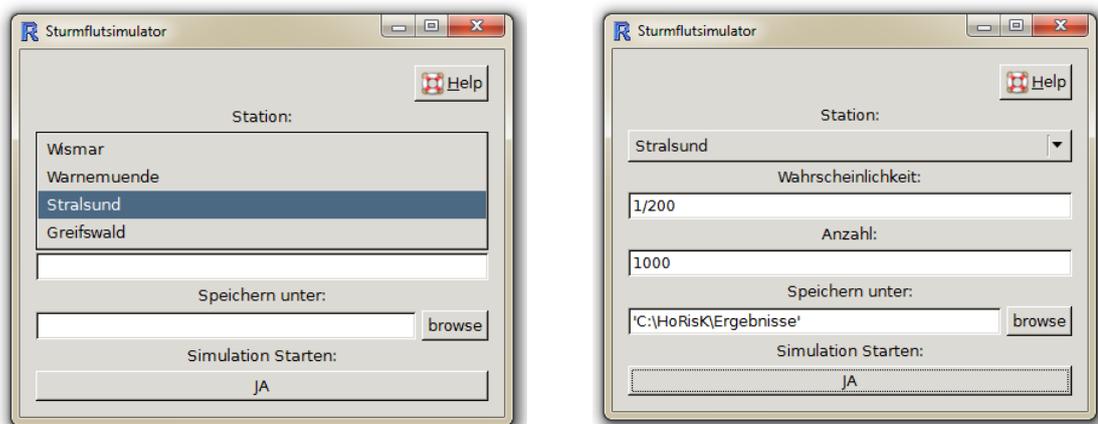


Abb. 3.6: Sturmflutgenerator

Es wurde begonnen die vorgestellten Methoden zur Generierung von Sturmflutganglinien in einem Sturmflutgenerator umzusetzen mit dem beliebig viele Sturmfluten einer beliebigen Wahrscheinlichkeit erzeugt werden können. Bislang können Sturmfluten für die vier untersuchten Ostseepegel (Wismar, Warnemünde, Stralsund und Greifswald) erzeugt werden.

### 3.4 Sturmflutganglinien - Nordsee

Für Nordseestationen wurde die Vereinbarung getroffen, dass sich Sturmflutganglinien aus drei Tiden zusammensetzen: der Tide mit dem maximalen Sturmflutwasserstand, einer vorlaufenden Tide und einer nachlaufenden Tide.

Für beide untersuchten Pegel sind jeweils aus der Zeitreihe der aufgezeichneten Thw und Tnw die 30 Sturmflutereignisse mit den höchsten Wasserständen ausgewählt worden. Um die vorlaufende und nachlaufende Tide beschreiben zu können wurden zusätzlich jeweils zwei Tnw und ein Thw unmittelbar vor und nach dem höchsten Scheitelwasserstand betrachtet.

Die sieben Wasserstände die die Sturmflut beschreiben werden standardisiert, das bedeutet sie werden durch den jeweiligen maximalen Scheitelwasserstand dividiert. Als Ebbedauer ist zunächst die mittlere Ebbedauer und als Flutdauer die mittlere Flutdauer aus allen Ebbe- bzw. Flutdauern angenommen worden. Werden die standardisierten Sturmflutganglinien der 30 größten Hochwasserereignisse überlagert, ergeben sich die in Abb. 3.7 dargestellten Streuungen der Wasserstände. Als graue Punkte sind die Wasserstände bezogen auf den maximalen Wasserstand dargestellt. Es wird dabei angenommen, dass die Wasserstände für die Zeitpunkte der Thw und Tnw normalverteilt sind. Für Die Zeitpunkte der Thw und Tnw sind darum Mittelwerte und Standardabweichungen bestimmt worden. Die durgezogene schwarze Linie in Abb. 3.7 ist der jeweilige Mittelwert des Thw beziehungsweise des Tnw. Als gestrichelte Linie ist die jeweilige Standardabweichung eingetragen.

Jede standardisierte Sturmflut hat ein maximales Thw von 1, die Wasserstände zu den übrigen Zeitpunkten streuen relativ stark.

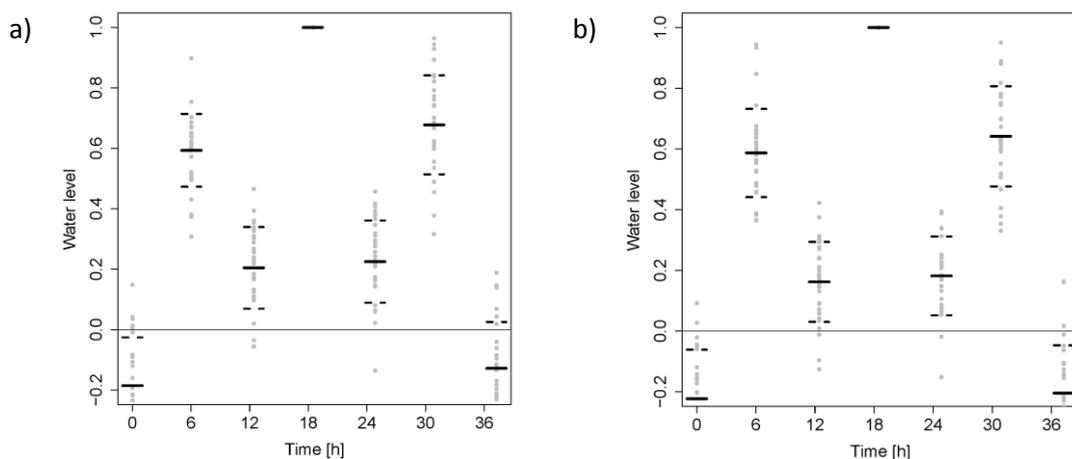


Abb. 3.7: Standardisierte Sturmfluten der Stationen a) Norderney, b) Borkum

Um eine kontinuierliche Ganglinie zu erzeugen, sind die Mittelwerte der Thw und Tnw sowie die jeweiligen Standardabweichungen in einem ersten Schritt mit Sinusfunktionen verbunden worden (Abb. 3.8).

Es wurde angenommen, dass die Höhen des Thw der vorlaufenden Tide und der nachlaufenden Tide zufällig sind. Wie bereits beschrieben ist für die Wasserstände der Thw und Tnw jeweils angenommen worden, dass sie normalverteilt sind. Für das Tnw unmittelbar vor dem Sturmflutwasserstand ist die Dichtefunktion einmal in Abb. 3.9 dargestellt.

Weil die Fläche unter der Dichtefunktion der Normalverteilung gleich eins ist, können durch Vorgabe von zufälligen Zahlen im Intervall (0,1) Flächen unter der Dichtefunktion der Normalverteilung vorgegeben werden, für die dann der zugehörige Wasserstand ermittelt wird.

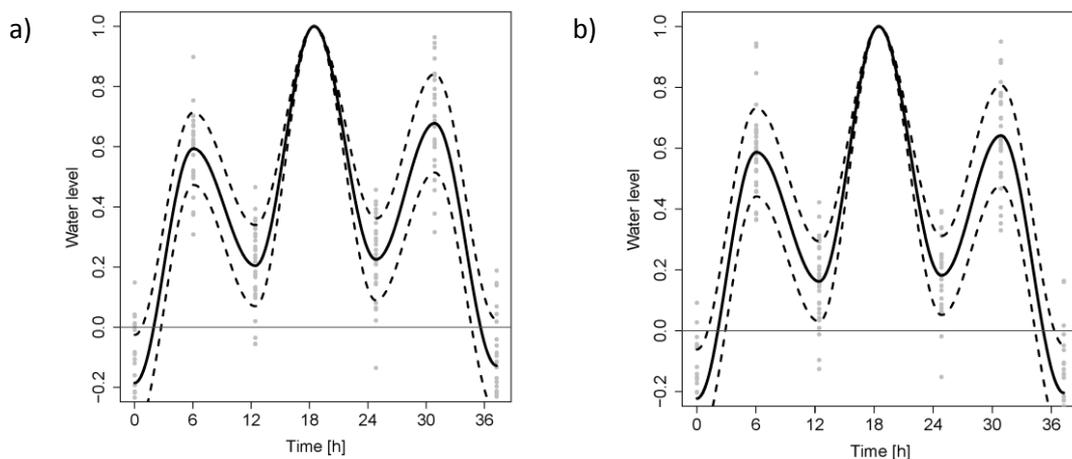


Abb. 3.8: Ganglinie aus den Mittelwerten standardisierter Wasserstände sowie deren Standardabweichung für die Stationen a) Norderney, b) Borkum

Um eine zufällige Sturmflutganglinie zu erzeugen, werden daher zwei Zufallszahlen zwischen null und eins benötigt. Mit der ersten Zufallszahl werden die entsprechenden Quantile der Wasserstände links des maximalen Wasserstandes ermittelt. Mit der zweiten Zufallszahl werden die entsprechenden Quantile der Wasserstände rechts des maximalen Scheitelwasserstandes ausgerechnet. Die so generierten Formen haben einen maximalen Scheitelwasserstand von eins.

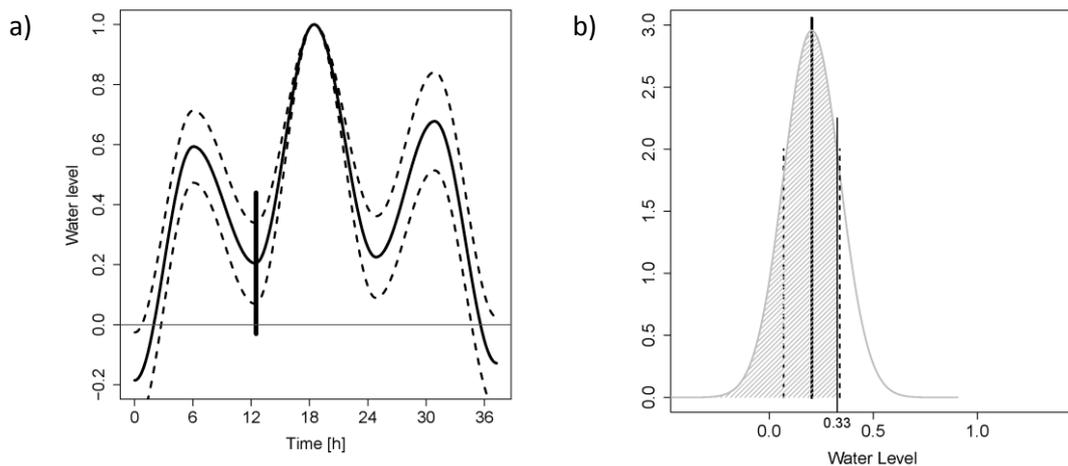


Abb. 3.9: Dichte Funktion der standardisierten Wasserstände im in Abb. a) gekennzeichneten Schnitt für die Station Norderney

Um die generierten Formen in Ganglinien mit tatsächlichen Wasserständen umzurechnen, werden die standardisierten Wasserstände mit Wasserständen einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit multipliziert (Kap. 3.1.2). Um beispielsweise eine Ganglinie mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 0,005 zu erhalten, wird zunächst der Wasserstand ermittelt, dem mittels univariater statistischer Methoden eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 0,005 zugeordnet wurde. Mit diesem Wasserstand werden dann alle standardisierten Wasserstände der Sturmflutganglinie multipliziert. Anschließend können die Thw und Tnw durch Sinusfunktionen verbunden werden.

Für die Stationen Norderney und Borkum sind jeweils drei zufällige Realisierungen von Sturmflutganglinien erzeugt und in Abb. 3.10 dargestellt worden.

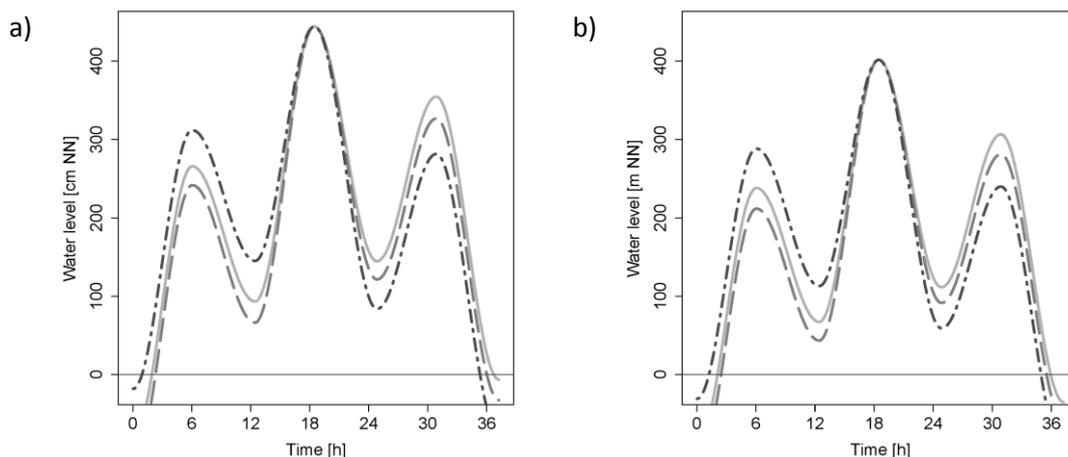


Abb. 3.10: Simulierte Sturmflutganglinien mit einem Wiederkehrintervall von 200 Jahren für die Stationen: a) Norderney, b) Borkum

### 3.4.1 Wasserstandverläufe

Zur Untersuchung der Wasserstandverläufe zwischen Tnw und Thw beziehungsweise Thw und Tnw stehen nur verhältnismäßig wenige Daten zur Verfügung. Um den Verlauf des Wasserstandes nachvollziehen zu können, ist eine zeitlich Auflösung der Daten von mindes-

tens einer Stunde erforderlich. Wasserstandsdaten mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute stehen für die Pegel Norderney und Borkum für die hydrologischen Jahre 2001 bis 2010 zur Verfügung.

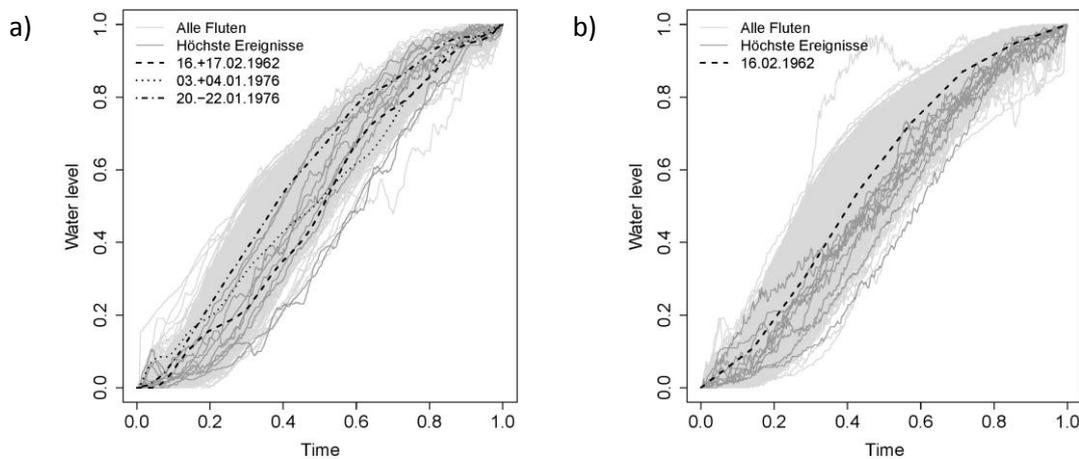


Abb. 3.11: Vergleich der Wasserstandverläufe aller Fluten mit den Wasserstandverläufen hoher und sehr hoher Sturmfluten für die Stationen: a) Norderney, b) Borkum

Es wurde untersucht, ob ein sinusförmiger Verlauf des Wasserstandes die tatsächlichen Verhältnisse während einer Sturmflut wiedergibt. Dazu sind alle Verläufe in eine standardisierte Form gebracht worden, mit Wasserständen und Dauern zwischen 0 und 1.

