

Versagensmechanismen und Versagenswahrscheinlichkeiten von Hochwasserschutzdünen

Angelika Grubn, Dörte Salecker und Peter Fröhle

Zusammenfassung

Niedrig gelegene und dicht besiedelte Küstengebiete werden durch Hochwasserschutzbauwerke gegen Sturmflutereignisse und deren mögliche negative Konsequenzen geschützt. Je nach Intensität des Sturmflutereignisses werden die Hochwasserschutzbauwerke unterschiedlich stark belastet. Lang anhaltend hohe Belastungen auf das Bauwerk führen u. U. zu einem Versagen des Bauwerks. Dabei sind die Prozesse und Mechanismen, die zu einem Versagen führen, von dem jeweiligen Bauwerkstyp (z. B. Hochwasserschutzdüne, Deich, Hochwasserschutzmauer etc.) abhängig. Mit Hilfe von mathematischen Modellen, welche die entsprechenden Versagensmechanismen beschreiben, kann auf die Wahrscheinlichkeit des Versagens geschlossen werden. Neben den Konsequenzen des Versagens eines Hochwasserschutzbauwerkes und der Eintrittswahrscheinlichkeit der Sturmflut ist die Versagenswahrscheinlichkeit des Hochwasserschutzbauwerkes eine Größe, die zur Abschätzung des Hochwasserrisikos in Küstengebieten herangezogen wird. Für die risikobasierte Analyse der Dünenerosion wurden aus der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Modelle zur Beschreibung der Dünenerosion zwei ausgewählt, die die Grundlage der Berechnungen der Versagenswahrscheinlichkeit und der Ableitung der Versagenseinwirkungsfunktionen bildeten. Es wurde einerseits das semi-empirische Dünenerosionsmodell von Van Gent et al. (2008) gewählt und andererseits das komplexere, prozessbasierte numerische Modell XBeach. Auf Grundlage dieser beiden Modelle wurden daraufhin die notwendigen Eingangsdaten abgeleitet. Einerseits wurde ein Initialprofil einer Hochwasserschutzdüne, wie es laut dem Regelwerk Küstenschutz des Landes Mecklenburg-Vorpommern anzuwenden ist, abgeleitet. Die hydrodynamischen Eingangsdaten wurden auf Grundlage bivariater statistischer Methoden erarbeitet. Da die probabilistischen Berechnungen mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen erfolgten, wurden alle erforderlichen Eingangsdaten mit gemeinsamen Eintrittswahrscheinlichkeiten versehen. Im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse wurden, basierend auf den gewählten Dünenerosionsmodellen und den abgeleiteten Eingangsdaten, die Versagenswahrscheinlichkeiten des Bauwerktyps Hochwasserschutzdüne für Sturmereignisse mit unterschiedlichen Wiederkehrintervallen berechnet. Aus diesen Zuverlässigkeitsanalysen wurden sowohl die Versagensfunktionen in Abhängigkeit eines Bauwerksparameters als auch die Versagenseinwirkungsfunktionen in Abhängigkeit einer hydrodynamischen Belastungsgröße abgeleitet. Die beiden Modelle zeigen aufgrund der unterschiedlichen Abbildung der physikalischen Prozesse unterschiedliche Ergebnisse. Das Dünenerosionsmodell von Van Gent et al. (2008) ist ein empirisches Modell, in das die Wellenhöhen, Wellenperiode und Fallgeschwindigkeit des Sedimentes explizit in die Berechnung des Erosionsprofils eingehen. Der Sturmflutwasserstand geht nur über die Lage des Dünenfußes im Erosionsfall in das Modell ein. Die Dauer des Sturmereignisses bleibt hingegen unberücksichtigt. Die physikalischen Prozesse werden in dem numerischen Modell XBeach detaillierter aufgelöst. Neben den genannten Parametern gehen hier auch der Wasserstand und die

Dauer des Sturmereignisses direkt in die Berechnung ein. Der Wasserstand wird in Form einer Zeitreihe berücksichtigt, über die auch die Dauer des Sturmereignisses gesteuert werden kann.

Schlagwörter

Dünenerosion, Dünenerosionsmodell, Versagenswahrscheinlichkeiten, Versagenseinwirkungsfunktionen

Summary

For the risk-based analysis of the dune erosion two different dune erosion models were chosen from the large variety of available dune erosion models. The chosen dune erosion models are used as a basis for the calculation of the failure probability and the derivation of the fragility curves. On the one hand, the semi-empirical dune erosion model of Van Gent et al. (2008) was chosen and, on the other hand, the more complex process-based numerical model XBeach. On the basis of both dune erosion models the required input data have been derived. An initial profile of the flood protection dune was derived on the basis of the Regelwerk Küstenschutz des Landes Mecklenburg-Vorpommern. The hydrodynamic input data have been derived using bivariate statistic models. Since the calculations should be probabilistic, joint probabilities of occurrence are assigned to the required input data. On the basis of the chosen dune erosion models and the derived input data, failure probabilities for the flood protection dune for different storm events with different return periods have been calculated using the concept of reliability analysis. Failure functions depending on the structure parameters and fragility curves as a function of the hydrodynamic loads have been created using the concept. Using both dune erosion models, fragility curves were derived for storm surge events of different return periods. The both dune erosion models lead to different results. One reason can be seen in the different description of the physical processes in both models. The dune erosion model of Van Gent et al. (2008) is an empirical model considering the wave height, wave period and the sinking velocity of the sediment. The storm surge water level is considered indirectly and the storm duration is neglected. The physical processes relevant for the dune erosion are described in greater detail in the numerical model XBeach. In addition to the above-mentioned parameters, here, the storm surge water level and the duration of the storm event are taken into account.

Keywords

Dune erosion, dune erosion models, failure probability, fragility curves

Inhalt

1	Einleitung.....	119
2	Hochwasserschutzdünen als Bauwerke	120
3	Versagensmechanismen des Bauwerktyps Hochwasserschutzdüne	120
4	Dünenerosionsmodelle.....	121
4.1	Erosion durch Wellenangriff.....	121
4.1.1	Empirische Modelle.....	121

4.1.2	Semi-empirische Modelle	121
4.1.3	Prozessbasierte Modelle	122
4.2	Erosion durch Überströmen	123
4.2.1	Semi-empirische Modelle	123
4.2.2	Prozessbasierte Modelle	124
4.3	Modellauswahl für die weiterführenden Untersuchungen	124
5	Semi-empirischer Dünenerosionsansatz – Van Gent et al. (2008)	124
6	Prozessbasiertes Dünenerosionsmodell – XBeach	126
7	Eingangsdaten für die risikobasierte Analyse der Dünenerosion	129
7.1	Düenausgangsprofil	129
7.2	Hydrodynamische Eingangsdaten	130
8	Versagenswahrscheinlichkeit und Versagensfunktion	133
9	Versagenseinwirkungsfunktionen	135
10	Zusammenfassung und Ausblick	138
11	Danksagung	139
12	Schriftenverzeichnis	139

1 Einleitung

Für einen risikobasierten Hochwasserschutz ist es von Bedeutung, Kenntnis über das spezifische Versagensverhalten von Hochwasserschutzbauwerken – im Sinne von Versagensmechanismen – zu erlangen und die Versagenswahrscheinlichkeit zu bewerten. Eine qualitative und quantitative Bewertung von Versagenswahrscheinlichkeiten erfolgt im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse, basierend auf einer modellhaften Beschreibung der Versagensmechanismen. Für weiterführende Untersuchungen sind Versagenseinwirkungsfunktionen (Fragility Curves) abzuleiten, die die Zuverlässigkeit eines Bauwerkes beschreiben.

An der deutschen Ostseeküste stellen Hochwasserschutzdünen ein wesentliches Element des Küsten- und Hochwasserschutzes dar. Entlang der 237 km langen Außen-Flachküste des Landes Mecklenburg-Vorpommern wird das Hinterland auf einer Strecke von 106 km durch Hochwasserschutzdünen gegen auftretende Sturmfluten und die damit verbundenen Überflutungen geschützt. Auch an der Nordsee werden insbesondere auf den ostfriesischen und nordfriesischen Inseln Dünen als Elemente des Hochwasserschutzes eingesetzt.

Im Folgenden werden die Untersuchungen zu Versagensmechanismen und der Bewertung von Versagenswahrscheinlichkeiten von Hochwasserschutzdünen vorgestellt und die Ergebnisse diskutiert, die im Rahmen des Projektes HoRisk (03KIS079) durchgeführt wurden.

2 Hochwasserschutzdünen als Bauwerke

Hochwasserschutzdünen sind ein wesentliches Element des Küsten- und Hochwasserschutzes entlang der deutschen Ostsee- und Nordseeküste. Hierbei kann eine Unterscheidung der Hochwasserschutzdünen hinsichtlich ihrer Funktion in Systemschutzdünen und Vollschutzdünen erfolgen. Eine Systemschutzdüne übt ihre Schutzfunktion in Verbindung mit zusätzlichen Hochwasserschutzbauwerken aus. Eine Vollschutzdüne hingegen übernimmt als singuläres Bauwerk die Hochwasserschutzfunktion eines Küstenabschnittes (StALU MM 2009).

Vollschutzdünen bestehen im Wesentlichen aus einem Verschleißteil, einem Reserveteil und einem Sicherheitsteil (Abb. 1). Der Verschleißteil im seeseitigen Teil der Düne wird im Laufe der Zeit durch natürliche Erosionsprozesse und kleinere Sturmfluten umgelagert. Hierdurch wird Sediment in das Küstensystem eingetragen und die Versorgung der Strände sowie der angrenzenden Schorrbereiche gesichert. Der Reserveteil ist so bemessen, dass er die Sedimentmenge besitzt, welche durch ein Bemessungsereignis umgelagert wird. Landseitig an den Reserveteil schließt sich der Sicherheitsteil, welcher in Mecklenburg-Vorpommern pauschal mit einer Restkronenbreite von 5 m ausgebildet wird. Ist neben dem Verschleißteil auch der Reserveteil abgetragen, verhindert der Sicherheitsteil der Düne ein Überströmen der Restdüne und eine Überflutung des Hinterlandes (StALU MM 2009).

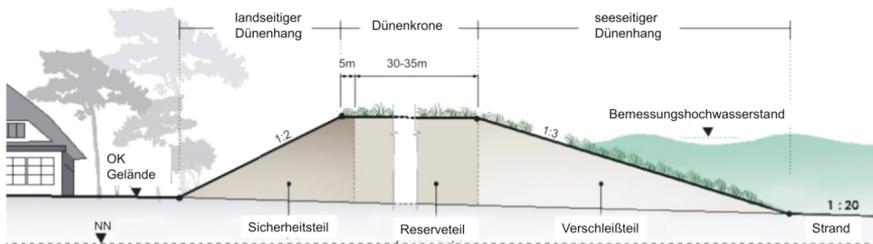


Abbildung 1: Regelprofil einer Vollschutzdüne (StALU MM 2009).

3 Versagensmechanismen des Bauwerktyps Hochwasserschutzdüne

Allsop et al. (2007) haben im Rahmen des FloodSite-Projekts für verschiedene Sturmflutschutzbauwerke Versagensmechanismen und dazugehörige Berechnungsansätze zusammengestellt. Für den Bauwerkstyp Düne wurden die Versagensmechanismen

- Erosion der seeseitigen Böschung durch Wellen,
- Erosion der landseitigen Böschung durch Überströmen (Overflow) sowie
- Erosion der landseitigen Böschung durch Wellenüberschlag (Overtopping)

als signifikant erkannt.

Das Schrifttum zum Thema Dünenversagen (siehe Schrifttum – Versagensmechanismen und Dünenerosionsmodelle) behandelt schwerpunktmäßig den Versagensmechanismus Erosion der seeseitigen Böschung durch Wellen. Daneben sind verschiedene Veröffentlichungen zum Versagensmechanismus Überströmen (Overflow) erschienen (Visser 1998; Visser 2000; Tuan 2007; Tuan 2008). Der Versagensmechanismus Wellenüberschlag wird im Schrifttum wenig behandelt.

4 Dünenerosionsmodelle

4.1 Erosion durch Wellenangriff

4.1.1 Empirische Modelle

Erste systematische Untersuchungen zur Dünenerosionsproblematik und die Ableitung eines einfachen Verfahrens zur Abschätzung der Dünenerosion wurden von Edelman durchgeführt (Edelman 1968, 1972).

Vellinga (1986) erarbeitete aufgrund klein- bzw. großmaßstäblicher hydraulischer Untersuchungen ein Modell zur Beschreibung der Dünenerosion, welches auf dem Gleichgewichtsansatz basiert. Hierbei wird angenommen, dass die Menge an erodiertem Dünenmaterial vollständig auf den vorgelagerten (Unterwasser-)Strand umgelagert wird. Die Form des Unterwasserprofils ist abhängig von der Wellenhöhe und der Fallgeschwindigkeit des Sediments. Für die morphologische Entwicklung der landseitigen Düne wird angenommen, dass sich nach Erosion eine Neigung der Dünenfront von 1:1 einstellt. Das Erosionsprofil ergibt sich somit aus der Kombination der erodierten Düne und des Unterwasserprofils.

Die Dauer der Belastung, d. h. die Verweildauer des Sturms bzw. des Hochwassers, werden in der Bestimmung des Erosionsprofils nicht berücksichtigt. Der Vellinga-Modellansatz vernachlässigt zudem weitere wichtige Parameter wie die Wellenperiode, die erfahrungsgemäß einen starken Einfluss auf die Erosion hat, oder auch die Wellenanlauf- richtung und den Einfluss von Bewuchs auf der Düne.

4.1.2 Semi-empirische Modelle

Türker und Kabdasli (2006) entwickelten einen Ansatz, der auf dem Gleichgewichtsprofil nach Bruun (1954) (vgl. Kriebel und Dean 1985) basiert, und versuchten, den Einfluss des Wellenklimas und der Sedimentcharakteristik auf den Formparameter einzubeziehen. Für die Ableitung des Ansatzes wird angenommen, dass das Querprofil in ein Gleichgewichtsprofil übergeht, sobald die Energiedissipation in der Brandungszone eine Gleichgewichts-Energiedissipation erreicht.

Der Ansatz von Türker und Kabdasli (2006) ist dem Berechnungsansatz, der dem Modell SBEACH (Larson 1989) zugrunde liegt, ähnlich. SBEACH ist ein numerisches Modell, welches makroskalige morphologische Veränderungen der Schorre (Formung und Entwicklung von Barren und Bermen) sowie des Strandes ermittelt. Es wird angenommen, dass sich alle Veränderungen der Unterwassersohle aufgrund des Brechens einlaufender Wellen vollziehen. Die Sedimenttransportrate in Küstenquerrichtung wird aus den lokalen Welleneigenschaften, der Energiedissipation, den Wasserständen sowie dem lokalen Strandprofil berechnet. Mit der Gleichung der Massenerhaltung für das Sediment wird die Sohlveränderung als Funktion der Zeit bestimmt. Diese Gleichung wird über die Methode der finiten Differenzen gelöst. Für eine detaillierte Beschreibung des numerischen Modells sei auf die Fachliteratur (Larson 1989) verwiesen.

Hanson et al. (2010) entwickelten einen Berechnungsansatz, welcher für die Ermittlung von morphologischen Veränderungen der Düne und des Strandes sowohl Quer- als auch Längstransportprozesse – ausgedrückt durch einen Gradienten des Sedimenttransportes in Küstenlängsrichtung – berücksichtigen. Zudem wird das Wachstum der Dünen

durch Windflug und die Erosion der Dünen durch Stürme abgebildet. Die Wachstumsrate (q_w) der Düne durch Windtransport berechnet sich gemäß (1)

$$\frac{dV_{DW}}{dt} = q_w \quad (1)$$

mit: V_{DW} Dünenvolumen
t Zeit

Es wird angenommen, dass die Gesamtmenge des transportierten Materials auf der Düne abgelagert wird.

Auf Grundlage numerischer Modellierungen (Crosmor 2007) und Untersuchungen in hydraulischen Modellen analysierte Van Rijn (2009) den Einfluss verschiedener Parameter auf die Dünenerosion. Im Ergebnis dieser Sensitivitätsuntersuchungen wurde eine vereinfachte Berechnungsgleichung für die Dünenerosion abgeleitet (2):

$$A_{d,t=5} = A_{d,ref} \left(\frac{d_{50,ref}}{d_{50}} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{S}{S_{ref}} \right)^{\alpha_2} \left(\frac{H_{S,0}}{H_{S,0,ref}} \right)^{\alpha_3} \left(\frac{T_p}{T_{p,ref}} \right)^{\alpha_4} \left(\frac{\tan\beta}{\tan\beta_{ref}} \right)^{\alpha_5} \left(1 + \frac{\theta_0}{100} \right)^{\alpha_6} \quad (2)$$

mit: $A_{d,t=5}$ Erosionsfläche oberhalb des Sturmflutwasserstands nach 5 h [m³/m]
 $A_{d,ref}$ Erosionsfläche oberhalb des Sturmflutwasserstands nach 5 h für den Referenzfall [m³/m]
 S Sturmflutwasserstand über Mittelwasser [m]
 S_{ref} Sturmflutwasserstand über Mittelwasser für den Referenzfall [m]
 H_{S0} signifikante Tiefwasserwellenhöhe [m]
 $H_{S0,ref}$ signifikante Tiefwasserwellenhöhe für den Referenzfall [m]
 T_p Peak-Periode [s]
 $T_{p,ref}$ Peak-Periode für den Referenzfall [s]
 d_{50} mittlerer Korndurchmesser [m]
 $d_{50,ref}$ mittlerer Korndurchmesser für den Referenzfall = 0,000225m [m]
 $\tan\beta$ Gradient zwischen -3m Linie und Dünenfuß (+3m) [°]
 $\tan\beta_{ref}$ Gradient zwischen -3m Linie und Dünenfuß (+3m) für den Referenzfall (1:45)[°]
 θ_0 Wellenanlaufwinkel zur Küstennormalen (im Tiefwasser) [°]
 α_1 Exponent = 1,3
 α_2 Exponent = 1,3 für $S < S_{ref}$ und $\alpha_2 = 2,5$ für $S > S_{ref}$
 α_3 Exponent = $\alpha_4 = \alpha_6 = 0,5$
 α_5 Exponent = 0,3

4.1.3 Prozessbasierte Modelle

Eine andere Art der Dünenerosionsmodelle sind prozessbasierte Modelle, in denen alle für den Vorgang der Dünenerosion relevanten Prozesse individuell und explizit betrachtet werden.