In der Abb. 3.11 sind für beide Pegel alle Fluten gemeinsam abgebildet. In dunkelgrau sind jeweils die zehn Fluten mit den höchsten Scheitelwasserständen dargestellt, die im 10 jährigen Beobachtungszeitraum aufgezeichnet wurden. Darüber hinaus werden zum Vergleich einige sehr hohe Sturmflutverläufe als gestrichelte Linien gezeigt. Für den Pegel Norderney handelt es sich um die Sturmfluten vom 16 und 17. Februar 1962, von 3. und 4. Januar 1976 sowie vom 20. bis 22. Januar 1976. Für den Pegel Borkum ist zum Vergleich ebenfalls das Hochwasser vom 16 und 17. Februar 1962 dargestellt worden.

Aus Abb. 3.11 lässt sich für den Wasserstandverlauf zwischen den Tnw und Thw der Sturmflutide ableiten, dass bei hohen Scheitelwasserständen die Verläufe einen von den mittleren Verhältnissen abweichenden Verlauf haben. In Abb. 3.12 sind noch einmal die Fluten der zehn höchsten Sturmfluten der hydrologischen Jahre 2001 bis 2010 abgeleitet. Als schwarze durchgehende Linie ist der mittlere Verlauf aller Fluten dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Verläufe der zehn höchsten Sturmfluten im Mittel zu Beginn einen weniger starken dann aber einen stärkeren Anstieg aufweisen als der gemittelte Verlauf aller Fluten. Wie anhand der Einhüllenden der zehn höchsten Ereignisse (blau gestrichelte Linie) zu erkennen ist, schwanken die Verläufe beider Pegel jedoch relativ stark. Die mittleren Verläufe der 10 höchsten Sturmfluten lassen sich jedoch näherungsweise durch einen sinusförmigen Verlauf (rote Linie) wiedergeben.

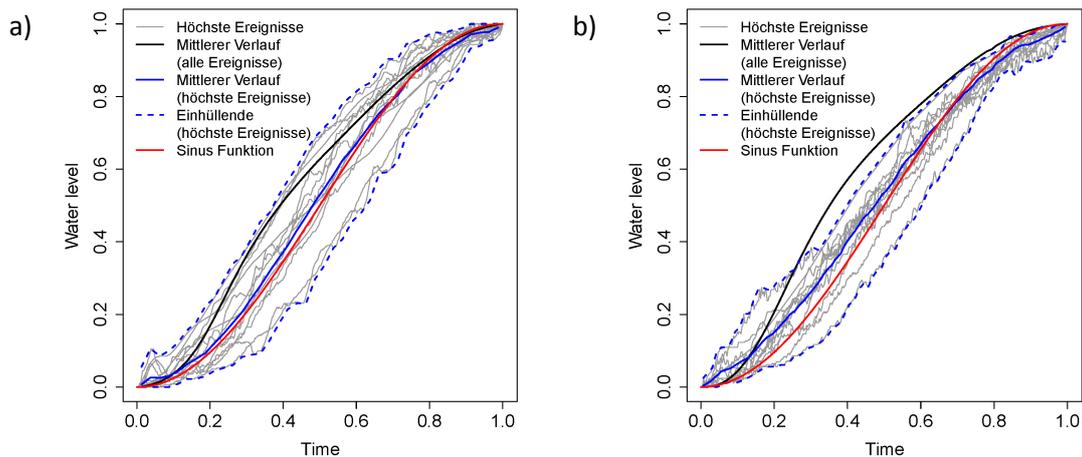


Abb. 3.12: Vergleich der Wasserstandverläufe hoher Sturmfluten (Mittelwert und Einhüllende) mit dem mittleren Verlauf alle Sturmfluten und einem sinusförmigen Verlauf für die Stationen: a) Norderney, b) Borkum

In Abb. 3.13 ist der Verlauf der Ebden der zehn höchsten Sturmfluten (in dunkelgrau) im Vergleich zum Verlauf aller Ebden (hellgrau) dargestellt. Die Verläufe länger zurückliegender sehr hoher Sturmflutereignisse sind wiederum als gestrichelte Linien dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass im Gegensatz zu den Verläufen der Fluten, die Verläufe der Ebden der höchsten Ereignisse in etwa den mittleren Verhältnissen entsprechen.

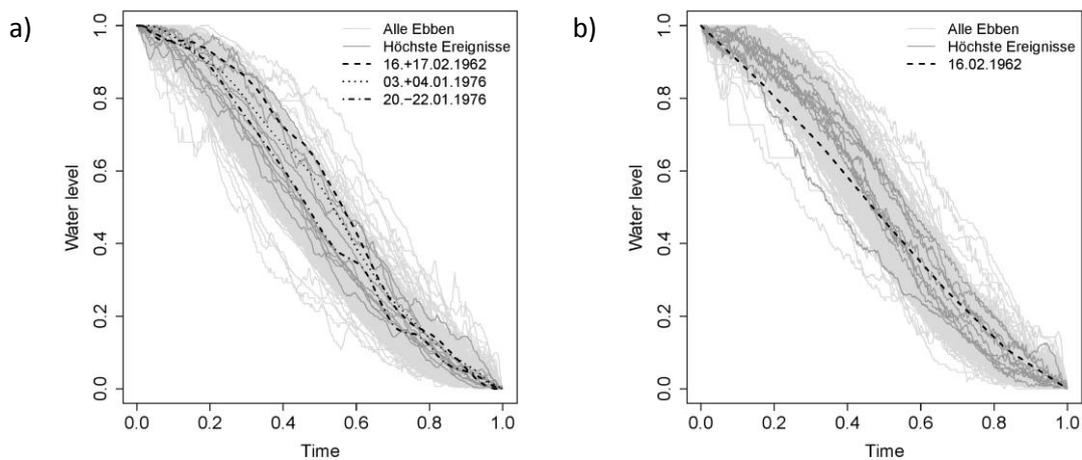


Abb. 3.13: Vergleich der Wasserstandverläufe aller Ebden mit den Wasserstandverläufen hoher und sehr hoher Sturmfluten für die Stationen: a) Norderney, b) Borkum

Dies geht auch aus der Abb. 3.14 hervor. Die mittleren Verläufe aller Ebden (schwarze Linie) und der zehn höchsten Ereignisse (blaue Linie) weichen nur geringfügig voneinander ab und können näherungsweise durch eine Sinusfunktion wiedergegeben werden (rote Linie). Die einzelnen Verläufe der Ebden schwanken wiederum um den mittleren Verlauf.

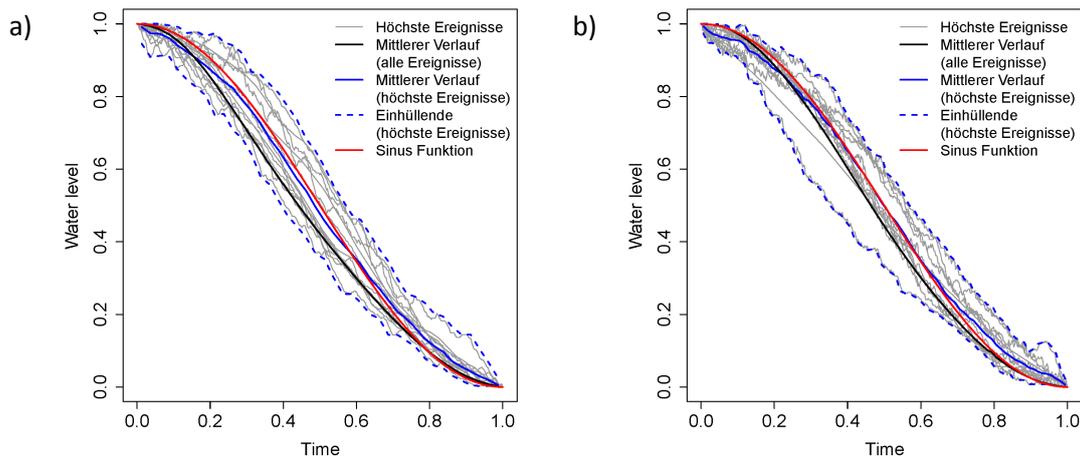


Abb. 3.14: Vergleich der Wasserstandverläufe hoher Sturmfluten (Mittelwert und Einhüllende) mit dem mittleren Verlauf alle Sturmfluten und einem sinusförmigen Verlauf für die Stationen: a) Norderney, b) Borkum

### 3.4.2 Flutdauern und Ebbedauern

Als weitere Größen sind die Flutdauern und Ebbedauern der Sturmfluttide untersucht worden. In Abb. 3.14 sind Flutdauern und die jeweils darauffolgenden Ebbedauern dargestellt. In hellgrau sind die Dauern der Zeitreihe der Thw und Tnw dargestellt. Anhand dieser Zeitreihe sind die mittleren Flut- und Ebbedauern ermittelt worden. Für beide Stationen beträgt die mittlere Flutdauer ( $\bar{D}_F$ ) rund 362 Minuten, die mittlere Ebbedauer ( $\bar{D}_E$ ) rund 383 Minuten. Die in Abb. 3.15 dunkelgrau dargestellten Datenpaare ( $D_F$ ,  $D_E$ ) stammen aus der Zeitreihe mit der zeitlichen Auflösung von einer Minute.

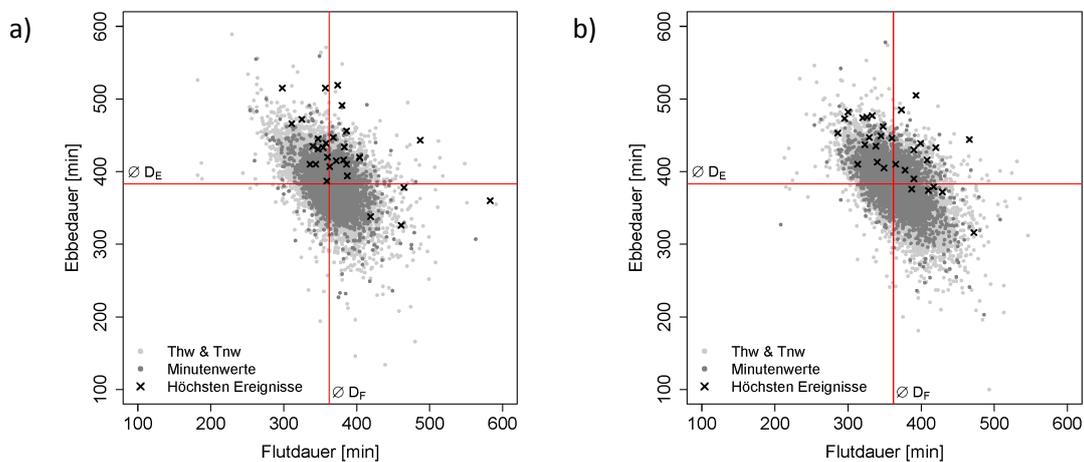


Abb. 3.15: Flut- und Ebbedauern für die Stationen: a) Norderney, b) Borkum

Mit schwarzen Kreuzen sind die Flutdauern und die darauffolgenden Ebbedauern der 30 höchsten Sturmfluten aus der Zeitreihe der Thw und Tnw gekennzeichnet. Es ist zu erkennen, dass die Flutdauern der höchsten Sturmfluten um die mittlere Flutdauer streuen. Die zugehörigen Ebbedauern sind für beide Stationen in fast allen Fällen länger als die mittlere Ebbedauer.

Aus der Auswertung der Dauern wird deutlich, dass die Flut- und Ebbedauern der Sturmfluten stark schwanken und zum Teil deutlich von den mittleren Verhältnissen abweichen. Da

das Bauwerksversagen während einer Sturmflut höchst wahrscheinlich zum Zeitpunkt des maximalen Wasserstandes eintreten wird hat die Ebbedauer vermutlich einen größeren Einfluss auf die Größe der Überflutungsfläche, Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten. Die angesetzte mittlere Ebbedauer  $\bar{\Delta}D_E$  scheint daher zu gering zu sein.

## 4 Zukünftige Arbeiten

### 4.1 Sturmflutganglinien Ostsee

Für die Pegel der Ostsee ist bislang noch nicht nachgewiesen worden, dass alle Formen von Sturmflutganglinie gleichwahrscheinlich sind. Diese Annahme muss noch belegt werden. Darüber hinaus muss untersucht werden ob die Form der Ganglinie einen Einfluss auf die Größe der überfluteten Fläche, die Wassertiefe und Strömungsgeschwindigkeiten hat. Sollte dies nicht der Fall sein, kann das Verfahren zur Generierung von Ostseeganglinien einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit dahingehend vereinfacht werden.

In einem nächsten Schritt werden Verfahren untersucht, mit deren Hilfe sich Ganglinien auch in Gebieten mit unzureichender Datengrundlage generieren lassen beziehungsweise mit denen Ganglinien für den Bereich zwischen zwei Pegeln interpoliert werden können.

### 4.2 Sturmflutganglinien Nordsee

Bei der Simulation von Nordseeganglinien muss zukünftig die Variabilität der Flut- und Ebbedauer sowie des Wasserstandverlaufes berücksichtigt werden. Es muss geprüft werden, welchen Einfluss Änderungen in diesen Charakteristiken auf die Größe der überfluteten Fläche, die Wassertiefe sowie Strömungsgeschwindigkeiten haben.

### 4.3 Sturmflutgenerator

Der Sturmflutgenerator soll so erweitert werden, dass für alle Projektgebiete, wenn möglich auch für beliebige Positionen entlang der gesamten Nord- und Ostseeküste, zufällige Sturmfluten mit einer beliebigen Eintrittswahrscheinlichkeit erzeugt werden können.

## 5 Zusammenfassung

Für Ostseestationen sind Jahresmaxima der Wasserstände und Füllen von Sturmflutganglinien statistisch untersucht und bewertet worden. An die einzelnen Größen, sowie an die bivariate Stichprobe sind Verteilungsfunktionen angepasst worden. Dadurch können sowohl den einzelnen Größen als auch Kombinationen von Füllen und Wasserständen Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden.