Steezel (1993) entwickelte ein derartiges prozessbasiertes Dünenerosionsmodell. Es berücksichtigt Prozesse wie Shoaling, Refraktion und Wellenbrechen sowie die Strömung in Küstenquerrichtung. Die Ergebnisse des Wellenmodells werden zur Berechnung der

lokalen Sedimenttransportrate in Küstenquerrichtung herangezogen. Da bei dem Sedimenttransport die seewärts gerichtete Sekundärströmung (Undertow) eine wesentliche Rolle spielt, wird diese in dem Integral der lokalen Sedimenttransportrate mitberücksichtigt.

$$S = \int_{z=0}^{d_t} \bar{u}(z) \bar{C}(z) dz + \int_{z=d_t}^{\eta_{\max}} \bar{u}(z) \bar{C}(z) dz = S_l + S_u \quad (3)$$

Hierbei beschreibt der erste Term den seewärts gerichteten Sedimenttransport. Der zweite Term dagegen beschreibt den landwärts gerichteten Sedimenttransport. Für eine detaillierte Beschreibung des Dünenerosionsmodells sei auf die Fachliteratur verwiesen.

4.2 Erosion durch Überströmen

Im Folgenden werden beispielhaft zwei Ansätze thematisiert, die das Bruchverhalten und die Breschenbildung eines Sanddeiches in Folge von Überströmen beschreiben. Die Prozesse, die zum Bruch eines Sanddeichs als Folge von Überströmung führen, werden als ebenfalls signifikant für die Erosion von Düne durch Überspülen angesehen und im Folgenden verwendet. Die Ansätze wurden von Visser (1998, 2000) und Tuan (2007, 2008) entwickelt.

4.2.1 Semi-empirische Modelle

Visser (1998) unterteilt das Bruchverhalten von Sanddeichen in fünf Phasen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Bruch durch eine kleine Rinne initialisiert wird.

Die fünf Phasen des Deichbruchs eines Sanddeiches werden im Folgenden kurz erklärt:

- Phase 1: Zunahme der Böschungsneigung der Rinne von einem Anfangswert β_0 bei $t = 0$ hin zu einem kritischen Winkel β_1 bei $t = t_1$.
- Phase 2: Rückschreitende Erosion der Binnenböschung ($t_1 < t < t_2$), die gleichzeitig die Breite der Deichkrone reduziert. Phase 2 endet, sobald das Überströmen des Deiches beginnt (Breschenneigung β_1 bleibt konstant).
- Phase 3: Absinken der Krone in der Bresche, wobei die Neigung der trapezförmigen Bresche weiterhin konstant bleibt. Gleichzeitiger Beginn der Aufweitung der Bresche (für $t_2 < t < t_3$). Phase 3 endet, sobald die Bresche bis zur Sohle des Deiches erodiert ist.
- Phase 4: Eintreten eines kritischen Fließverhaltens durch die Bresche (für $t_3 < t < t_4$). Das Breschenwachstum schreitet vorwiegend seitwärts voran. Die vertikale Erosion des Deichs hängt nur noch von der Erosionsbeständigkeit des Deichuntergrunds ab.
- Phase 5: Die Aufweitung der Bresche schreitet weiter voran (für $t_4 < t < t_5$). Für $t > t_5$: Verringerung der Fließgeschwindigkeit und der Beendigung der Erosionsprozesse. Die Bruchstelle vergrößert sich nicht weiter. Die see- bzw. binnenseitigen Wasserspiegel gleichen sich an.

In den Phasen 1 bis 3 findet hauptsächlich die Ausformung der Bresche statt. In den Phasen 4 und 5 ist die Ausformung der Bresche weitestgehend abgeschlossen. In diesen

beiden Phasen konzentriert sich ebenfalls der Durchfluss durch die Bresche, wobei mit Ende der Phase 4 das binnenseitig steigende Stauwasser beginnt, den Durchfluss zu beeinflussen. Eine detaillierte Beschreibung des semi-empirischen Modells von Visser (1998) findet sich in dem angegebenen Schrifttum.

4.2.2 Prozessbasierte Modelle

Tuan (2007) greift den Ansatz von Visser (1998) auf und entwickelt diesen weiter. Er entwickelt ein prozessbasiertes Modell zur Beschreibung der Breschenbildung in homogenen Sanddeichen. Anders als Visser (1998) beschreibt Tuan (2007) das Versagen des Sanddeiches nicht auf geometrischem Wege. Er verknüpft die Breschenentwicklung mit der Erosionsrate in der Bresche. Die Gleichung für die Breschenentwicklung in kompakter Form lautet wie folgt:

$$b_L \frac{\delta B_v}{\delta t} - \left(\frac{\delta Z_b}{\delta t} \right)_L B_v = \left(\frac{\delta A}{\delta t} \right)_L \quad (4)$$

Eine detaillierte Beschreibung des prozessbasierten Modells von Tuan (2007) findet sich in dem angegebenen Schrifttum.

4.3 Modellauswahl für die weiterführenden Untersuchungen

Auf Basis der unter 4.1 und 4.2 behandelten Ansätze wurde eine Vielzahl von empirischen und numerischen Modellen entwickelt. Für die Untersuchungen zu den Versagenswahrscheinlichkeiten von Dünen wurden zwei repräsentative Ansätze ausgewählt: einerseits das empirische Dünenerosionsmodell von Van Gent et al. (2008) sowie andererseits das prozessbasierte numerische Modell XBeach (Roelvink et al. 2009). Diese werden im Folgenden (Kap. 5 und Kap. 6) im Einzelnen näher beschrieben.

5 Semi-empirischer Dünenerosionsansatz – Van Gent et al. (2008)

Der empirische Berechnungsansatz von Van Gent et al. (2008), welcher eine Erweiterung des Dünenerosionsansatzes von Vellinga (1986) darstellt, basiert auf der Annahme eines Gleichgewichtsprofils. In groben Zügen bedeutet dieses Konzept: Das Initialprofil einer Düne und des angrenzenden Strandbereiches sind den hydrodynamischen Belastungen einer Sturmflut ausgesetzt. Die hydrodynamischen Belastungen in Form von erhöhten Wasserständen und Wellenbelastung bewirken eine Umlagerung des Sedimentes von der Düne und dem Strand in seewärtige Richtung. Das Profil der Düne und des angrenzenden Strandes passt sich den Belastungen an. Nach einer ausreichend langen Belastungsdauer sind keine Veränderungen des Profils (sowohl der Düne als auch des Strandes) mehr zu verzeichnen. Das Gleichgewichtsprofil hat sich eingestellt.

Der verwendete Dünenerosionsansatz berücksichtigt eine begrenzte Zahl von Eingangsgrößen. Die Wellenhöhe (H_{0s}), die Wellenperiode (T_p) sowie die Fallgeschwindigkeit (w) des Sediments gehen direkt in die Berechnungen ein. Wohingegen der Sturmflutwasserstand indirekt über die Lage des Dünenfußes Berücksichtigung findet.

Auf Grundlage von (5) und (6) ist es möglich, die seewärtige Ausdehnung des Erosionsprofils zu ermitteln. Die Form des seewärtigen Erosionsprofils ist durch (7) beschrieben. Der Anschluss des Erosionsprofils an die Sohle erfolgt mit einer Neigung von 1:12,5. Für die Neigung der Dünenfront des Erosionsprofils wird eine Neigung von 1:1 angenommen. Die erodierten und akkumulierten Sedimentvolumina lassen sich über entsprechende Flächen darstellen (vgl. Abb. 2).

Für die weiterführenden Untersuchungen zur Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit und der Zuverlässigkeit von Hochwasserschutzdünen ist das Gleichgewichtsprofil zu ermitteln (vgl. Kap. 8 und Kap. 9). Die Grundlage hierfür sind das Initialprofil der Düne und das resultierende Erosionsprofil nach Van Gent et al. (2008). Die Ermittlung des Gleichgewichtsprofils erfolgt über einen Flächenausgleich zwischen den erodierten Flächen (V1 und V2 in Abb. 2) und der akkumulierten Fläche (V3 in Abb. 2). Die Berechnung der Flächen und der Flächenausgleich erfolgen über eine numerische Integration.

Ist das Gleichgewichtsprofil ermittelt, kann die Restkronenbreite der Düne bestimmt werden. Diese wird für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit und die Ableitung der Versagenseinwirkungsfunktionen benötigt.

$$x_R = 250 * \left(\frac{H_{0s}}{7,6} \right)^{1,28} * \left(\frac{0,0268}{w} \right)^{0,56} \quad (5)$$

$$y_R = \left(\frac{H_{0s}}{7,6} \right) * \left[0,4714 * \left(250 * \left(\frac{12}{T_p} \right)^{0,45} + 18 \right)^{0,5} - 2,0 \right] \quad (6)$$

$$\frac{7,6}{H_{0s}} y = 0,4714 * \left[\left(\frac{7,6}{H_{0s}} \right)^{1,28} * \left(\frac{12}{T_p} \right)^{0,45} * \left(\frac{w}{0,0268} \right)^{0,56} * x + 18 \right]^{0,5} - 2,0 \quad (7)$$

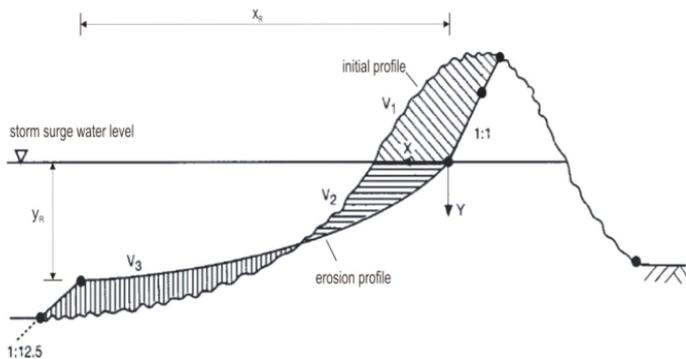


Abbildung 2: Definitionsskizze für den Dünenerosionsansatz nach Van Gent et al. (2008).

6 Prozessbasiertes Dünenerosionsmodell – XBeach

Neben dem empirischen Dünenerosionsmodell von Van Gent et al. (2008) wird das numerische Modell XBeach (Roelvink et al. 2009) angewendet. Dieses prozessbasierte numerische Modell bildet morphologische Veränderungen im küstennahen Bereich ab, einschließlich Dünenerosion und Überströmen von Strandbereichen und Dünen.

Durch den modularen Aufbau des Modells mit Routinen zur Berechnung der Ausbreitung kurzer Wellen, der instationären Flachwassergleichungen, des Sedimenttransports und der Erhaltungsgleichungen ist es möglich, eine große Bandbreite an Randbedingungen der morphologischen Entwicklung eines Küstenabschnittes zu berücksichtigen. So ist es z. B. möglich, eine Abfolge von Sturmereignissen, definiert durch Wellenhöhe, Wellenperiode, Sturmflutwasserstand und Sturmdauer, zu simulieren. Bezüglich der umfangreichen mathematischen Formulierungen wird auf das Benutzerhandbuch zu dem numerischen Modell verwiesen.

Um Rechenzeit und Rechenkapazität zu reduzieren, wurden die Untersuchungen 1-dimensional durchgeführt. Hintergrund hierfür ist die große Anzahl an durchzuführenden Simulationen, die für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit und die Ableitung von Einwirkungsversagensfunktionen notwendig sind.

Die hydrodynamischen Randbedingungen werden durch Sturmflutwasserstände charakterisiert, welche als Zeitreihe am offenen Rand des Simulationsgebietes außerhalb der Brandungszone im Tiefwasser eingesteuert werden. Damit wird einer Empfehlung des Benutzerhandbuches Folge geleistet, nach der so eine höhere numerische Stabilität erreicht wird. Die korrespondierenden Seegangsbedingungen werden durch Wellenhöhe, Wellenfrequenz und Wellenanlaufrichtung bestimmt. Durch die Anwendung multivariater statistischer Methoden wird sichergestellt, dass sowohl den Sturmflutwasserständen als auch den korrespondierenden Seegangsbedingungen die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet werden kann. Für eine detaillierte Beschreibung der Methode sei auf das Kapitel „Analyse und Bewertung multivariater Belastungsgrößen für die deutsche Nord- und Ostseeküste“ verwiesen.

Bathymetrische und bauwerksbezogene Informationen werden über die sogenannte Bathymetriedatei in das Modell eingelesen. Weitere Informationen zu der verwendeten Bathymetrie und zu den Bauwerksinformationen werden an geeigneter Stelle gegeben.

Innerhalb des numerischen Modells XBeach besteht die Möglichkeit, verschiedene Kornfraktionen zu definieren. Für die durchgeführten Simulationen wird eine Kornfraktion definiert, die einem Mittelsand mit einem mittleren Korndurchmesser von 0,3 mm und einer Trockenrohddichte von $2,65 \text{ t/m}^3$ entspricht, wie sie für das Sediment an der deutschen Ostseeküste angenommen werden kann (Newe und Dette 2004; Loder 2015; Stegemeier 2015).

Die Kalibrierung des numerischen Modells XBeach erfolgt für das Projektgebiet Markgrafenheide (Abb. 3).



Abbildung 3: Sturmflutschutzmaßnahmen für die Ortschaft Markgrafenheide (Quelle: Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern).

Die Ortschaft Markgrafenheide wird durch einen Ring aus Küstenschutzbauwerken gegen auftretende Sturmfluten geschützt. Seeseitig wird der Sturmflutschutz durch eine Vollschutzdüne übernommen, welche teilweise durch ein Deckwerk verstärkt wird. Landseitig wird Markgrafenheide von einem Deichring umschlossen, der durch zwei Hochwasserschutzwände ergänzt wird.

Zum Zwecke der Kalibrierung des numerischen Modells stellte das StALU MM Profilmessungen der Vollschutzdüne zur Verfügung (StALU MM 2009). Die Vermessungen stammen aus den Jahren 2004 und 2006. Die Profilmessungen aus dem Jahr 2006 wurden nach der Sturmflut vom 01./02. November 2006 durchgeführt. Es sind insgesamt 18 Profile auf einer Länge von 1,7 km aufgenommen worden. Für die Untersuchungen in dem numerischen Modell wird das Profil des Kkm 152,800 gewählt. Es befindet sich am nördlichen Ende der Dünenstrecke. Ein Profil, das südlicher gelegen ist, ist für die Untersuchungen nicht geeignet, da die Düne zwischen Kkm 151,800 und Kkm 152,700 durch ein Deckwerk (Abb. 4, blaue Linie) verstärkt wird. Mit Hilfe des genannten Profils wird eine Bathymetrie als Grundlage für die numerischen Untersuchungen aufgebaut.

Abb. 4 zeigt die verwendeten Profile des Küstenkilometers 152,800. Das gemessene Profil aus dem Jahr 2004 (gepunktete Linie in Abb. 5) wurde für die Kalibrierung des Modells XBeach in ein programmkompatibles Format konvertiert. Das Unterwasserprofil wurde mit einer für die Küste vor Markgrafenheide typischen Neigung von 1:50 bzw. 1:100 erweitert. Die Erweiterung ist notwendig, da die Vermessungsdaten nicht bis in die erforderliche Tiefe vorlagen. Ebenso standen keine Vermessungen der Schorre zur Verfügung. Die hydrodynamischen Randbedingungen in Form von Sturmflutganglinien und Seegangszeitreihen wurden aus Messungen des Wasserstandes und des Seegangs am Pegel Warnemünde abgeleitet.

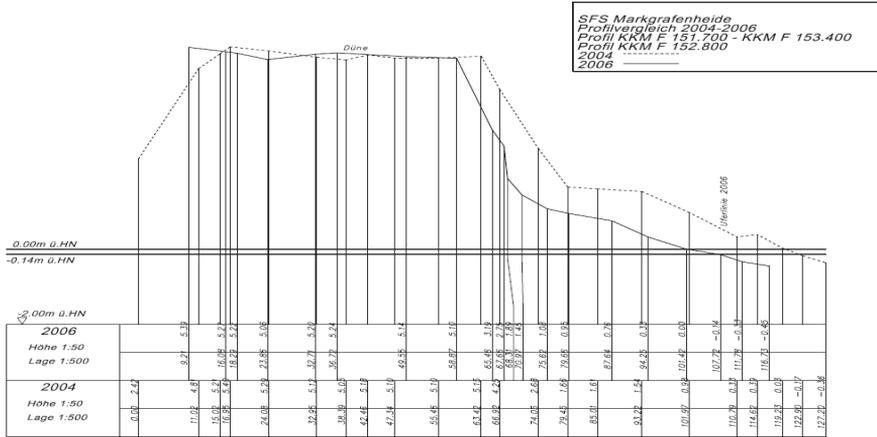


Abbildung 4: Profile der Vollschutzdüne an dem Küstenkilometer 152,8 aus den Jahren 2004 und 2006.

Abb. 5 zeigt die verwendete Sturmflutganglinie bei der Sturmflut vom 01./02. November 2006. Die eingesteuerte Sturmflutganglinie umfasst – neben dem eigentlichen Sturmergebnis – eine Zeitspanne von 24 Stunden vor und 24 Stunden nach dem Ereignis. Im Ganzen umfasst die Sturmflutganglinie somit 4 Tage.