Für Ostseestationen ist eine Methode entwickelt worden, mit der die tatsächliche Formenvielfalt von dimensionslosen Sturmflutganglinien nachgebildet werden kann. Die entwickelte Methode ist auf vier Ostseepegel (Wismar, Rostock – Warnemünde, Stralsund und Greifswald) angewendet worden. Mithilfe von Kombinationen von Füllen und Wasserständen einer

bestimmten Wahrscheinlichkeit können dimensionslose Ganglinien in der Höhe und in der Breite skaliert werden.

Mit einem Sturmflutgenerator lassen sich für die vier Stationen beliebig viele zufällige Sturmflutganglinien einer beliebigen Wahrscheinlichkeit simulieren.

Anhand der Nordseepegel Norderney und Borkum sind erste Sturmflutganglinien für Nordseestationen abgeleitet worden. Für Sturmfluttiden ist damit begonnen worden Untersuchungen zu Flut- und Ebbedauern durchzuführen sowie zum Wasserstandverlauf zwischen Thw und Tnw bzw. Tnw und Thw.

## 6 Schrifttum

- BRECHMANN E. (2010): Truncated and simplified regular vines and their applications. München, Germany: Technische Universität München, Diplomarbeit
- COLES S. (2001): An Introduction to statistical modelling of extreme values. Springer-Verlag London, Great Britain, ISBN 1-85233-459-2
- GENEST, C. & FAVRE, A.-C. (2007): Everything You Always Wanted to Know about Copula Modeling but Were Afraid to Ask. Journal of Hydrologic Engineering 12(4)
- JOE, H. (1997): Multivariate Models and Dependence Concepts. Chapman and Hall, London. ISBN 0- 412-07331-5
- JOHANSSON, N.L., KOTZ S. AND BALAKRISHNAN, N. (1994): Continuous Univariate Distributions Volume 1. 2nd Edition. John Wiley and Sons, New York. ISBN 0-471-58495-9
- KLEIN, B. (2009): Ermittlung von Ganglinien für die risikoorientierte Hochwasserbemessung von Talsperren. Bochum, Germany: Ruhr-Universität Bochum, Ph.D. thesis, 205p.
- KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN (2007): Die Küste – EAK 2002: Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken, Bd. 65, Heide i. Holstein, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens und Co
- NELSON, R.B. (2006): An Introduction to Copulas. 2nd Edition. New York, NY: Springer, 269p.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2010): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- SACKL, B., (1987): Ermittlung von Hochwasser – Bemessungsganglinien in beobachteten und unbeobachteten Einzugsgebieten. Graz, Austria: Technische Universität Graz, Ph.D. thesis, 253p.
- SALVADORI, G., DE MICHELE, C., KOTTEGODA, N. T. AND ROSSO, R., (2007): Extremes in Nature An Approach to Using Copulas. Dordrecht, Netherlands: Springer, 292p.
- SALVADORI, G., DE MICHELE, C., CANOSSO, M., PETACCIA, A.. AND ROSSO, R., (2005): Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway. Journal of Hydrologic Engineering 10(1)

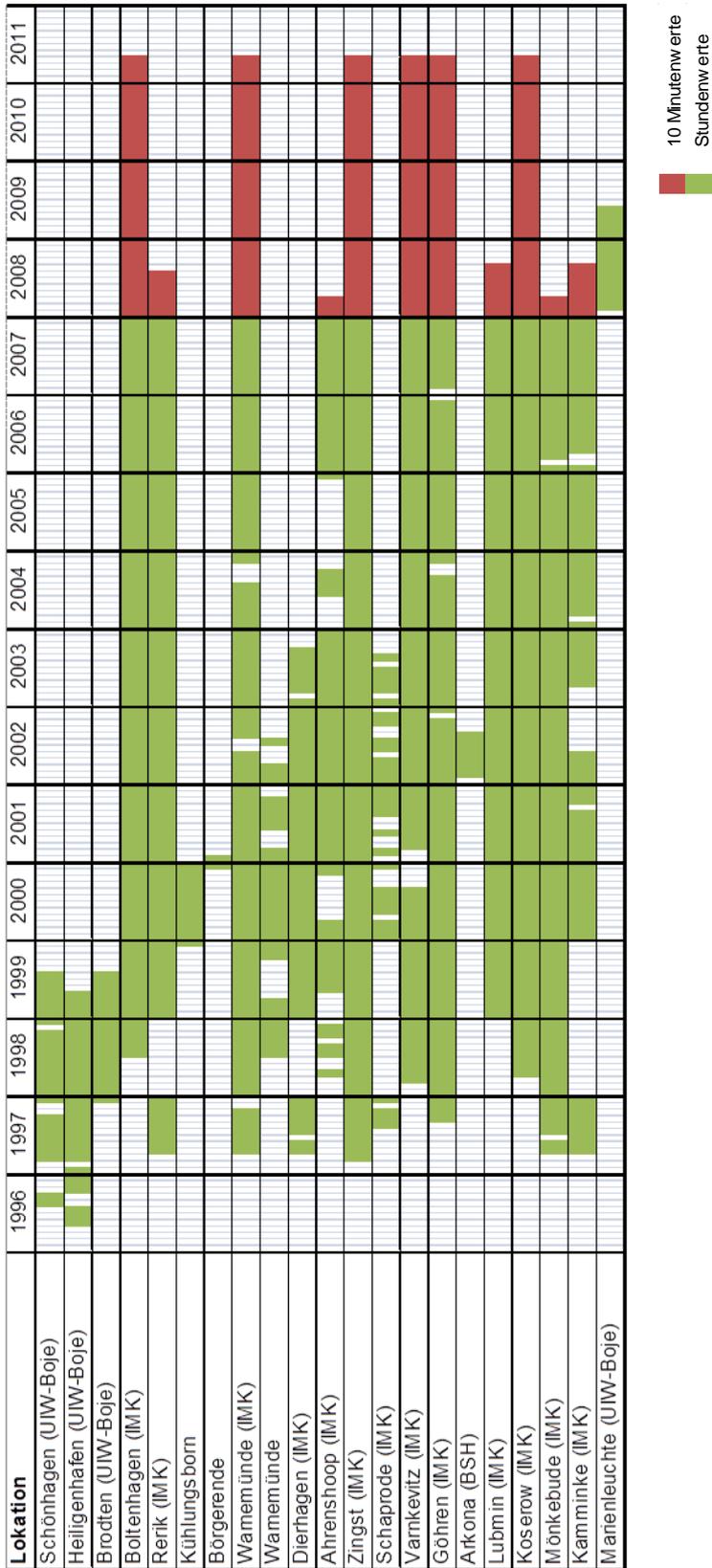
SALVADORI, G. AND DE MICHELE, C,( 2004): Frequency analysis via copulas :Theoretical aspects and applications to hydrological events. Water Resources Research, 40, W12511

SCHWEIZER, B. AND WOLFF, E.F., (1981): On nonparametric measures of dependence for random variables. The annals of Statistics, 9(4), 879-885





Tab. 7.2: Übersicht über digital verfügbare Seegangsgangdaten Ostsee (Stand Dez. 2011)



10 Minutenwerte  
 Stundenwerte

Tab. 7.3: Übersicht über digital verfügbare Winddaten (Stand Dez. 2011)

Lokation	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Borkum Süderstraße								
Krummhörn								
Emden-Nesserland								
Emden								
Norderney								
Spieckeroog								
Sengwarden								
Helgoland								
Nordholz								
Cuxhaven								
Störsperrwerk								
Brunsbüttel								
Elpersbüttel								
Büsum (Westmolenkopf)								
Eidersperrwerk								
Sankt Peter-Ording								
Husum								
Strucklahnungshörn								
Hallig Hooge								
Wrixum/ Föhr								
Hörum/Sylt								
Westerland (WIND)								
Westerland (UBA)								
List auf Sylt								
Glücksburg-Meierwik								
Flensburg (Schäferhaus)								
Schönhagen								
Kiel-Holtenau								
Kalifornien								
Westermarkelsdorf								
Pelzerhaken								
Travemünde								
Boltenhagen (IMK)								
Boltenhagen (DWD)								
Rerik (IMK)								
Bastorf-Kägsdorf								
Warnemünde (IMK)								
Rostock-Wmnde								
Ahrenshoop (IMK)								
Darßer Ort								
Zingst (IMK)								
Barth								
Hiddensee-Vitte								
Schaprode (IMK)								
Varnekevit (IMK)								
Arkona								
Göhren (IMK)								
Putbus								
Greifswald								
Greifswald-Wiek								
Lubmin (IMK)								
Greifswalder Oie								
Koserow (IMK)								
Ückeremünde								

10 Minuten erte  
 Stunden erte



UNIVERSITÄT ROSTOCK

Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau

# **HoRisk - B: Belastungen von Küstenschutzanlagen und Konsequenzen des Versagens im Bereich der Ostseeküste**

Arbeitspaket 3: Versagensmechanismen und  
Versagenswahrscheinlichkeiten

**Zwischenbericht 2011**

30. April 2012

<b>Förderkennzeichen:</b>	<b>03KIS079</b>
<b>Zuwendungsempfänger:</b>	<b>Universität Rostock</b> <b>Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät</b> <b>Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau</b>
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>	<b>01.11.2009 bis 30.04.2013</b>
<b>Berichtszeitraum:</b>	<b>01.01.2011 bis 31.12.201</b>

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Versagensmechanismen und –wahrscheinlichkeiten von Hochwasserschutzdünen</b> .....	<b>3</b>
2.1	Dünenausgangsprofil.....	3
2.2	Hydrodynamische Bedingungen .....	4
<b>3</b>	<b>Zuverlässigkeitsanalyse und Versagenswahrscheinlichkeit</b> .....	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung &amp; Ausblick</b> .....	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Schrifttum</b> .....	<b>8</b>

## 1 Einleitung

Die europäische Union verabschiedete im Oktober 2007 die „Richtlinie der Europäischen Union und des Rates über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken“ (Directive 2007/60/EC). Ziel dieser Richtlinie ist es, die Gefahren, die Hochwasser auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das kulturelle Erbe und die wirtschaftliche Tätigkeiten ausübt, zu verringern und das Management im Umgang mit den Hochwassergefahren zu verbessern. Die Umsetzung dieser Direktive ist insbesondere in den Küstengebieten Deutschlands von großer Bedeutung. Auf ca. 12.000 Km<sup>2</sup> werden rd. 2,4 Mio. Einwohner durch Küstenschutzanlagen geschützt.

In diesem Zusammenhang ist es Ziel des von der RWTH Aachen, der Universität Rostock sowie dem NLWKN Norden/Norderney in Kooperation geplanten Forschungsvorhabens HoRisk (Hochwasserrisikomanagement im Küstenraum), küstenschutzbezogene Ansätze und Methoden für anwendungsorientierte Schadens- bzw. Risikoanalysen als Grundlage für die Erarbeitung von Hochwassergefahrenkarten, Hochwasserrisikokarten und Hochwasserrisikomanagementplänen abzuleiten. Neben den Antragstellern sind der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN), das Staatliche Amt für Umwelt und Natur, Mittleres Mecklenburg (StALU MM) sowie die Landwirtschaftskammer Niedersachsen als Projektpartner mit eingebunden. Zur Ableitung von anwendungsorientierten Schadens- und Risikoanalysen werden im Verbundprojekt „HoRisk“ Untersuchungen zur Durchführung von Schadens- & Risikoanalysen in Küstengebieten durchgeführt. Die Arbeiten im Projekt sind in insgesamt 9 Arbeitspakete (AP0 bis AP8) eingeteilt, welche die wesentlichen Schritte einer Risiko- bzw. Schadensanalyse abbilden. Im Einzelnen sind dies:

- AP0- Definition von Begriffen in Zusammenhang mit Schadens- bzw. Risikoanalyse-Verfahren
- AP1- Vergleichende Darstellung und Diskussion der verfügbaren Schadens- bzw. Risikoanalyse-Verfahren und Küstenschutzstrategien
- AP2- Statistische Untersuchungen zu den Gefährdungen und Belastungen auf Bauwerke, z.B. Wasserstände, Seegang, Strömungen, Eisgang
- AP3- Ermittlung der maßgebenden Versagensmechanismen und Versagenswahrscheinlichkeiten für Hochwasserschutzbauwerke (Deiche, Dünen, Hochwasserschutzwände, Punktbauwerke) und Kombinationen von Bauwerken
- AP4- Beurteilung der Wirkung unterschiedlicher Küstenschutzsysteme in Bezug auf deren Schutzwirkung und Überflutungsausbreitung im Versagensfall, Ermittlung relevanter Prozesse und maßgebender Einflussfaktoren
- AP5- Bewertung von Schadenspotentialen und Schäden, Überprüfung und Weiterentwicklung der Schadensfunktionen für einzelne Schadenkategorien, Vergleichende Untersuchung und Weiterentwicklung von Methoden zur Ermittlung von Schadenspotentialen und

Schäden, Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Modelle zur Schadenspotential- und Schadensanalyse

- AP6- Beurteilung der Gesamtunsicherheiten im Rahmen einer Schadens- bzw. Risikoermittlung, Untersuchungen zum Umgang mit bestehenden Unsicherheiten insbesondere bezogen auf küstenspezifische Fragestellungen und zu spezifische Sensitivitäten für die Gesamtermittlung, Untersuchung der Auswirkung der Ergebnisse aus den AP 2 bis AP 5 auf die Schadens- bzw. Risikoermittlung und zum Einfluss der Datenlage
- AP7- Untersuchungen und Vergleiche zu baulichen Möglichkeiten zur Reduzierung des zu erwartenden Schadens- bzw. Risikos für typische Küstenschutzsysteme
- AP8- Anwendung der gewonnen Erkenntnisse aus den AP 1 bis AP 7 auf ausgewählte Küstengebiete in Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein und Niedersachsen, Erprobung der Praktikabilität der entwickelten Methoden für eine Schadens- bzw. Risikoanalyse, Eingrenzung der zu erwartenden Aussagebereiche aufgrund der methodischen Unsicherheiten

Im Folgenden werden die Arbeiten und Ergebnisse für das Arbeitspaket 3 „Versagensmechanismen und Versagenswahrscheinlichkeiten“, die im Berichtszeitraum 01.01.2011 bis 31.12.2011 durchgeführt wurden, zusammenfassend dargestellt. Die Federführung für dieses Arbeitspaket liegt bei der RWTH Aachen. Von der Universität Rostock werden die ostseespezifischen Anlagentypen und Fragestellungen bearbeitet.

Im Berichtszeitraum (Kalenderjahr 2011) wurden die ersten Untersuchungen zur Versagenswahrscheinlichkeit von Hochwasserschutzdünen auf Grundlage eines einfachen empirischen Ansatzes (Van Gent et. al., 2008) durchgeführt. Dazu wurde ein numerisches Berechnungsprogramm erstellt, welches die Berechnungen automatisiert ausführt. Zum einen wird die resultierende Kronenbreite nach dem Erosionsansatz von Van Gent et.al. (2008) mit Hilfe numerischer Integration bestimmt. Zum anderen berechnet das Programm die Versagenswahrscheinlichkeit unter Anwendung einer Zuverlässigkeits- und Monte Carlo Analyse. Der verwendete Ansatz (Van Gent et. al., 2008) wurde bereits im Zwischenbericht 2010 dargestellt und wird daher hier nicht noch einmal erläutert.