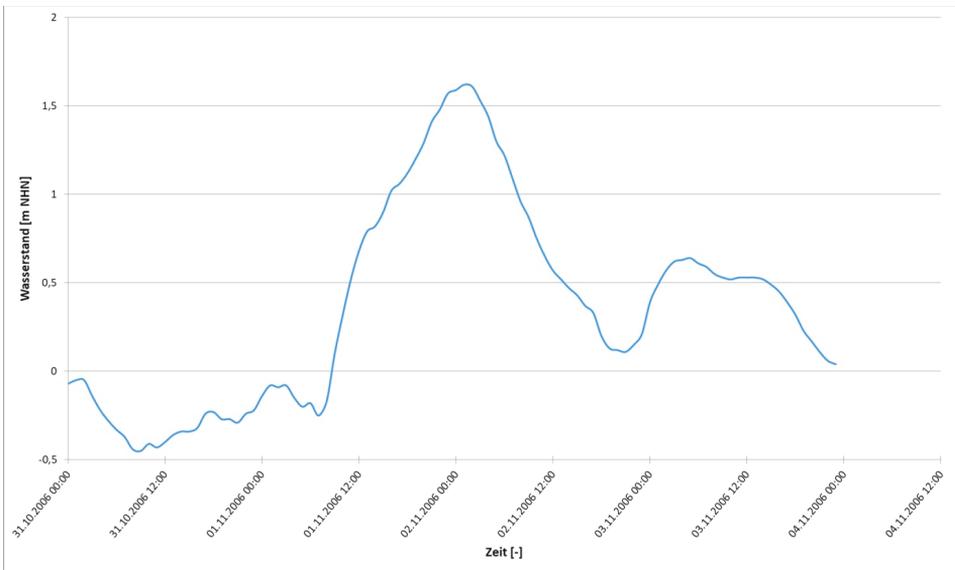


Abbildung 5: Zur Kalibrierung des Modells XBeach verwendete Sturmflutganglinie.

Über die Variation verschiedener morphologischer Einflussfaktoren erfolgte die Kalibrierung des Modells. Die morphologischen Einflussfaktoren „wetslp“ (critical avalanching slope under water) und „dryslp“ (critical avalanching slope above water) (Roelvink et al. 2015) zeigten in dem numerischen Modell den größten Einfluss auf die morphologische

Entwicklung. Die besten Kalibrierungsergebnisse wurden mit den Faktoren $wetslp = 0,08$ und $dryslp = 0,5$ erzielt. Die folgende Abb. 6 zeigt das Ergebnis der Modellkalibrierung. Es sind zum einen die vermessenen Profile (grün (2004) bzw. blau (2006)) der Düne und zum anderen das berechnete Profil der Düne (rot) dargestellt. Die Erosionserscheinungen der Dünenfront werden durch das numerische Modell gut abgebildet. Die Erosion wird nur minimal überschätzt. Die Erosion des Strandbereichs hingegen wird leicht unterschätzt. Da die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeiten und die Ableitung der Einwirkungsversagensfunktion auf einer Grenzzustandsgleichung basieren (vgl. Kap. 8), welche die Restkronenbreite mit einer minimal zulässigen Kronenbreite vergleicht, wird angenommen, dass die Unterschätzung der Erosion im Strandbereich keinen Einfluss auf das Ergebnis hat.

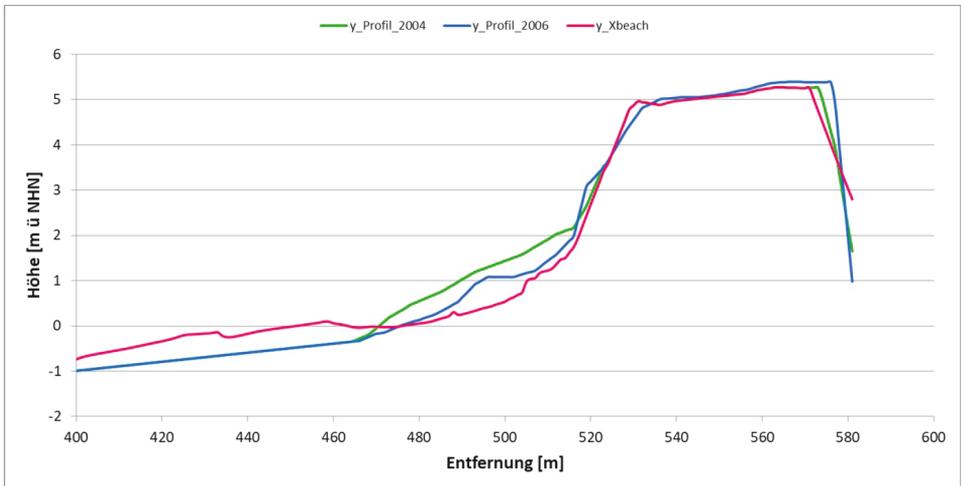


Abbildung 6: Vermessene und berechnete Profile der Modellkalibrierung.

Mit dem kalibrierten Modell werden für eine Vielzahl von Sturmereignissen der Rückgang der Dünenkrone ermittelt und daraus die Versagenswahrscheinlichkeiten und die Einwirkungsversagensfunktionen abgeleitet.

7 Eingangswdaten für die risikobasierte Analyse der Dünenerosion

7.1 Dünenausgangsprofil

Für die Berechnungen der Versagenswahrscheinlichkeit – beispielsweise unter Anwendung des Ansatzes von Van Gent et al. (2008) oder auch auf Grundlage einer numerischen Modellierung mit XBeach – ist die Definition eines Ausgangsprofils der Hochwasserschutzdüne erforderlich. Diese wird im Folgenden in Anlehnung an die Verhältnisse in Mecklenburg-Vorpommern definiert: Eine Vollschutzdüne weist gemäß dem Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern eine Neigung der Binnenböschung von 1:2 und eine Neigung der Außenböschung von 1:3 auf. Der Dünenfuß liegt im Regelfall bei NHN +1 m oder höher. Für das Strandprofil werden zwei Bereiche unterschieden: Der obere Bereich des Strandprofils (trockener Strand) weist eine Neigung von 1:50 und der

untere Bereich des Strandprofils (Unterwasserprofil) weist eine Neigung von 1:100 auf (Abb. 7).

Für die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Untersuchungen wurden die Berechnungsroutinen so gestaltet, dass die Kronenhöhe und die Kronenbreite der Düne variiert werden können. Die Neigungen der Binnen- bzw. Außenböschung sowie die Neigungen der beiden Strandbereiche sind für die Berechnungsroutinen ebenfalls dem Grunde nach variabel. Die Kronenhöhe wurde für die Analysen zunächst auf NHN +5 m festgelegt. Dies entspricht der Höhe einer typischen Hochwasserschutzdüne (Vollschuttdüne) an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns.

Der Korndurchmesser des Sediments wird in Anlehnung an Untersuchungen des Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg (TUHH) (Loder 2015; Stegemeier 2015) zu $d_{50}=0,3$ mm angenommen – dies entspricht dem Korndurchmesser von Mittelsand und dem mittleren Korndurchmesser einer typischen Vollschuttdüne (Newe und Dette 2004).

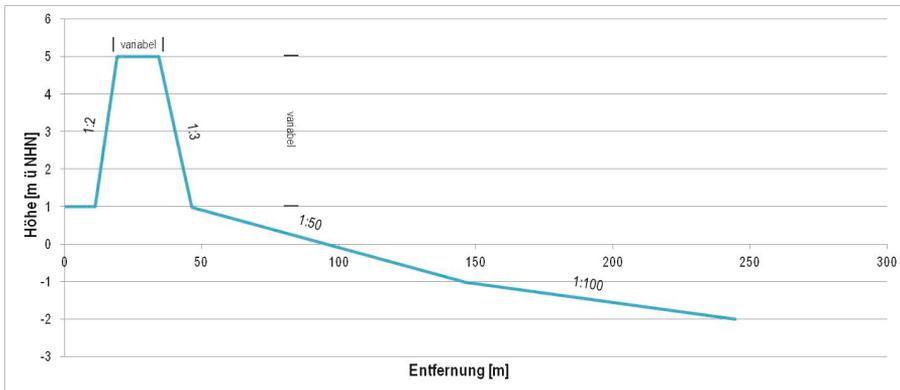


Abbildung 7: Dünenausgangsprofil für die Berechnungen der Versagenswahrscheinlichkeit.

Vorschädigungen der Düne durch kleine und mittlere Sturmfluten werden in den Modellen durch Neustart der Berechnungen mit entsprechend vorgeschädigten Profilen berücksichtigt.

7.2 Hydrodynamische Eingangsdaten

Die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeiten sowie die Ableitung der Einwirkungsversagensfunktionen für den Bauwerkstyp Hochwasserschutzdüne erfolgt auf probabilistischem Weg. Der Dünenerosionsprozess ist im Wesentlichen abhängig von dem auftretenden Sturmflutwasserstand und der herrschenden Seegangbelastung. Diese beiden Faktoren werden in unterschiedlichen Ausprägungen in den Modellen berücksichtigt. In das Dünenerosionsmodell von Van Gent et al. (2008) finden diese Größen als Einzelwerte Eingang. Es werden pro Rechenlauf ein Wasserstand mit einer Wellenhöhe und der dazugehörigen Wellenperiode berücksichtigt. Das numerische Modell XBeach hingegen berücksichtigt den Wasserstand als Zeitreihe der Sturmflutwasserstände, definiert durch den Wasserstand und die Fülle. Darüber hinaus wird der zugehörige Seegang berücksichtigt. Die Berechnungsroutinen für den Ansatz nach Van Gent et al. (2008) und das nume-

rische Modell XBeach sind so angelegt, dass sowohl die Wasserstände, respektive die Sturmflutwasserstandsganglinien, als auch die Wellenhöhen und Wellenperioden, respektive der Seegang, probabilistisch in die Berechnungen eingehen. Dazu ist es notwendig, die jeweiligen Größen mit einer kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeit zu versehen.

Für die Bestimmung von Wellenhöhen bzw. Seegang und Sturmflutwasserständen, respektive Sturmflutganglinien, werden bivariate statistische Modelle auf die genannten Größen angewendet.

Im Folgenden werden beispielhaft Ergebnisse dieser statistischen Analysen gezeigt, die als Eingangsgrößen für die beiden Dünenerosionsmodelle dienen. Abb. 8 zeigt beispielhaft fünf verschiedene Formen von Sturmflutganglinien mit variierenden Füllen und ähnlichen Scheitelwasserständen. Die gezeigten Sturmflutganglinien haben eine kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeit der Wasserstände und Füllen von $p = 0,005$ (Wiederkehrintervall $T = 200$ Jahre). Hierzu wurde eine Vielzahl gemessener Wasserstandsganglinien standardisiert und darauffolgend der Zeitpunkt bestimmt, zu welchem der maximale Wasserstand eintritt. Der Verlauf des ansteigenden Astes und des absteigenden Astes der Wasserstandsganglinie werden getrennt nach (8) und (9) simuliert. Die Parameter a und b bestimmen den Verlauf der Wasserstandsganglinie. Mit Hilfe der durch bivariate statistische Methoden bestimmten Wasserstände und Füllen mit kombinierter Eintrittswahrscheinlichkeit werden die standardisierten neu simulierten Wasserstandsganglinien skaliert. Die Methodik zur Bestimmung der Belastungsgrößen mit kombinierter Eintrittswahrscheinlichkeit ist im Kapitel „Analyse und Bewertung multivariater hydrodynamischer Belastungsgrößen für die deutsche Nord- und Ostseeküste“ detailliert beschrieben.

$$r(\theta) = \frac{a}{\sqrt{(\cos(\theta + b))^2(a \sin(\theta + b))^2}} \quad (8)$$

$$r(\theta) = \frac{a}{\sqrt{(\cos(\theta - b))^2(a \sin(\theta - b))^2}} \quad (9)$$

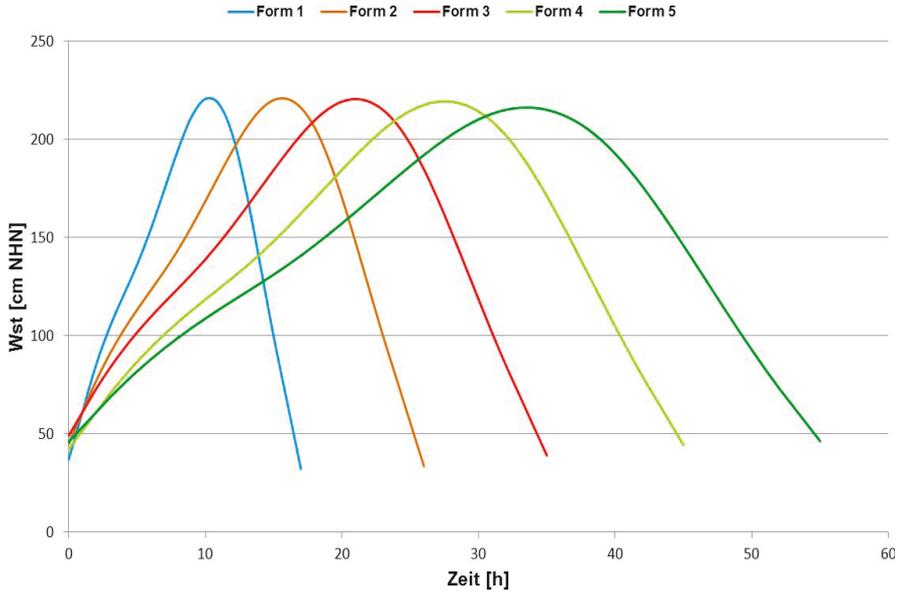


Abbildung 8: Sturmflutganglinien mit einer kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeit ($p = 0,005$) der Wasserstände und Füllen.

Wie weiter oben in diesem und in Kap. 6 beschrieben, finden neben den Sturmflutganglinien auch die dazugehörigen Seegangsinformationen Eingang in das numerische Modell XBeach. Zur Ermittlung des Sturmflutseegangs werden die Ergebnisse der bivariaten statistischen Auswertung der Wasserstände und Füllen mit den Ergebnissen einer bivariaten statistischen Auswertung der Wasserstände und Wellenhöhen kombiniert (Abb. 10) (Salecker et al. 2011, 2012a, 2012b).

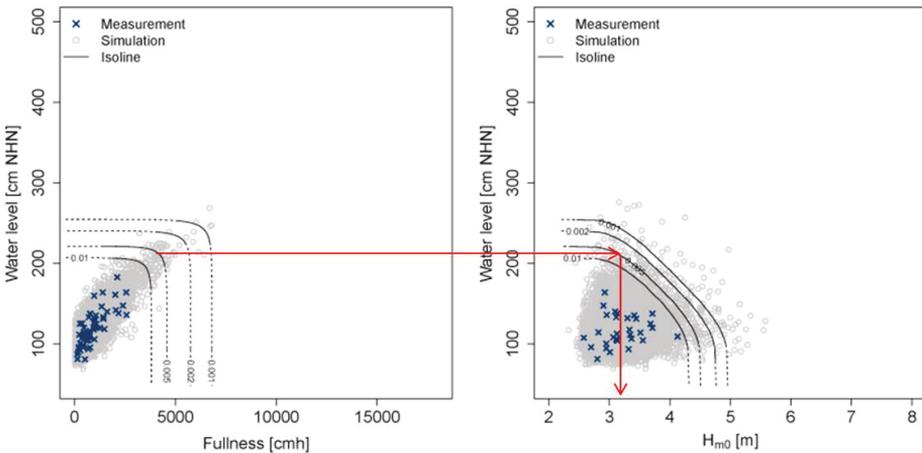


Abbildung 9: Methodisches Vorgehen zur Ermittlung des Seegangs in Abhängigkeit des Wasserstandes der Sturmflutganglinie.

Für den maximalen Wasserstand der generierten Sturmflutganglinien aus der statistischen Auswertung der Wasserstände und Füllen wird die entsprechende Wellenhöhe aus der statistischen Auswertung der Wasserstände und Wellenhöhen gewählt. Somit haben sowohl die Sturmflutganglinie als auch die Wellenhöhe das gleiche Wiederkehrintervall. Die ermittelte Wellenhöhe wird mit Hilfe einer Berechnungsformel in eine Wellenperiode umgerechnet (10).

$$T_p = 1,21 * (1,11 * H_s + 2,5) \quad (10)$$

8 Versagenswahrscheinlichkeit und Versagensfunktion

Versagenswahrscheinlichkeiten beschreiben die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Versagensereignisses für ein spezifisches Bauwerk. Als Versagen ist im Rahmen dieser Untersuchungen der Zustand definiert, in dem ein spezifisches Bauwerk seine vorgesehene Schutzfunktion nicht mehr erfüllt. Die Quantifizierung der Versagenswahrscheinlichkeiten erfolgt im Rahmen einer Zuverlässigkeitsanalyse. Die Eintrittswahrscheinlichkeit des Komplementärereignisses, also die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Nichtversagens, wird als Zuverlässigkeit eines Bauwerkes bezeichnet (Bachmann 2012).

Die Zuverlässigkeit eines Bauwerks kann durch eine Grenzzustandsgleichung $Z(W, E)$ (11) beschrieben werden. In dieser Gleichung werden dem bauwerksspezifischen Widerstand (W) die auf das Bauwerk wirkenden Belastungen (E) gegenübergestellt (Bachmann 2012). Grenzzustandsgleichungen beschreiben demnach mathematisch die physikalischen Zusammenhänge, die zu einem Versagen von Hochwasserschutzbauwerken führen.

$$Z(W, E) = W - E \quad (11)$$

Ist das Ergebnis einer Grenzzustandsgleichung positiv, ist also der Widerstand eines Bauwerks größer als die einwirkenden Belastungen, so ist ein Versagen des Bauwerkes nicht zu erwarten. Bei negativem Ergebnis tritt ein Versagen des Bauwerkes ein.