## **2 Versagensmechanismen und –wahrscheinlichkeiten von Hochwasserschutzdünen**

### **2.1 Dünenausgangsprofil**

Für die Berechnungen der Versagenswahrscheinlichkeit mit Hilfe des Ansatzes von Van Gent et. al. (2008) ist die Definition eines Ausgangsprofils für die betrachtete Hochwasserschutzdüne erforderlich. Als Vollschutzdüne (vgl. Zwischenbericht 2010) besitzt diese im für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen eine innere Böschungsneigung von 1:2

und eine äußere Böschungsneigung von 1:3. Der Dünenfuß liegt bei +1m NHN. Für das Strandprofil werden zwei Bereiche unterschieden. Der obere Bereich des Strandprofils (trockener Strand) hat eine Neigung von 1:50, während der untere Bereich (Unterwasserprofil) eine flachere Neigung von 1:100 besitzt. In Abb. 1 ist das Dünen- bzw. Strandprofil dargestellt, wie es für die Berechnungen verwendet wird. Das Berechnungsprogramm wird so gestaltet, dass sowohl die Kronenhöhe als auch die Kronenbreite variiert werden können. Zunächst wird die Kronenhöhe auf 5 m festgelegt. Dies entspricht der Höhe von Hochwasserschutzdünen (Vollschutzdünen) an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns. Die Neigungen für die Binnen- bzw. Außenböschung der Düne sowie die Neigungen für den trockenen Strand und das Unterwasserprofil lassen sich ebenfalls variieren.

Der Korndurchmesser des Sedimentes wird mit 0,3 mm angenommen. Dies entspricht dem Korndurchmesser von Mittelsand, der vorherrschenden Sedimentklasse, welche an den Dünen und Stränden zu finden ist.

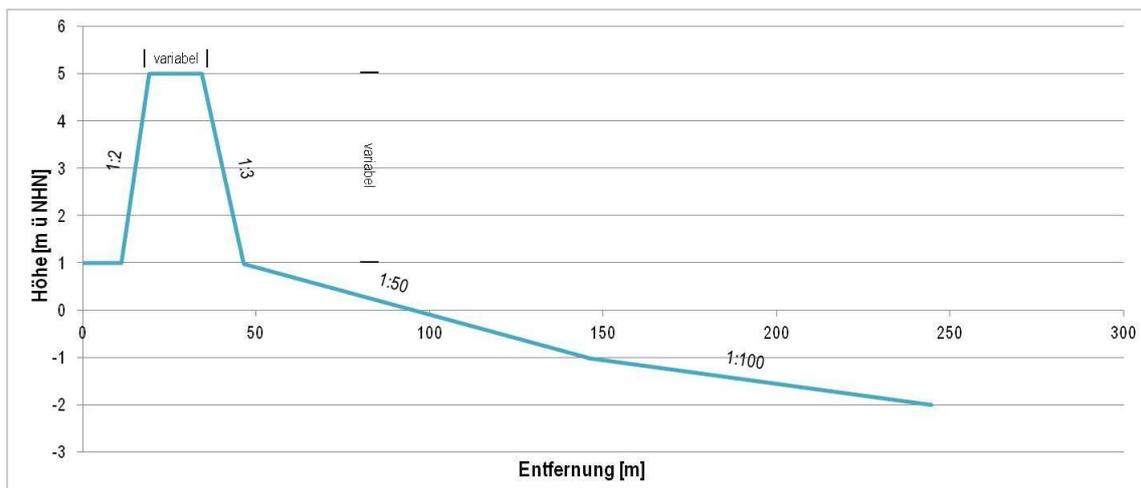


Abb. 1: Dünenausgangprofil für die Berechnungen der Versagenswahrscheinlichkeit

Das Berechnungsprogramm (vgl. Zwischenbericht 2010) wurde so verändert, dass Vorschädigungen der Düne durch frühere Sturmfluten berücksichtigt werden. Dazu werden die nach einer Sturmflut resultierenden Dünenprofile als neues Initialprofil eingelesen.

## 2.2 Hydrodynamische Bedingungen

Die Berechnungen zur Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten erfolgen auf der Grundlage probabilistischer Ansätze. Als Eingangsgrößen für die probabilistische Analyse sind eine große Anzahl von Kombinationen der relevanten hydrodynamischen Bedingungen z.B. mit der Monte-Carlo Methode zu erzeugen. Wie bereits erwähnt ist der Dünenerosionsansatz von Van Gent et. al. (2008) Grundlage für die Berechnungen. Als hydrodynamische

Bedingungen sind für diesen Ansatz die Wellenhöhe, die Wellenperiode und der Sturmflutwasserstand erforderlich. In einem ersten Schritt und als Grundlage für eine Sensitivitätsanalyse wurde zunächst die Wellenhöhe probabilistisch eingesteuert und die Wellenperioden sowie der Sturmflutwasserstand deterministisch festgelegt. Im zweiten Schritt wurde dann das Berechnungsprogramm so umgestaltet, dass Wellenhöhen und auch die Sturmflutwasserstände mit kombinierter Eintrittswahrscheinlichkeit, probabilistisch in die Berechnungen eingehen. Die Wellenperioden werden mittels einer Berechnungsformel in Abhängigkeit der Wellenhöhe bestimmt.

Um Wellenhöhen und Sturmflutwasserstände mit kombinierter Eintrittswahrscheinlichkeit zu erhalten, werden bivariate statistische Modelle auf die genannten Größen angewendet (vgl. Zwischenbericht 2011 AP2, Salecker et. al. 2011)).

Zunächst werden den Wellenhöhen und Wasserständen Ränge in aufsteigender Reihenfolge zu geordnet. Um das Maß der Abhängigkeit der beiden Größen zu beurteilen wird ein Abhängigkeitsparameter, das so genannte Kendall's Tau bestimmt:

$$\tau_n = \frac{4}{n(n-1)} * (P_n - 1) \quad (1)$$

Mit:  $\tau_n$  = Kendall's Tau [-]  
 $P_n$  = Anzahl der diskordanten Datenpaare [-]  
 $n$  = Gesamtanzahl der Datenpaare [-]

Der Parameter beschreibt die Abhängigkeit der beiden Größen über die vergebenen Ränge, nicht über die Werte selbst.

Zur Ableitung von Archimedischen Copula-Funktionen stehen so genannte Generatorfunktionen zur Verfügung. Jeder dieser Generatorfunktionen enthält einen Anpassungsparameter  $\theta$ , der die Copula-Funktion definiert.

Zwischen dem Kendall's Tau und der Generatorfunktion besteht folgender Zusammenhang:

$$\tau_n = 1 + 4 \int_0^1 \frac{\phi(t)}{\phi'(t)} dt \quad (2)$$

$$\phi(t) = -\log\left(\frac{e^{-\phi t} - 1}{e^{-\phi} - 1}\right) \quad (3)$$

Mit:  $\phi(t)$  = Frank Copula Generatorfunktion [-],

$\varphi'(t) = 1$ . Ableitung von  $\varphi(t)$  [-]

Durch Umschreiben des oben genannten Integrals erhält man den Anpassungsparameter  $\theta$ . Mit Hilfe dieses Parameters lässt sich die Copula-Funktion definieren, die die Wellenhöhen und Wasserstände beschreibt.

Um die Anpassungsgüte der Copula-Funktion zu bewerten, werden gleichverteilte Werte  $\varepsilon$  [0,1] auf die Copula-Funktion angewendet. Ist die gewählte Copula-Funktion geeignet die Wellenhöhen und Wasserstände zu beschreiben, zeigen die Ergebnisse die gleiche Verteilung wie die Ausgangsdaten selbst. Allerdings weisen diese Ergebnisse ( $\varepsilon$  [0,1]) weder eine Wahrscheinlichkeit auf, noch entsprechen sie Realisationen von Wellenhöhen und Wasserständen. D.h. in einem nächsten Schritt müssen Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden und die Werte ( $\varepsilon$  [0,1]) müssen auf Wellenhöhen und Wasserstände rücktransformiert werden. Eine Zuordnung der Wahrscheinlichkeiten erreicht man über die Anwendung der Ergebnisse der Copula-Funktion auf deren Dichtefunktion. Die Rücktransformation erfolgt über die Anwendung der Ergebnisse auf die Inverse der Randverteilungen der Wellenhöhen und Wasserstände.

Die Wellenperioden werden mittels einer Berechnungsformel in Abhängigkeit der Wellenhöhe bestimmt:

$$T_p = 1,21 * (1,11 * H_s + 2,5) \quad (4)$$

### 3 Zuverlässigkeitsanalyse und Versagenswahrscheinlichkeit

Ein Hilfsmittel für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit ist die Zuverlässigkeitsanalyse. In diesen Analysen werden die auftretenden Belastungen auf ein Bauwerk, hier die Hochwasserschutzdüne dem Widerstand des Bauwerks gegenübergestellt. Über eine so genannte Grenzzustandsgleichung wird die Zuverlässigkeit der Hochwasserschutzdüne beurteilt. Solange das Ergebnis der Grenzzustandsgleichung positiv ist, ist kein Versagen des Bauwerkes, hier der Hochwasserschutzdüne, zu erwarten. Bei negativem Ergebnis der Grenzzustandsgleichung tritt ein Versagen des Bauwerkes ein.

Im vorliegenden Fall, hat die Grenzzustandsgleichung die folgende Form:

$$Z = m * d_{cr\_act} - d_{cr\_crit} \quad (5)$$

Mit:  $m$  = Modellfaktor [-]

$d_{cr\_act}$  = resultierende Kronenbreite im Gleichgewichtszustand [m]

$d_{cr\_crit}$  = kritische Kronenbreite [m]

Der Modellfaktor  $m$  berücksichtigt hierbei die mit dem Dünenerosionsmodell verbundenen Unsicherheiten. Da in der Literatur kaum Hinweise zu diesem Faktor zu finden waren wird dieser auf 0,4 festgelegt.

Die resultierende Kronenbreite wird nach dem Ansatz von Van Gent et. al. (2008) mittels numerischer Integration bestimmt.

Die kritische Kronenbreite, d.h. die minimal akzeptable Kronenbreite wird auf 5 m festgelegt. Dieser Wert entspricht der Kronenbreite des Sicherheitsteils der Hochwasserschutzdüne (vgl. Zwischenbericht 2010).

Auf Grundlage der Grenzzustandsgleichung, kann die Versagenswahrscheinlichkeit mit Hilfe einer Monte-Carlo Analyse berechnet werden. Die Versagenswahrscheinlichkeit kann bei einer ausreichenden Anzahl von Berechnungen als relative Häufigkeit für negative Grenzzustandsgleichung betrachtet werden. D.h. die Versagenswahrscheinlichkeit ist der Quotient aus der Anzahl der Berechnungen mit einer negativen Grenzzustandsgleichung und der Gesamtanzahl der Berechnungen.

$$P_f \approx \frac{n_{fai}}{n} \quad (6)$$

Mit:  $P_f$  = Versagenswahrscheinlichkeit [-]  
 $n_{fai}$  = Anzahl der Berechnungen mit negativer Grenzzustandsgleichung [-]  
 $n$  = Gesamtanzahl der Berechnungen [-]

Abb. 2 zeigt beispielhaft die Versagenswahrscheinlichkeit für Simulationen mit Wellenhöhen und Sturmflutwasserständen mit einem Wiederkehrintervall von 200 Jahren als Funktion der Kronenbreite der Initialdüne.

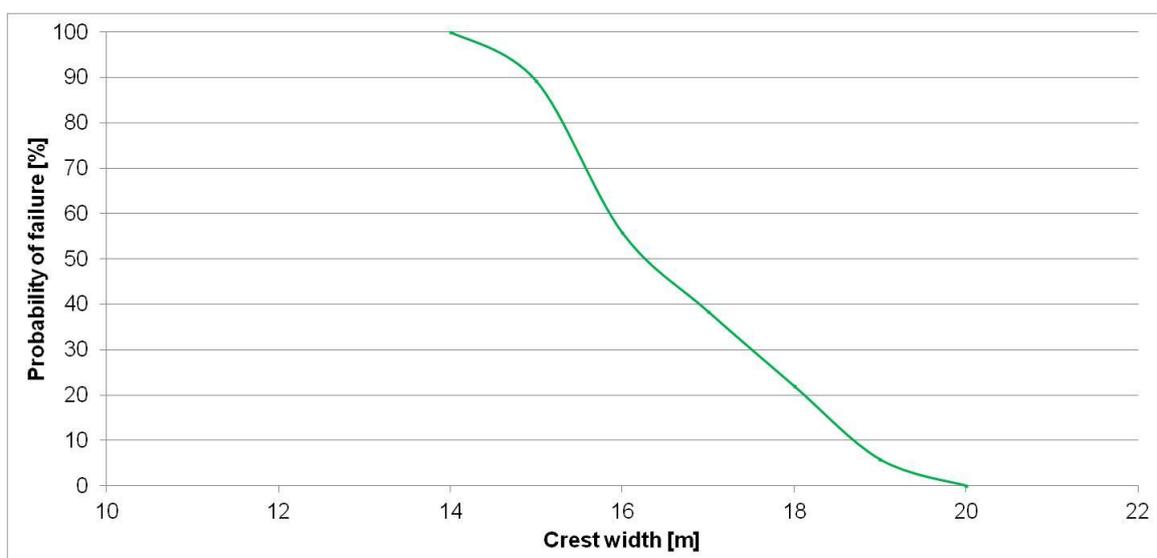


Abb. 2: Versagenswahrscheinlichkeit als Funktion der Kronenbreite der Initialdüne

## 4 Zusammenfassung & Ausblick

Im Berichtszeitraum 2011 wurde im Arbeitspaket 3 ein Programm zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit von Dünen auf Grundlage des Dünenerosionsansatzes von Van Gent et. al. (2008) erstellt. Dieses Programm nutzt das Ausgangsprofil der Initialdüne und simuliert die Dünenerosion nach dem Erosionsansatz von Van Gent et. al. (2008). Die resultierende Kronenbreite im Gleichgewichtsprofil wird mittels numerischer Integration ermittelt. Die Versagenswahrscheinlichkeiten werden mit Hilfe von Monte Carlo Analysen bestimmt. Hierzu werden in einem ersten Schritt die Versagenswahrscheinlichkeiten für verschiedene Wiederkehrintervalle von Eingangsdaten berechnet und verglichen. Aufbauend auf die bisher erzielten Ergebnisse ist geplant, die Dünenerosion mit dem numerischen Modell (XBeach) zu berechnen, welches neben dem Küstenquertransport des Sedimentes auch den Küstenlängstransport berücksichtigt.