Für den Bauwerkstyp Hochwasserschutzdüne hat die Grenzzustandsgleichung die folgende Form (12) (Gruhn et al. 2012a, 2012b, 2012c, Fröhle et al. 2014):

$$Z = m * d_{crest_cur} - d_{crest_crit} \quad (12)$$

mit: d_{crest_cur} Kronenbreite der Düne im Gleichgewichtsprofil [m]
 d_{crest_crit} minimal zulässige Kronenbreite [m]
 m Modellfaktor [-]

Der Modellfaktor m berücksichtigt hierbei die mit dem Erosionsmodell verbundenen Unsicherheiten.

Die minimal zulässige Kronenbreite d_{crest_crit} wird auf 5 m festgelegt. Dieser Wert entspricht der Restkronenbreite des Sicherheitsteils einer Vollschutzdüne.

Mit Hilfe einer Monte-Carlo-Analyse auf Grundlage der Grenzzustandsgleichung kann die Versagenswahrscheinlichkeit errechnet werden. Wird eine ausreichende Anzahl von Berechnungen durchgeführt, wird die Versagenswahrscheinlichkeit als relative Häufigkeit für das Eintreten eines negativen Ergebnisses der Grenzzustandsgleichung betrachtet (13) (Gruhn et al. 2012a, 2012b, 2012c, Fröhle et al. 2014):

$$P_f \approx \frac{n_{\text{fai}}}{n} \tag{13}$$

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

In einem ersten Schritt werden die Versagenswahrscheinlichkeiten unter Anwendung des empirischen Dünenerosionsmodells von Van Gent et al. (2008) berechnet.

Abb. 10 zeigt die Versagenswahrscheinlichkeiten für eine Hochwasserschutzdüne in Abhängigkeit von der Kronenbreite der Düne für Sturmereignisse ausgewählter Wiederkehrintervalle. Für Ereignisse mit einem Wiederkehrintervall von 200 Jahren ist ein Versagen der Düne mit dem in Abb. 3 dargestellten Profil einer Vollschutzdüne ab einer Kronenbreite von 14 m zu erwarten. Für Sturmereignisse mit geringeren Wiederkehrintervallen setzt ein Versagen der Düne bei entsprechend geringeren Kronenbreiten ein (vgl. Abb. 10). Generell steigt mit abnehmender Kronenbreite die Versagenswahrscheinlichkeit. Unterhalb einer Kronenbreite von 8 m tritt für alle untersuchten Wiederkehrintervalle ein Versagen der Düne auf. Für das untersuchte Dünenprofil ist gemäß der Berechnungen eine Kronenbreite von 8 m ein unterer Grenzwert für ein Dünenversagen. Derartige Untersuchungen können herangezogen werden, um z. B. eine Abschätzung der Zuverlässigkeit von bereits sturmflutgeschädigten Dünen vorzunehmen.

Aufgrund des notwendigen Umfangs der Monte-Carlo-Analyse und der vergleichsweise langen Simulationszeit einer einzelnen Simulation mit dem numerischen Modell XBeach wurde auf eine Ableitung der Versagensfunktionen mit Hilfe des numerischen Modells verzichtet. Der Fokus liegt stattdessen auf der Ableitung der Versagenseinwirkungsfunktionen.

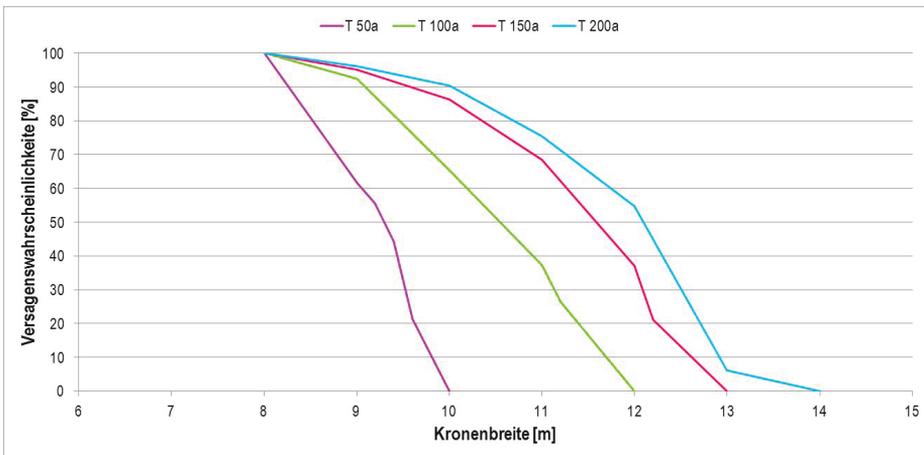


Abbildung 10: Versagensfunktion für verschiedene Wiederkehrintervall der Eingangsdaten, berechnet mit dem Ansatz von Van Gent et al. (2008).

9 Versagenseinwirkungsfunktionen

Versagenseinwirkungsfunktionen (engl. Fragility Curves) sind ein Werkzeug der Zuverlässigkeitsanalyse zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Hochwasserschutzbauwerken. Diese Funktionen zeigen die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit bzw. Nicht-Versagenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit einer definierten Belastung (z. B. Wellenhöhe, Wasserstand), die auf das Bauwerk einwirkt (Abb. 11).

Die Abszisse beschreibt die einwirkende Belastung auf das Bauwerk, wohingegen die Ordinate die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit zeigt. Die Funktion beginnt im Koordinatenursprung. Dies ist gleichbedeutend mit einer Versagenswahrscheinlichkeit von Null für den Fall, dass keine Belastung auf das Bauwerk einwirkt. Eine Versagenswahrscheinlichkeit von eins bedeutet ein sicheres Versagen des Hochwasserschutzbauwerks.

Der Gradient der Funktion ist immer positiv. Ein Anstieg der Belastung auf das Bauwerk führt zu einer Erhöhung oder ggf. zu einer Stagnation der Versagenswahrscheinlichkeit bzw. Verringerung oder ggf. einer Stagnation der Nicht-Versagenswahrscheinlichkeit des Bauwerkes.

Die Form der Kurve ist u. a. abhängig von dem Typ des Bauwerks sowie den Parametern zur Beschreibung der Zuverlässigkeit des Bauwerkes (z. B. Geometrie, Ausführung, Unterhaltungszustand). Darüber hinaus müssen die Unsicherheiten der Eingangsgrößen und des Modells zur Beschreibung des Bauwerksversagens berücksichtigt werden (Bachmann et al. 2009).

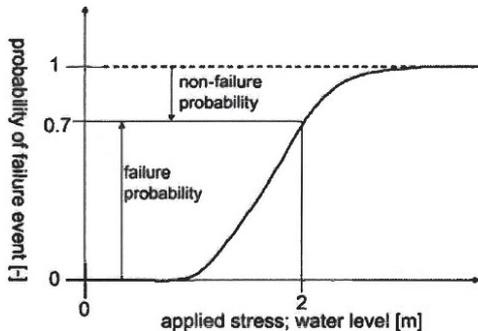


Abbildung 11: Allgemeine Merkmale einer Versagenseinwirkungsfunktion (in: Bachmann et al. 2009).

Versagenseinwirkungsfunktionen werden auf Grundlage von Zuverlässigkeitsanalysen abgeleitet. Hierzu werden die Versagenswahrscheinlichkeiten für diskrete Werte des Wasserstands in Kombination mit dem zugehörigen Seegang berechnet und daraus die Versagenseinwirkungsfunktion abgeleitet.

Die Ableitung der Versagenseinwirkungsfunktionen erfolgt einerseits auf Grundlage des empirischen Dünenerosionsmodells von Van Gent et al. (2008) und andererseits auf Simulationen mit dem numerischen Modell XBeach (Gruhn et al. 2012c; Fröhle et al. 2014).

Für die Berechnungen der Versagenswahrscheinlichkeit ist ein Initialprofil der Düne mit einer Kronenbreite von 12 m zugrunde gelegt worden.

In einem ersten Schritt werden die Versagenseinwirkungsfunktionen unter Anwendung des Dünenerosionsmodells von Van Gent et al. (2008) abgeleitet. Es werden im

vorliegenden Fall die Versagenswahrscheinlichkeiten für diskrete Werte des Wasserstandes in Kombination mit möglichen Wellenhöhen desselben Wiederkehrintervalls berechnet.