## 5 Schrifttum

- Gruhn, A., et.al. (2011): On failure mechanisms and failure probabilities of flood protection dunes at the German Baltic Sea Coast- first results of a research project-, 5<sup>th</sup> SCACR 2011 International Short Conference on Applied Coastal Research, Proceedings, RWTH Aachen University, 2011, [http://www.iww.rwth-aachen.de/fileadmin/internet/scacr/SCACR\\_2011\\_Proceedings.pdf](http://www.iww.rwth-aachen.de/fileadmin/internet/scacr/SCACR_2011_Proceedings.pdf)
- Salecker, D., et.al. (2011): Parameterization of storm surges as a basis for assessment of risk of failure for coastal protection measures, 5<sup>th</sup> SCACR 2011 International Short Conference on Applied Coastal Research, Proceedings, RWTH Aachen University, 2011, [http://www.iww.rwth-aachen.de/fileadmin/internet/scacr/SCACR\\_2011\\_Proceedings.pdf](http://www.iww.rwth-aachen.de/fileadmin/internet/scacr/SCACR_2011_Proceedings.pdf)
- Van Gent, M.R.A. et.al. (2008): Large-scale dune erosion tests to study the influence of wave periods, Coastal Engineering, Vol. 55, S. 1041 - 1051, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.04.003>



UNIVERSITÄT ROSTOCK

Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau

## **HoRisk - B: Belastungen von Küstenschutzanlagen und Konsequenzen des Versagens im Bereich der Ostseeküste**

Arbeitspaket 4: Konsequenzen des Versagens - Überflutung

**Zwischenbericht 2011**

30. April 2012

**Förderkennzeichen:** 03KIS079  
**Zuwendungsempfänger:** Universität Rostock  
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau  
**Laufzeit des Vorhabens:** 01.11.2009 bis 30.04.2013  
**Berichtszeitraum:** 01.01.2011 bis 31.12.2011

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Auswertung der Vergleichsrechnungen</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Polderflächen</b> .....	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Bathymetrien</b> .....	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Breschenentwicklung</b> .....	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Sturmflutwasserstandsganglinien</b> .....	<b>8</b>
<b>7</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>11</b>
	7.1 Breschenbreite.....	11
	7.2 Versagensdauer.....	12
	7.3 Breschenlokation.....	13
	7.4 Wiederkehrintervall.....	14
	7.5 Sturmflutfülle.....	15
	7.6 Tidebeeinflusste Sturmflutganglinien.....	16
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>17</b>
<b>9</b>	<b>Schrifttum</b> .....	<b>18</b>

## 1 Einführung

Die europäische Union verabschiedete im Oktober 2007 die „Richtlinie der Europäischen Union und des Rates über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken“ (Directive 2007/60/EC). Ziel dieser Richtlinie ist es, die Gefahren, die Hochwasser auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das kulturelle Erbe und die wirtschaftliche Tätigkeiten ausübt, zu verringern und das Management im Umgang mit den Hochwassergefahren zu verbessern. Die Umsetzung dieser Direktive ist insbesondere in den Küstengebieten Deutschlands von großer Bedeutung.

In diesem Zusammenhang ist es Ziel des von der RWTH Aachen, der Universität Rostock sowie dem NLWKN Norden/Norderney in Kooperation geplanten Forschungsvorhabens HoRisk (Hochwasserrisikomanagement im Küstenraum), küstenschutzbezogene Ansätze und Methoden für anwendungsorientierte Schadens- bzw. Risikoanalysen als Grundlage für die Erarbeitung von Hochwassergefahrenkarten, Hochwasserrisikokarten und Hochwasserrisikomanagementplänen abzuleiten. Neben den Antragstellern sind der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN), das Staatliche Amt für Umwelt und Natur, Mittleres Mecklenburg (StALU MM) sowie die Landwirtschaftskammer Niedersachsen als Projektpartner mit eingebunden.

Zur Ableitung von anwendungsorientierten Schadens- und Risikoanalysen werden im Verbundprojekt „HoRisk“ Untersuchungen zur Durchführung von Schadens- & Risikoanalysen in Küstengebieten durchgeführt. Die Arbeiten im Projekt sind in insgesamt 9 Arbeitspakete (AP0 bis AP8) eingeteilt, welche die wesentlichen Schritte einer Risiko- bzw. Schadensanalyse abbilden. Im Einzelnen sind dies:

- AP 0 - Definition von Begriffen in Zusammenhang mit Schadens- bzw. Risikoanalyseverfahren
- AP 1 - Vergleichende Darstellung und Diskussion der verfügbaren Schadens- bzw. Risikoanalyseverfahren und Küstenschutzstrategien
- AP 2 - Statistische Untersuchungen zu den Gefährdungen und Belastungen auf Bauwerke, z.B. Wasserstände, Seegang, Strömungen, Eisgang
- AP 3 - Ermittlung der maßgebenden Versagensmechanismen und Versagenswahrscheinlichkeiten für Hochwasserschutzbauwerke (Deiche, Dünen, Hochwasserschutzwände, Punktbauwerke) und Kombinationen von Bauwerken
- AP 4 - Beurteilung der Wirkung unterschiedlicher Küstenschutzsysteme in Bezug auf deren Schutzwirkung und Überflutungsausbreitung im Versagensfall, Ermittlung relevanter Prozesse und maßgebender Einflussfaktoren

- AP 5 - Bewertung von Schadenspotentialen und Schäden, Überprüfung und Weiterentwicklung der Schadensfunktionen für einzelne Schadenkategorien, Vergleichende Untersuchung und Weiterentwicklung von Methoden zur Ermittlung von Schadenspotentialen und Schäden, Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Modelle zur Schadenspotential- und Schadensanalyse
- AP 6 - Beurteilung der Gesamtunsicherheiten im Rahmen einer Schadens- bzw. Risikoermittlung, Untersuchungen zum Umgang mit bestehenden Unsicherheiten insbesondere bezogen auf küstenspezifische Fragestellungen und zu spezifische Sensitivitäten für die Gesamtermittlung, Untersuchung der Auswirkung der Ergebnisse aus den AP 2 bis AP 5 auf die Schadens- bzw. Risikoermittlung und zum Einfluss der Datenlage
- AP 7 - Untersuchungen und Vergleiche zu baulichen Möglichkeiten zur Reduzierung des zu erwartenden Schadens- bzw. Risikos für typische Küstenschutzsysteme
- AP 8 - Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse aus den AP 1 bis AP 7 auf ausgewählte Küstengebiete in Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein und Niedersachsen, Erprobung der Praktikabilität der entwickelten Methoden für eine Schadens- bzw. Risikoanalyse, Eingrenzung der zu erwartenden Aussagebereiche aufgrund der methodischen Unsicherheiten

Eine wesentliche Grundlage für die Schadensermittlung bildet die Beurteilung der Wirkung unterschiedlicher Küstenschutzsysteme in Bezug auf deren Schutzwirkung und Überflutungsausbreitung im Versagensfall. Auf der Grundlage umfangreicher Sensitivitätsuntersuchungen werden die relevanten Prozesse sowie die maßgebenden Einflussfaktoren identifiziert und bewertet. Hierzu zählen:

- Auswirkung von unterschiedlicher Breschenentwicklung bei Deichen und Versagensformen von Bauwerken im Deich auf die Überflutung
- Wirkung von Küstenschutzsystemen (z.B. Vorland, Sommerdeiche, 2. Deichlinie, Polder, System HW-Schutzdüne – Deich)
- Untersuchungen zum Einfluss der Topographie der geschützten Bereiche wie z. B. Geländehöhen, linienhaften Strukturen wie Dämmen und Entwässerungssystemen auf die Überflutungsausbreitung im Versagensfall
- Ausgewählte / typische Lokationen und systemische Sensitivitätsuntersuchungen zum Einfluss von Poldergrößen bzw. zur Wirkung von 2. Deichlinien
- Sensitivitäten der Methodik der Überflutungsmodellierung (z.B. einfache Kaskadenmodellierung – 2D, unterschiedliche Modellverfahren)

Im Folgenden werden die Arbeiten und Ergebnisse der Universität Rostock für das Arbeitspakets 4 „Konsequenzen des Versagens – Überflutung“, die im Berichtszeitraum 01.01.2011 bis 31.12.2011 durchgeführt wurden, zusammenfassend dargestellt. Der Zwischenbericht für den Berichtszeitraum 2010 wird dabei als bekannt vorausgesetzt.

Im Berichtszeitraum (Kalenderjahr 2011) wurden von der Universität Rostock in systematischen Sensitivitätsanalysen die Wirkungen verschiedener Einflussfaktoren (Breschenbreite, Versagensdauer, Breschenlokation, Sturmflutscitelwasserstand, Sturmflutfülle & Tideeinfluss) auf die resultierende Überflutung eines geschützten Bereichs analysiert und bewertet. Grundlage für diese Analysen waren Bathymetrien, die typische potentielle Überflutungsflächen an der deutschen Nordseeküste bzw. Ostseeküste abbilden. Die verschiedenen Simulationen wurden mit dem numerischen Model Mike 21 - HD durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Überflutungssimulationen wurden gegenübergestellt und miteinander verglichen. Darüber hinaus wurde in diesem Berichtszeitraum die Auswertung der Vergleichsrechnung (vgl. Zwischenbericht 2010) vorgenommen.

## 2 Auswertung der Vergleichsrechnungen

Wie im Zwischenbericht 2010 beschrieben, werden die Ergebnisse der verschiedenen Simulationen mit den numerischen Modellen Mike 21 - HD, Sobek & Promaides über die maximale Überflutungsfläche sowie den zeitlichen Verlauf der Einstauhöhen an 5 verschiedenen Pegelpunkten miteinander verglichen. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die resultierenden maximalen Überflutungsflächen aus den verschiedenen Simulationen.

Tab. 1: Maximale überflutete Fläche für verschiedene numerische Modelle & Rastergrößen

<b>Rastergröße [mxm]</b>	<b>Anzahl der Zellen</b>	<b>Max. Über- flutete Flä- che m<sup>2</sup> MIKE Universität Rostock</b>	<b>Max. Über- flutete Flä- che m<sup>2</sup> SOBEK NLWKN Norden</b>	<b>Max. Über- flutete Flä- che m<sup>2</sup> PROMAIDES RWTH Aa- chen</b>
<b>5 x 5</b>	100651	795000	789350	792300
<b>10 x 10</b>	25326	804700	805900	801200
<b>25 x 25</b>	4131	818750	819375	815625

Wie zu erkennen ist, beträgt die Abweichung der maximal überfluteten Flächen weniger als 1%. Die verschiedenen numerischen Modelle kommen demnach zu praktisch gleichen Ergebnissen. Bezüglich der zeitlichen Verläufe der Einstauhöhen zeigen sich ebenfalls keine großen Unterschiede. Trotz kleiner Schwingungseffekte zu Beginn, werden die zeitlichen Verläufe der Einstauhöhen von allen Modellen in jeder Rastergröße ähnlich abgebildet. Abb. 1 zeigt beispielhaft die Ganglinien der Einstauhöhen für die verschiedenen angewendeten Modelle und verschiedene Rastergrößen an dem „Pegelpunkt“ 4 (vgl. Zwischenbericht 2010).

### 3 Polderflächen

Grundlage für die zu durchzuführenden Sensitivitätsuntersuchungen sind Bathymetrien (siehe Abschnitt 4), welche typische Überflutungsflächen bzw. Polderflächen an der deutschen Ostsee- bzw. Nordseeküste darstellen. Es ist daher notwendig, die Größe und die Verteilung der Geländehöhen für derartige Gebiete zu bestimmen.

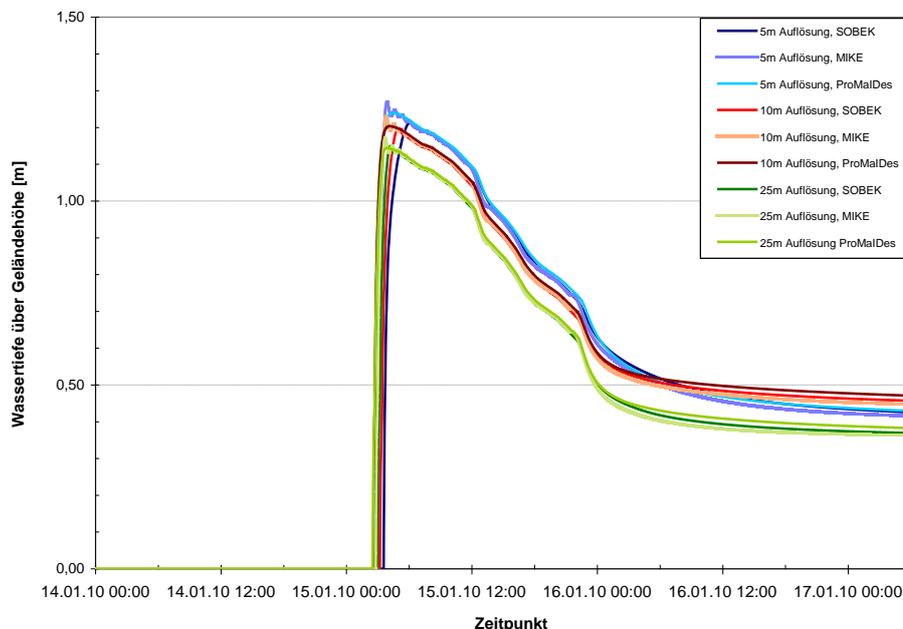


Abb. 1: Ganglinien der Einstauhöhen für die verschiedenen Modelle und Rastergrößen

Entlang der Nordseeküste von Schleswig-Holstein werden niedrig liegende Küstengebiete durch Deichringe geschützt. Durch die klare Abgrenzung dieser Bereiche ist es ohne weiteres möglich die eingeschlossene Fläche zu ermitteln. Abb. 2 zeigt die betrachteten Polder mit den von ihnen eingeschlossenen Flächen. Mehr als 50% der Polder entlang der Nordseeküste von Schleswig-Holstein schützen eine Fläche von weniger als 10 km<sup>2</sup>. Ein Histogramm zeigt die Verteilung der geschützten Polderflächen deutlicher (Abb.3). Es ist zu erkennen, dass Polder mit einer eingeschlossenen Fläche zwischen 4 km<sup>2</sup> und 8 km<sup>2</sup> am häufigsten auftreten, dicht gefolgt von Poldern mit einer Fläche bis 2 km<sup>2</sup>. Die Flächengrößen für die Bathymetrien werden auf 3 km<sup>2</sup> bzw. 5 km<sup>2</sup> festgelegt. Ein Ausschnitt eines digitalen Geländemodells des untersuchten Gebietes (Abb. 4) verdeutlicht die vorherrschenden Geländehöhen. Die Küstengebiete liegen sehr niedrig mit Geländehöhen zwischen 0 m NN und 2 m NN. Für die numerischen Simulationen wird die Geländehöhe auf 1 m NN festgelegt.

Überflutunggefährdete Küstengebiete an der Ostsee werden hauptsächlich durch linienhafte Elemente wie z. B. Dünen, Deiche, Deckwerke usw. entlang der Küste geschützt. Auf Grundlage eines digitalen Geländemodells sowie digitalisierten Hochwasserschutzbauwerken werden potentielle Überflutungsflächen ausgewiesen.

Landeinwärts gibt es keine klare Abgrenzung der Überflutungsfläche durch Hochwasserschutzbauwerke.

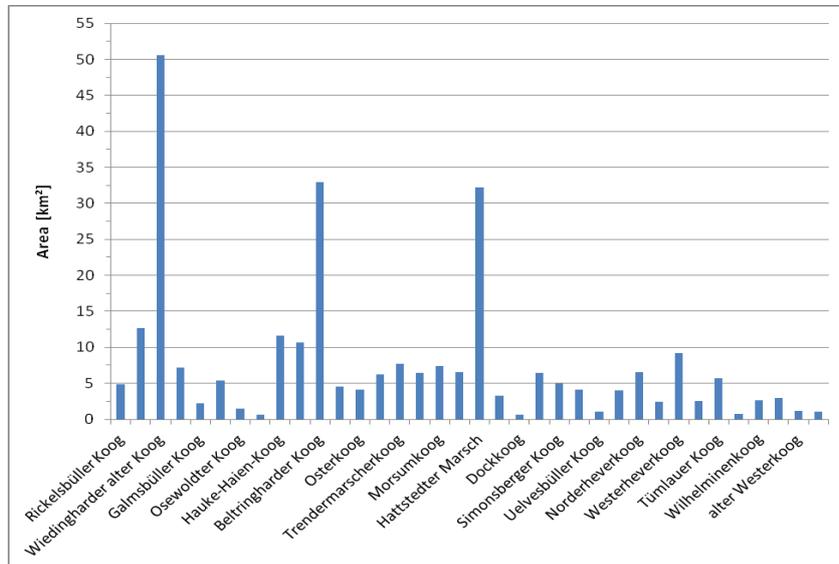


Abb. 2: Geschützte Flächen Schleswig-Holsteinischer Nordseepolder

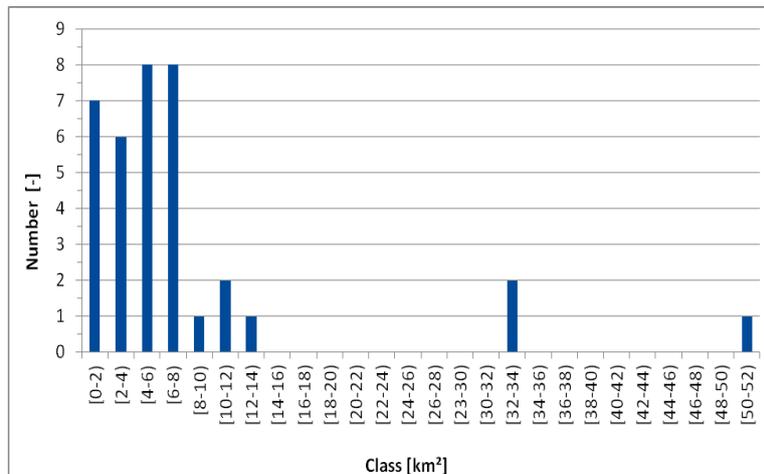


Abb. 3: Histogramm der Polderflächen

Um entsprechende Flächen abgrenzen zu können, wird die landseitige Grenze der Geländehöhe auf 3,5 m NHN gesetzt, was dem maximalen Bemessungshochwasser entspricht. Es wird dabei angenommen, dass Bereiche mit Geländehöhen oberhalb dieses Grenzwertes nicht überflutunggefährdet sind.

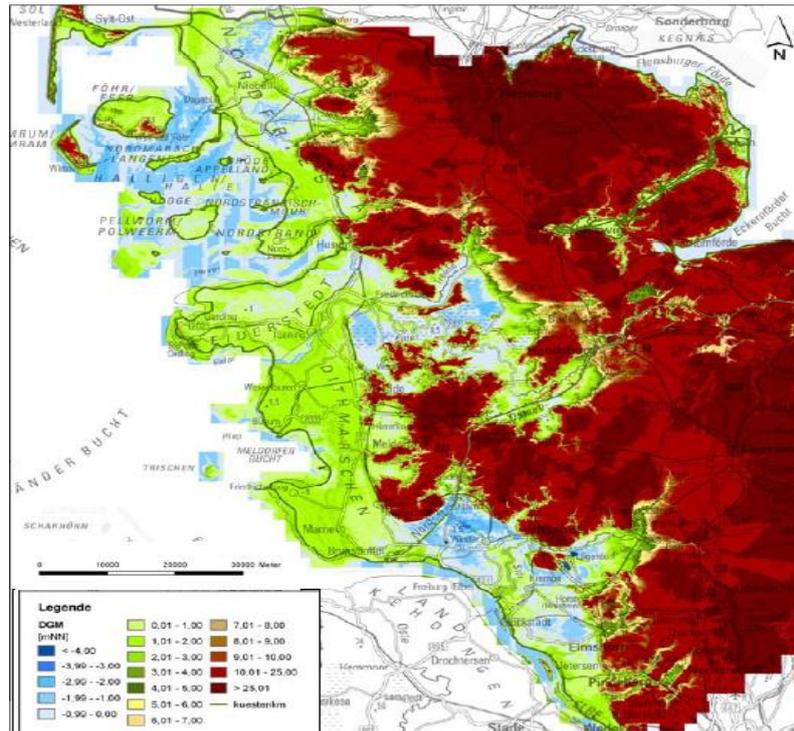


Abb. 4: Geländehöhen der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste (Quelle: NLWKN Norden)

In Abhängigkeit der Geländehöhenstufen werden die dazugehörigen Flächengrößen bestimmt. Abb. 5 zeigt die relative Häufigkeit der Höhenstufen (Schrittweite: 0,25 m) von 0 m NHN bis 3,5 m NHN. Geländehöhen von 0,25 m NHN - 0,5 m NHN treten dabei am häufigsten auf. Dicht gefolgt von der Geländehöhenstufe von 0,75 m NHN - 1,0 m NHN. Für die numerischen Simulationen wird als Geländehöhe jeweils die Klassenmitte, also 0,375 m NHN bzw. 0,875 m NHN gewählt. Die dazugehörigen Überflutungsflächen haben eine Größe von ca. 20 km<sup>2</sup> bzw. 50 km<sup>2</sup>.

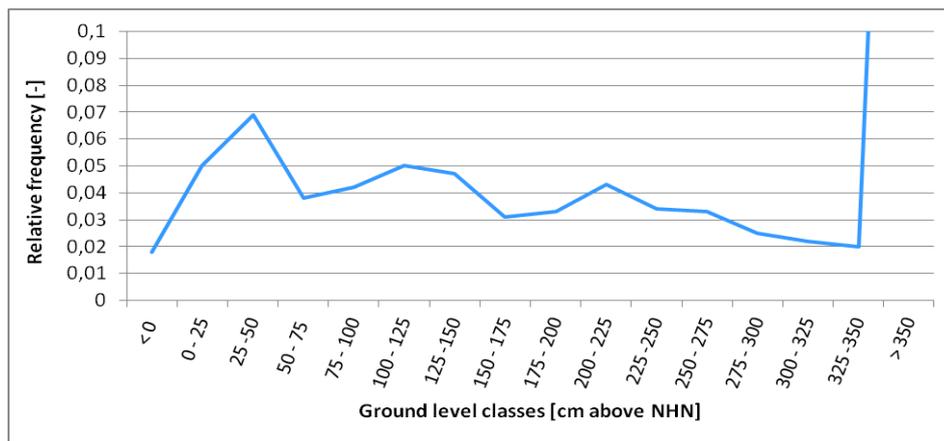


Abb.5: relative Häufigkeiten der Geländehöhenstufen

Für die numerischen Simulationen werden Bathymetrien mit den Flächen 3 km<sup>2</sup>, 5 km<sup>2</sup>, 20 km<sup>2</sup> und 50 km<sup>2</sup> und den entsprechenden Geländehöhen erstellt.

## 4 Bathymetrien

In dem vorangegangenen Abschnitt wurde die Ableitung potentieller Überflutungsflächen und den dazugehörigen Geländehöhen erläutert

Die zu erstellenden Bathymetrien weisen eine Rechteckform auf und sind an drei Seiten abgeschlossen. Die vierte Seite bildet eine Dammstruktur, welche die Funktion des Hochwasserschutzbauwerkes übernimmt. Die Dammstruktur hat eine Höhe von 4 m und eine Kronenbreite von 10 m. Die Binnenböschung der Dammstruktur hat eine Neigung von 1:10. Diese flache Neigung wurde gewählt um eine gewisse numerische Stabilität während der Simulationen zu gewährleisten. Die Rauigkeit des Simulationsgebietes wird auf einen konstanten Wert von  $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  festgelegt.

Um den Rechenaufwand zu reduzieren wird eine räumliche Auflösung von 10 x10 m gewählt. Die zeitliche Auflösung der Simulationen beträgt 1 s.

Im Laufe der Simulationen bildet sich in dieser Dammstruktur eine Bresche (Durchlass in der Dammstruktur) durch welche die Überflutung des geschützten Bereiches erfolgt. Die Sturmflutwasserstandsganglinie wird entlang dieser Bresche eingesteuert.

## 5 Breschenentwicklung

Die Bresche selbst hat einen rechteckigen Querschnitt und entwickelt sich linear mit der Zeit. Nach vollständiger Entwicklung der Bresche, ist die Breschensohle der dahinterliegenden Geländehöhe angeglichen.

Literaturrecherche bezüglich möglicher Breschenbreiten ergab eine Spannweite von wenigen Metern bis zu mehr als 200 Metern (Führböter 1987, Wood & Bateman 2005). Um diese weite Spanne abzudecken wird diese zwischen 10 m und 500 m variiert. Im Detail werden die Breschenbreiten: 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 100 m, 200 m, 300 m, 400 m & 500 m untersucht.

Die Versagensdauern weisen eine ähnlich große Variationsbreite auf. In der Literatur sind Versagensdauern zwischen 10 min und 2,5 h zu finden (Reese, 2003). In den numerischen Simulationen werden im Detail folgende Versagensdauern untersucht: 10 min, 20 min, 30 min, 45 min, 60 min, 90 min, 120 min, und 180 min.

## 6 Sturmflutwasserstandsganglinien

Sturmflutwasserstandsganglinien werden sowohl für Nordsee- als auch Ostseebedingungen aus Wasserstandsmessungen abgeleitet. Dabei ist es notwendig die Methoden der statisti-

schen Untersuchungen an die jeweiligen hydrodynamischen Bedingungen der Ostsee bzw. Nordsee anzupassen.

Für die Ableitung der Sturmflutganglinien für die Ostsee stehen stündliche Messwerte des Wasserstandes an der Lokation Warnemünde zur Verfügung. Aus der Zeitreihe der Wasserstände werden die Ereignisse ausgewählt welche den Grenzwert von 0,5 m ü NHN überschreiten. Da Sturmfluten in der Ostsee nicht nur einen charakteristischen Sturmflutscheitelwasserstand besitzen, sondern auch von variabler Fülle sein können wird neben den jeweiligen Sturmflutscheitel auch die dazugehörige Sturmflutfülle bestimmt. Dabei bezeichnet die Fülle die Fläche unter der Sturmflutganglinie und dem Grenzwert von 0,5 m NHN. In einem nächsten Schritt werden die einzelnen Sturmflutganglinien bezüglich ihres Sturmflutscheitels und ihrer Fülle normiert.

Mit Hilfe bivariater statistischer Untersuchungen werden Sturmflutganglinien abgeleitet.

In einem ersten Schritt werden den Tupel aus Wasserstand und Fülle Ränge in aufsteigender Reihenfolge zugeordnet. Um den Grad der Abhängigkeit dieser beiden Größen zu messen, wird ein Abhängigkeitsparameter, das so genannte Kendall's Tau (Gl. 1) bestimmt.

$$\tau_n = \frac{4}{n(n-1)} * (P_n - 1) \quad \text{Gl.1}$$

Mit:  $\tau_n$  = Kendall's Tau [-]  
 $P_n$  = Anzahl diskordater Datenpaare [-]  
 $n$  = Gesamtanzahl der Datenpaare [-]

Verschiedene Copula-Funktionen werden an die Wasserstände und Füllen angepasst um die Funktion zu bestimmen, welche die Werte am besten beschreibt. Ein wichtiger Schritt besteht in der Beurteilung der Anpassungsgüte der gewählten Copula-Funktionen. Dazu wird eine benutzerdefinierte Anzahl gleichverteilter Werte  $u$  &  $v \in [0,1]$  erzeugt und auf die Copula-Funktion angewendet. Ist die gewählte Copula-Funktion geeignet die Wasserstände und Füllen zu beschreiben, weisen die Ergebnisse der Copula-Funktion die gleiche Verteilung auf wie Ausgangswertepaare. Die BB1 Copula-Funktion (Gl. 2) eignet sich, unter den untersuchten Copula-Funktionen, am besten zur Beschreibung der Wasserstände und Füllen (Salecker et.al. 2011).

$$C(u,v) = [1 + [(u^{-\theta} - 1)^{\delta} + (v^{-\theta-1})^{\delta}]^{1/\delta}]^{1/\theta} \quad \text{Gl.2}$$

Mit:  $\theta, \delta$  = Anpassungsparameter der Copula-Funktion [-]  
 $u, v$  = gleichverteilte Werte  $\in [0,1]$

Die Anpassungsparameter  $\theta$  &  $\delta$  werden mit Hilfe der Maximum Likelihood Methode bestimmt.

Da die Ergebnisse noch keine Eintrittswahrscheinlichkeit besitzen und noch normiert sind, ist der nächste Schritt die Zuordnung der Eintrittswahrscheinlichkeit und die Rücktransformation der Ergebnisse auf Entsprechungen von Wasserstand und Fülle. Für die Zuordnung der Eintrittswahrscheinlichkeit werden die Ergebnisse aus der Copula-Funktion ( $\epsilon[0,1]$ ) auf die Dichtefunktion der ausgewählten Copula-Funktion angewendet und so die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmt. Indem die Ergebnisse der Copula-Funktion auf die Inverse der Randverteilungsfunktion der Wasserstände und Füllen angewendet werden erreicht man eine Rücktransformation der Ergebnisse.

Mit Hilfe dieses Verfahrens werden Sturmflutganglinien mit den Wiederkehrintervallen 50 Jahre, 100 Jahre, 150 Jahre und 200 Jahre sowie 3 verschiedene Füllen für jedes Wiederkehrintervall bestimmt. Abb. 6 zeigt beispielhaft Sturmflutganglinien verschiedener Füllen für das Wiederkehrintervall von 200 Jahren.

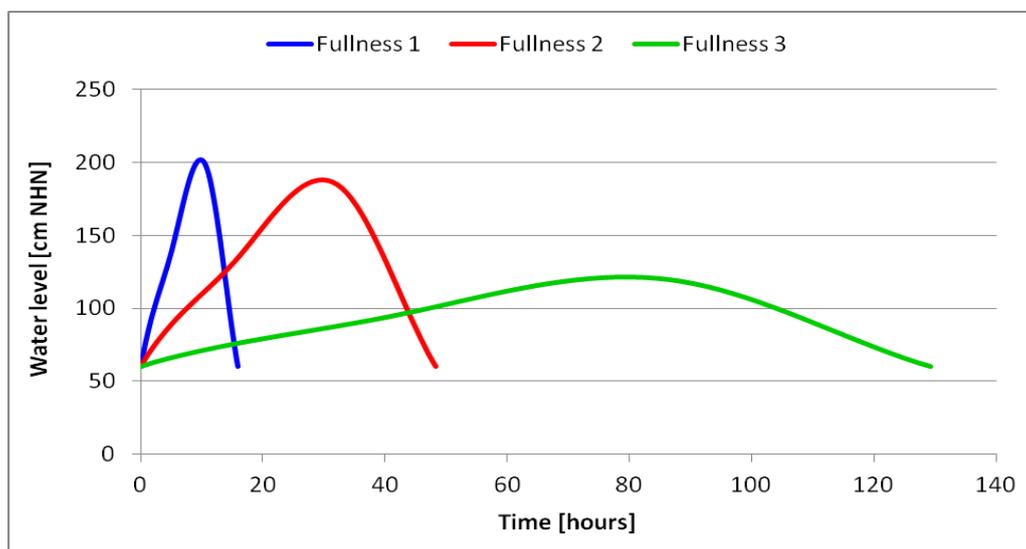


Abb. 6: Sturmflutganglinien verschiedener Füllen (Wiederkehrintervall: 200 Jahre) für die Ostsee

Bezüglich der Nordsee muss das statistische Verfahren zur Ermittlung der Sturmflutganglinien angepasst werden, da die Sturmfluten hier tidebeeinflusst sind.

Für die statistische Auswertung stehen Minutenwerte der Wasserstände am Pegel Norderney zur Verfügung. Aus dieser Wasserstandszeitreihe werden die 50 höchsten Sturmzeiten ausgewählt. Zusätzlich werden die dazugehörigen Tideniedrigwasser und die Tidehochwasser bzw. Tideniedrigwasser der Vor- und Nachtide ermittelt. Im Ganzen stehen somit 7 Parameter zur statistischen Auswertung zur Verfügung. Jedes Ereignis wird auf den jeweiligen maximalen Wasserstand normiert. Es wird angenommen, dass die Werte der 7 Parameter normalverteilt sind und dass somit Mittelwert und Standardabweichung ermittelt werden können. Unter dieser Annahme werden Anhand von Zufallszahlen die genannten Parameter ermittelt, wobei für den linken bzw. rechten Ast (bezogen auf die Sturmzeit) der skalierten Ganglinie verschiedene Zufallszahlen gewählt werden. Die so ermittelten Werte

werden abschnittsweise über Sinusfunktionen verbunden. Die Form der resultierenden Sturmflutganglinien variiert mit der Wahl der Zufallszahlen.

Für die Ermittlung von Wasserständen mit einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit werden die 50 höchsten Ereignisse mittels univariater Methoden statistisch untersucht. Dazu werden verschiedene Verteilungsfunktionen an die Daten angepasst und die Verteilungsfunktion ermittelt welche die Daten am besten beschreibt. In dem vorliegenden Fall ist dies die Log-Normalverteilung. Mit Hilfe dieser Verteilungsfunktion wird der Wasserstand auf die gewünschten Wiederkehrintervalle (siehe oben) extrapoliert und auf die neu ermittelten, noch normierten Sturmflutganglinien angewendet. Man erhält Sturmflutganglinien mit einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit aber unterschiedlicher Form (Abb. 7).

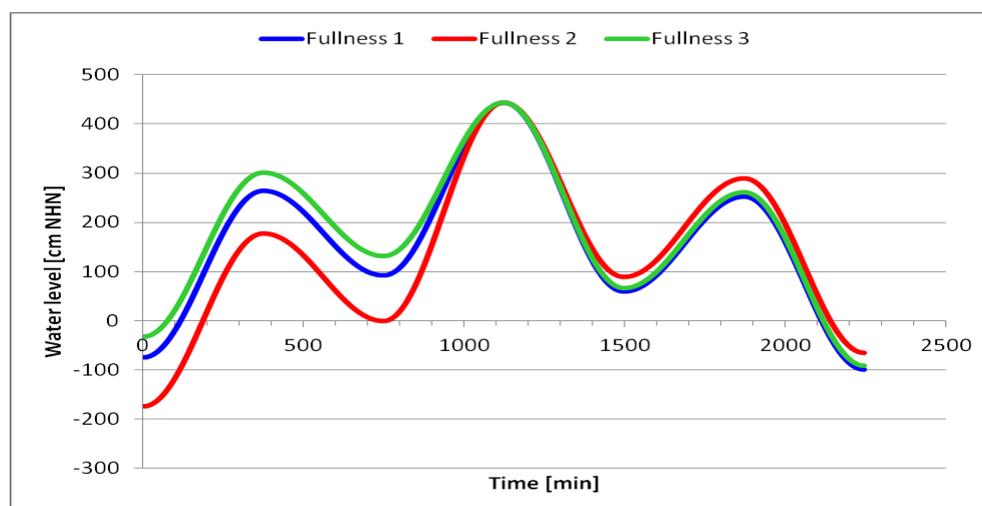


Abb. 7: Sturmflutganglinien verschiedener Form (Wiederkehrintervall: 200 Jahre) für die Nordsee

## 7 Ergebnisse

### 7.1 Breschenbreite

Um den Einfluss der Breschenbreite auf das Überflutungsgeschehen eines geschützten Bereiches zu untersuchen werden numerische Simulationen durchgeführt in welchen die Breschenbreite zwischen 10 m und 500 m variiert wird. Die Bathymetrien weisen die im Abschnitt 1 abgeleiteten Flächengrößen und Geländehöhen auf. Als hydrodynamische Randbedingung wird eine Sturmflutganglinie mit dem Wiederkehrintervall von 200 Jahren eingesteuert. Das Versagen der Dammstruktur dauert 1 Stunde und ist mit dem Eintreten des Sturmflutscheitelwasserstandes abgeschlossen. Abb. 8 zeigt die maximalen Einstauhöhen für die untersuchten Breschenbreiten.

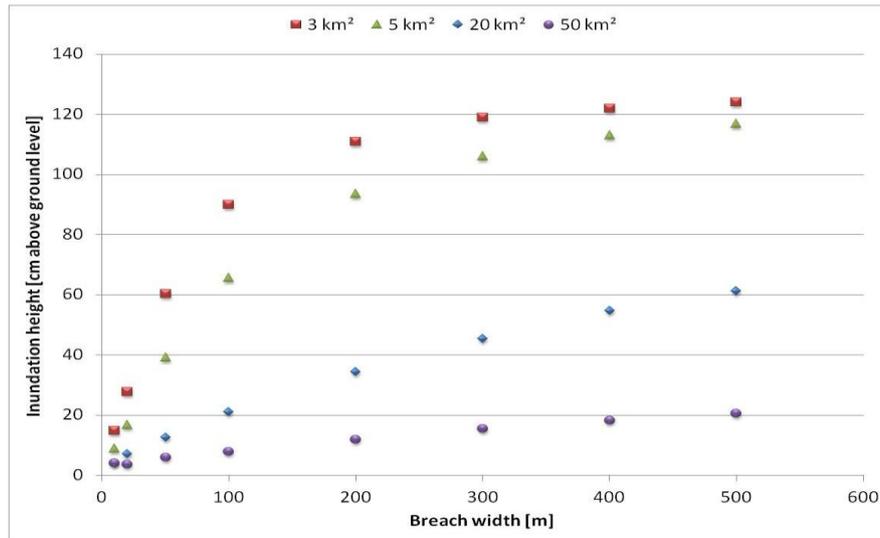


Abb. 8: Maximale Einstauhöhen als Funktion der Breschenbreite

Es ist ein deutlicher Einfluss der Breschenbreite auf die maximale Einstauhöhe zu erkennen. Eine steigende Breschenbreite hat eine steigende Einstauhöhe zur Folge. Die Ergebnisse zeigen ebenfalls, dass dieser Einfluss mit weiter steigender Breschenbreite abnimmt, d.h. der relative Anstieg der Einstauhöhe nimmt ab. Es kann vermutet werden, dass sich die maximalen Einstauhöhen einer Art Grenzwert nähern. Neben dem Einfluss der Breschenbreite ist auch der Einfluss der Gebietsgröße auf die Einstauhöhen zu erkennen. Eine Vergrößerung der Fläche des geschützten Bereiches führt zu einer Absenkung der Einstauhöhen.

Bezüglich der Verweildauer der maximalen Überflutung lässt sich aus den Simulationen ein umgekehrter Trend ableiten. Je weiter die Bresche desto früher tritt die maximale Überflutung ein und desto kürzer dauert diese.

Um den Einfluss der Breschenbreite auf die Fließgeschwindigkeiten darzustellen, muss zwischen den Fließgeschwindigkeiten in der Bresche und im geschützten Bereich unterschieden werden. Die Fließgeschwindigkeit im geschützten Bereich selbst ist von der Breschenbreite unabhängig (ca. 0,2 m/s). Dagegen werden die Fließgeschwindigkeiten innerhalb der Bresche sehr wohl von dessen Breite beeinflusst. Es kann festgehalten werden, dass mit breiter werdender Bresche die maximale Fließgeschwindigkeit abnimmt. Die Fließgeschwindigkeit nimmt von 1,5 m/s innerhalb einer 50 m Bresche auf 0,5 m/s in einer 500 m breiten Bresche ab.

## 7.2 Versagensdauer

Die Versagensdauer ist der nächste Faktor, der auf seinen Einfluss auf das Überflutungsgeschehen untersucht werden soll. Wie in dem Abschnitt 3 erwähnt wird die Versagensdauer zwischen 10 min und 3 h variiert. Dabei beschreibt die Versagensdauer die zeitliche Dauer des Versagensprozesses von dem Beginn des Versagens der Dammstruktur bis zur vollständigen Ausbildung der Bresche an. Der Versagensprozess wird in jeder Simulation so

gesteuert, dass dieser mit Eintritt des Sturmflutscheitelwasserstands abgeschlossen ist. Die eingesteuerte Sturmflutganglinie hat ein Wiederkehrintervall von 200 Jahren. Die Breschenbreite wird auf 50 m festgelegt.

Zuerst soll der Einfluss der Versagensdauer auf die Einstauhöhen herausgearbeitet werden. Abb. 9 zeigt die Einstauhöhen als Funktion der Versagensdauer. Es ist zu erkennen, dass eine Verlängerung der Versagensdauer zu einer leichten Erhöhung der Einstauhöhen führt. Allerdings ist dieser Einfluss im Vergleich zum Einfluss der Breschenbreite eher zu vernachlässigen.

Bezüglich der Verweildauer der maximalen Überflutung ist kein klarer Einfluss zu erkennen. Diese variiert zwischen 2 h und 4 h. Die Fließgeschwindigkeiten werden ebenfalls nicht von der Versagensdauer beeinflusst (ca. 1,2 m/s).

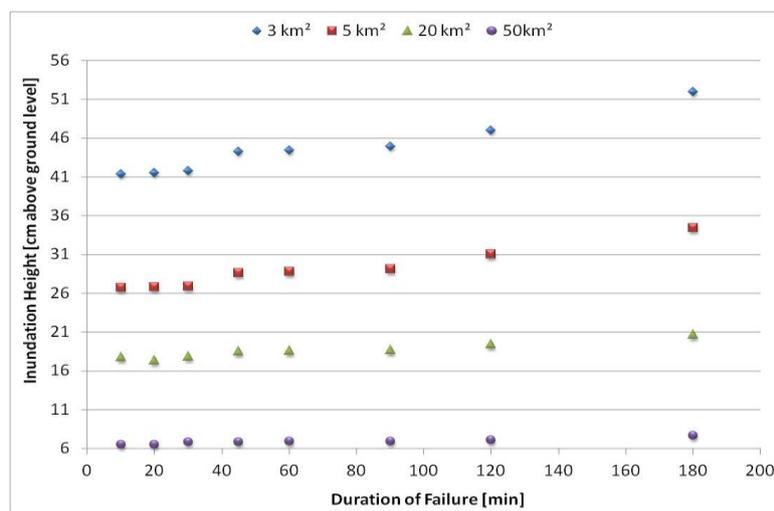


Abb. 9: Maximale Einstauhöhen als Funktion der Versagensdauer

### 7.3 Breschenlokation

Grundlage für diese Simulation ist eine Bathymtrie, welche eine Fläche von 5 km<sup>2</sup> abdeckt. Es werden 2 verschiedene Bathymtrien erstellt, um den Einfluss der Breschenlokation auf das Überflutungsgeschehen zu untersuchen. Eine Bathymtrie ist mit einer ebenen Geländeoberfläche ausgestattet, während die andere Bathymtrie eine geneigte Geländeoberfläche (Neigung 1:200) aufweist. Die Breschenlokationen werden in der Bathymtrie mit der ebenen Geländeoberfläche entlang der südlichen Grenze variiert. In der Bathymtrie mit der geneigten Ebene werden die Breschenlokationen sowohl entlang der südlichen als auch der östlichen Grenze variiert (Abb. 10 & 11). Die eingesteuerte Sturmflutganglinie hat ein Wiederkehrintervall von 200 Jahren. Die Versagensdauer wird auf 1 h festgelegt und der Versagensprozess ist mit Eintritt des Sturmflutscheitels abgeschlossen.

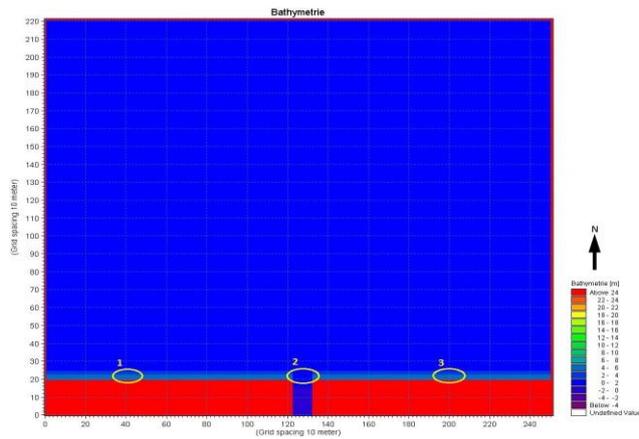


Abb. 10: Ebene Bathymetrie mit den untersuchten Breschenlokalisationen

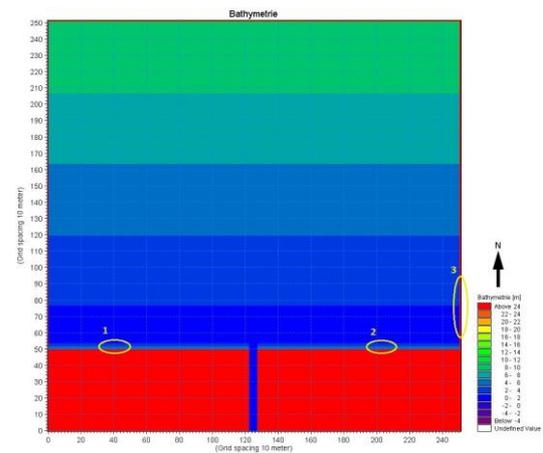


Abb. 11: Geneigte Bathymetrie mit den untersuchten Breschenlokalisationen

Eine Variation der Breschenlokation entlang der südlichen Grenze der Bathymetrie bei ebener Geländeoberfläche hat keinen Einfluss auf die erzielten Einstauhöhen. Diese variieren zwischen 18 cm und 20 cm über der Geländehöhe. Ähnlich verhält es sich bei einer Variation der Breschenlokation entlang der südlichen Grenze Bathymetrie mit einer geneigten Ebene. Der Unterschied liegt in den höheren Einstauhöhen aufgrund der begrenzten Ausbreitung der Überflutung. Wird die Breschenlokation allerdings entlang der östlichen Grenze der Bathymetrie variiert, kommt es zu einer raschen Abnahme der Einstauhöhen aufgrund der stark ansteigenden Geländehöhen. Die Fließgeschwindigkeiten innerhalb einer jeden Simulationsgruppe sind unabhängig von der Breschenlokation. Es ist allerdings festzustellen, dass die Fließgeschwindigkeiten, welche aus der zweiten Gruppe von Simulationen stammen kleiner sind als die aus der ersten Gruppe von Simulationen.

#### 7.4 Wiederkehrintervall

Für die Untersuchung des Einflusses des Wiederkehrintervall bzw. des Sturmflutscheitelwasserstands auf das Überflutungsgeschehen eines geschützten Bereiches, werden verschiedene Sturmflutganglinien mit den Wiederkehrintervallen: 50 Jahre, 100 Jahre, 150 Jahre und 200 Jahren in den numerischen Simulationen eingesteuert. Die Breschenbreite wird auf 50 m festgelegt. Der Versagensprozess wird so gesteuert, dass dieser mit Eintritt des Sturmflutscheitelwasserstands abgeschlossen ist.

Abb. 12 zeigt die maximalen Einstauhöhen als Funktion des eingesteuerten Wiederkehrintervalls. Wie erwartet, steigen die Einstauhöhen mit wachsendem Sturmflutscheitelwasserstand deutlich an.

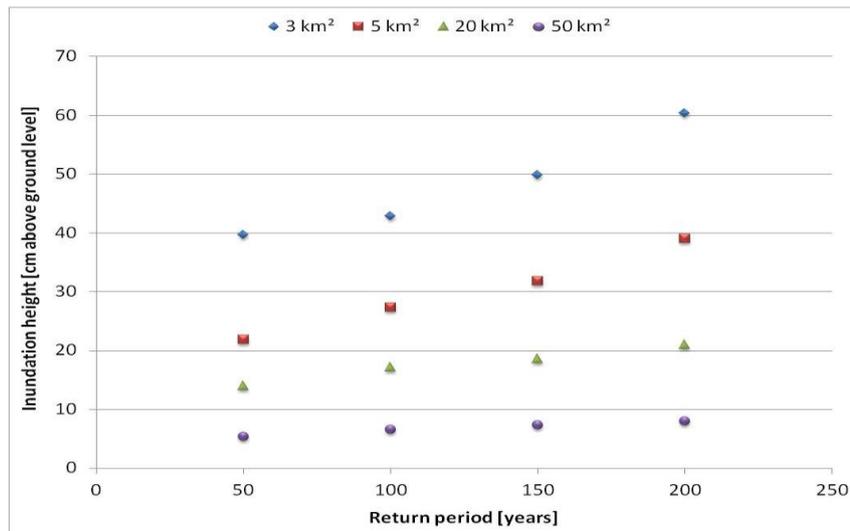


Abb. 12: Einstauhöhen als Funktion des Wiederkehrintervalls der Sturmflut

Das Wiederkehrintervall der Sturmflut bzw. der Sturmflutscheitelwasserstand hat keinen signifikanten Einfluss auf die Verweildauer der maximalen Überflutung. Allerdings wird die Eintrittszeit der maximalen Überflutung von dem Wiederkehrintervall der Sturmflut beeinflusst. Mit kleiner werdendem Wiederkehrintervall tritt die maximale Überflutung zeitlich eher ein.

Bezüglich der resultierenden Fließgeschwindigkeiten muss wieder zwischen den Fließgeschwindigkeiten in der Bresche und im geschützten Bereich unterschieden werden. Die Fließgeschwindigkeiten im geschützten Bereich bleiben von dem Sturmflutscheitelwasserstand unbeeinflusst. Die Fließgeschwindigkeiten in der Bresche allerdings, steigen von 1,5 m/s für eine Sturmflut mit einem Wiederkehrintervall von 50 Jahren auf 2 m/s für eine 200 jährliche Sturmflut an.

## 7.5 Sturmflutfülle

Wie im Abschnitt 4 beschrieben, werden für die Untersuchung des Einflusses der Sturmflutfülle auf das Überflutungsgeschehen Sturmflutganglinien mit drei verschiedenen Formen je Wiederkehrintervall abgeleitet und in den numerischen Simulationen eingesteuert. Die erste Sturmflutganglinienform ist von vergleichsweise kurzer Dauer mit einem hohen Scheitelwasserstand. Die zweite Sturmflutganglinie weist eine längere Dauer auf und besitzt einen niedrigeren Scheitelwasserstand. Eine weitere Ganglinie besitzt einen noch niedrigeren Scheitelwasserstand und eine im Vergleich zur zweiten Ganglinienform noch längere Dauer (vgl. Abb. 6).

Grundlagen für diese Serie von Simulationen ist die Bathymetrie mit einer Grundfläche von 5 km<sup>2</sup>. Die Breschenbreite wird auf 50 m festgelegt und der Versagensprozess ist mit Eintritt der jeweiligen Sturmflutscheitelwasserstände abgeschlossen.

Die Ergebnisse (Abb. 13) zeigen, dass Sturmflutganglinien mit einer mittleren Dauer und einem etwas niedrigeren Scheitelwasserstand die höchsten maximalen Einstauhöhen verursachen. Sturmflutganglinien der anderen Formen verursachen vergleichsweise niedrigere Einstauhöhen.

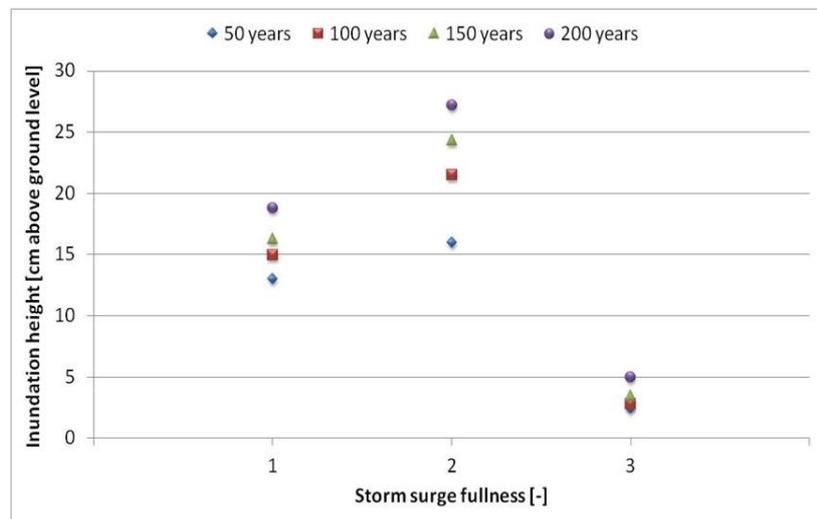


Abb. 13: Maximale Einstauhöhen in Abhängigkeit der Sturmflutganglinienform

Bedenkt man diese Ergebnisse, kann geschlossen werden, dass Sturmfluten mit einer mittleren Dauer und etwas niedrigeren Scheitelwasserständen für spätere Untersuchungen bezüglich des Schadens und des Risikos von größerer Bedeutung sind.

Erwartungsgemäß ist die Verweildauer der maximalen Überflutung bei Sturmflutganglinien mit langer Dauer am größten und bei Sturmflutganglinien mit einer kürzeren Dauer entsprechend kleiner. Genauso erwartungsgemäß ist das Verhalten der Fließgeschwindigkeiten. Für die erste Ganglinienform können Fließgeschwindigkeiten  $> 1$  m/s auftreten. Fließgeschwindigkeiten von ca. 1 m/s treten bei Sturmflutganglinien der zweiten Form auf. Die niedrigsten Fließgeschwindigkeiten ergeben sich bei Sturmflutganglinien der dritten Form.

## 7.6 Tidebeeinflusste Sturmflutganglinien

Grundlage für diese Simulationen ist eine Bathymetrie, die die Fläche von 5 km<sup>2</sup> abdeckt. Die Breschenbreite wird auf 50 m festgelegt. Der Versagensprozess wird so gesteuert, dass die Bresche mit Eintritt des Scheitelwasserstandes der Sturmflut abgeschlossen ist.

Trotz der Tatsache, dass die höchsten Sturmflutwasserstände mit der Hauptsturmflut einhergehen (Abb. 14), werden die höchsten Einstauhöhen (Abb. 15) durch die nachfolgende Tide verursacht.

Allerdings muss für die resultierenden Einstauhöhen auch der Tidefall in Kombination mit den maximalen Wasserständen der nachfolgenden Tide berücksichtigt werden.

Vergleicht man die Einstauhöhen, die durch die 150-jährliche und die 200-jährliche Sturmflut verursacht werden, ist dieser Umstand am deutlichsten zu erkennen. Der Tidefall der Hauptsturmflut der 150-jährlichen Sturmflut ist relativ schwach und geht mit einem recht hohen Tidehochwasser der nachfolgenden Tide einher. Dies führt zu hohen Einstauhöhen. Im Gegensatz dazu ist der Tidefall der Hauptsturmflut der 200-jährlichen Sturmflut relativ stark und das Tidehochwasser der nachfolgenden Tide aber eher niedrig. Das Resultat sind vergleichsweise niedrige Einstauhöhen.

In jeder Simulation treten die maximalen Fließgeschwindigkeiten von ca. 4 m/s mit Eintreten der Hauptsturmflut auf. Die maximale Fließgeschwindigkeit der nachfolgenden Tide liegt bei ca. 2 m/s.

Für jede Simulation wird die Verweildauer der maximalen Überflutung, die mit der Hauptsturmflut einhergeht, bestimmt. Es ist hier kein signifikanter Tideeinfluss zu erkennen. Die Verweildauer liegt bei ca. 2 h. Für die Nachtiden liegt die Verweildauer bei ungefähr 1 h.

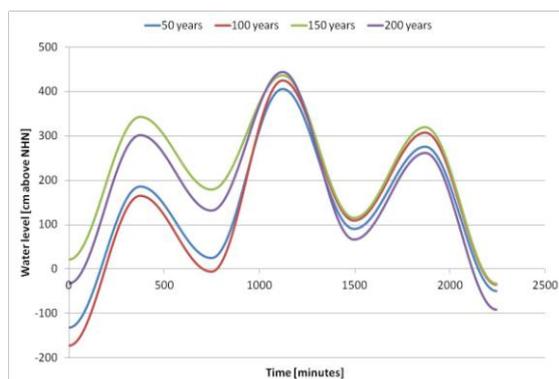


Abb. 14: Untersuchte Sturmflutganglinien für verschiedene Wiederkehrintervalle

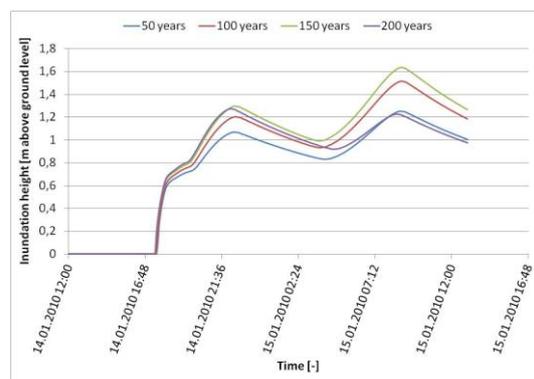


Abb.15: Zeitreihe der Einstauhöhen

## 8 Zusammenfassung

Im Berichtszeitraum 2011 wurden im Arbeitspaket 4 die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- Auswertung der Sensitivitätsuntersuchungen für die Bewertung verschiedener Modellansätze und Modellgenauigkeiten am Projektgebiet Markgrafenheide
- Vorbereitung und Durchführung systematischer Sensitivitätsuntersuchungen zur Untersuchung des Einflusses verschiedener hydrodynamischer und versagensspezifischer Faktoren
  - Ableitung typischer potentieller Überflutungsflächen nach Flächengröße und Geländehöhe für die Nordseeküste und Ostseeküste

- Aufbau einfacher Bathymetrien als Grundlage für die Durchführung von numerischen Simulationen
- Ableitung von Sturmflutganglinien für Nordsee- und Ostseebedingungen für die Anwendung als hydrodynamischer Randbedingungen in den numerischen Simulationen
- Untersuchung des Einflusses der versagensspezifischen Faktoren: Breschenbreite, Breschenlokation & Versagensdauer
- Untersuchung des Einflusses der hydrodynamischen Faktoren: Wiederkehrintervall der Sturmflut, Sturmflutfülle & Tideeinfluss
- Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich der maximalen Einstauhöhe, erzielten Fließgeschwindigkeiten & Verweildauer der maximalen Überflutung

## 9 Schrifttum

- Führböter, A (1987): Über den Sicherheitszuwachs im Küstenschutz durch eine zweite Deichlinie, In: Die Küste, Jahrgang 1987, Heft 45, s. 181 - 208, Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co, Holstein i. Heide
- Gruhn et.al.(2012): Numerical sensitivity analyses on the influence of hydrodynamic- and failure-conditions on flooding of coastal areas, PIANC Copedec VIII, Proceedings of the Eight International Conference on Coastal and Port Engineering in developing countries, IIT Madras, Chennai, Indien, 2012, ISBN: 978-93-80689-06-7
- Reese, S. (2003): Die Vulnerabilität des schleswig-holsteinischen Küstenraumes durch Sturmfluten - Fallstudien von der Nord- und Ostseeküste, Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Forschungs- und Technologiezentrum Westküste Berichte Nr. 30. Büsum
- Salecker et.al. (2011): Parameterization of storm surges as a basis for assessment of risk of failure for coastal protection measures, 5<sup>th</sup> SCACR 2011 International Short Conference on Applied Coastal Research, Proceedings, RWTH Aachen University, 2011, [http://www.iww.rwth-aachen.de/fileadmin/internet/scacr/SCACR\\_2011\\_Proceedings.pdf](http://www.iww.rwth-aachen.de/fileadmin/internet/scacr/SCACR_2011_Proceedings.pdf)
- Wood, R.M.; Bateman, W. (2005): “Uncertainties and constraints on breaching and their implication for flood loss estimation”, Philosophical Transactions of the Royal Society, doi: 10.1098/rsta.2005.1576