In Abb. 12 sind die Versagenseinwirkungsfunktionen für die Wiederkehrintervalle 200 Jahre, 150 Jahre und 100 Jahre dargestellt. Eine Versagenseinwirkungsfunktion für Sturmereignisse mit dem Wiederkehrintervall von 50 Jahren ist nicht dargestellt, da für diese Ereignisse ein Dünenversagen erst ab einer Kronenbreite von 10 m auftritt. In den dargestellten Untersuchungen führen Wasserstände unter 1,9 m NHN nicht zu einem Versagen der Hochwasserschutzdüne. Wird dieser Wert überschritten, ist ein Versagen der Düne zu erwarten, denn das Zusammenwirken von erhöhten Wasserständen und verstärktem Seegang führt zu einer Erosion der Düne und damit einer Reduzierung der Restkronenbreite. Eine weitere Erhöhung des Wasserstands führt zu einer Erhöhung der Versagenswahrscheinlichkeiten. Aus Abb. 12 ist zu erkennen, dass der Gradient der Funktionen mit kleiner werdendem Wiederkehrintervall abnimmt. Dies bedeutet, dass sich die Versagenswahrscheinlichkeit für einen festen Wasserstand mit kleiner werdendem Wiederkehrintervall verringert.

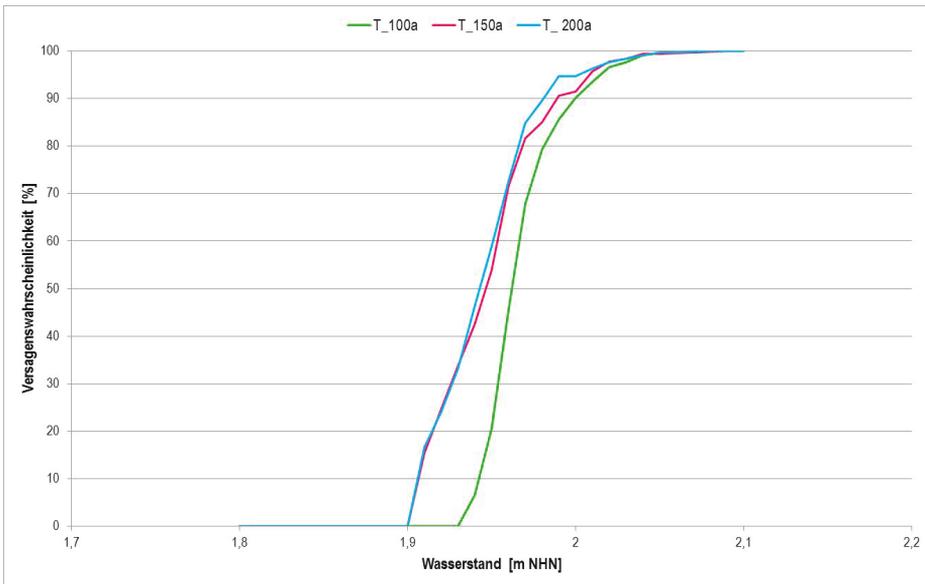


Abbildung 12: Versagenseinwirkungsfunktionen für die Belastungsgröße Wasserstand und verschiedene Wiederkehrintervalle der Belastung auf Grundlage des Dünenerosionsmodells von Van Gent et al. (2008).

In einem zweiten Schritt wird das numerische Modell XBeach zur Ableitung der Versagenseinwirkungsfunktionen angewendet. Es werden hier die Versagenswahrscheinlichkeiten für feste Wasserstände in Kombination mit möglichen Ausprägungen des Seegangs und Dauern der Sturmereignisse desselben Wiederkehrintervalls berechnet. Zusätzlich kann hierbei, anders als bei dem empirischen Dünenerosionsmodell von Van Gent et al. (2008), ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor, die Sturmflutdauer, auf die Dünenerosion berücksichtigt werden (Gruhn et al. 2014).

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden die Versagenseinwirkungsfunktionen für die Wiederkehrintervalle 200 Jahre, 150 Jahre und 100 Jahre abgeleitet. Abb. 13 zeigt die generierten Versagenseinwirkungsfunktionen (Gruhn et al. 2014). Form und Verlauf der Versagenseinwirkungsfunktionen sind grundsätzlich vergleichbar. Auffallend ist, dass der Bereich der versagensrelevanten Wasserstände verschoben ist. Mit dem Dünenerosionsmodell von Van Gent et al. (2008) ergibt sich ein sehr schmaler Wasserstandsbereich, der zu einem Versagen des Bauwerkes führt. Unter Anwendung des numerischen Modells XBeach ist dieser Bereich breiter.

Der Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse liegt in der unterschiedlichen Abbildung der physikalischen Prozesse in den jeweiligen Modellen. Das Dünenerosionsmodell von Van Gent et al. (2008) ist ein empirisches Modell, in das die Wellenhöhen, Wellenperiode und Fallgeschwindigkeit des Sediments direkt in die Berechnungsgleichungen eingehen. Der Sturmflutwasserstand wird über die Lage des Dünenfußes im Erosionsfall im Modell berücksichtigt. Die Dauer des Sturmereignisses bleibt unberücksichtigt.

In dem prozessbasierten numerischen Modell werden die physikalischen Prozesse detaillierter abgebildet. Neben den genannten Parametern gehen hier auch der Wasserstand und die Dauer des Sturmereignisses direkt in die Berechnung ein. Der Wasserstand wird in Form einer Zeitreihe berücksichtigt, über die auch die Dauer des Sturmereignisses gesteuert werden kann.

Aufgrund der detaillierteren Abbildung der physikalischen Prozesse während des Dünenerosionsprozesses in dem numerischen Modell sollte dieses für die Berechnung der Versagenseinwirkungsfunktionen angewendet werden.

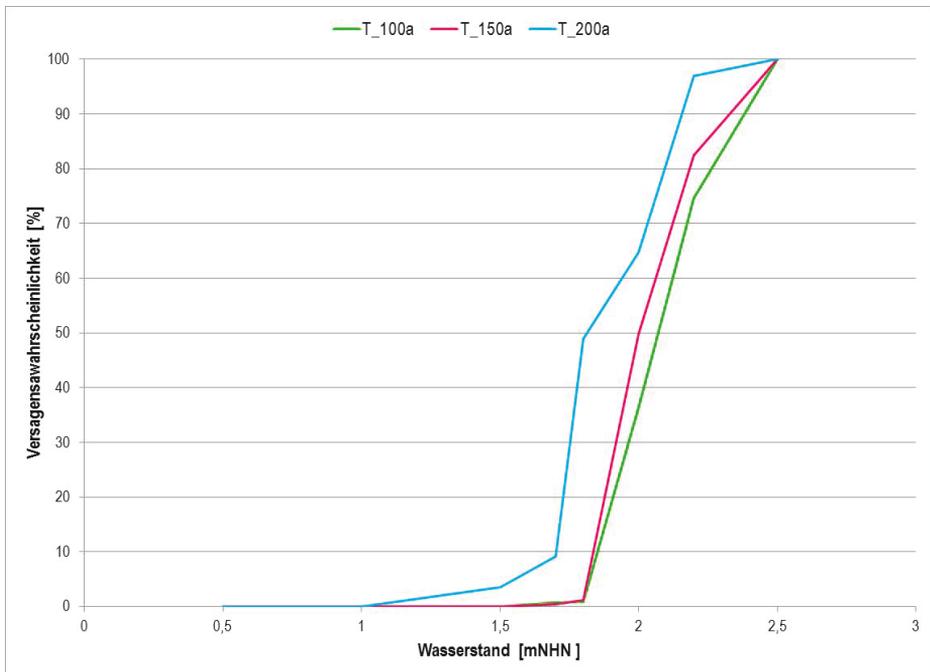


Abbildung 13: Versagenseinwirkungsfunktionen für die Belastungsgröße Wasserstand und verschiedene Wiederkehrintervalle der Belastung auf Grundlage des numerischen Modells XBeach.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Für eine Entwicklung von anwendungsorientierten Schadens- und Risikoanalyse-Verfahren und die Ermittlung des Hochwasserrisikos ist die Kenntnis der relevanten Versagensmechanismen typischer Hochwasserschutzbauwerke in Verbindung mit den zugehörigen Versagenswahrscheinlichkeiten notwendig. Der Fokus der durchgeführten Untersuchungen lag auf den Dünen als ein typisches Element des Hochwasserschutzes an der deutschen Ostsee- und Nordseeküste.

Eine Literaturrecherche zu Beginn des Vorhabens brachte einen Überblick über die verschiedenen Ansätze und Modelle zur Beschreibung der Dünenerosion. Als relevante Versagensmechanismen wurden (1) die Dünenerosion durch Wellenangriff und (2) die Dünenerosion durch Überströmung identifiziert und entsprechende Berechnungsansätze und Modelle zusammengetragen.

Für die risikobasierte Analyse der Dünenerosion wurden aus der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Modelle zwei verschiedene ausgewählt, die die Grundlage der Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeiten und der Ableitung der Versagensfunktionen und der Versagenseinwirkungsfunktionen bildeten. Es wurden (1) das semi-empirische Dünenerosionsmodell von Van Gent et al. (2008) und (2) das prozessbasierte numerische Modell XBeach gewählt. Letzteres bildet die physikalischen Prozesse der Dünenerosion detaillierter ab, erfordert indes einen größeren Rechenaufwand. Der Berechnungsansatz von Van Gent et al. (2008) hingegen ist analytisch lösbar.

Nach der Wahl der Dünenerosionsmodelle wurden die notwendigen Eingangsdaten generiert. Hierzu wurde ein Initialprofil einer Hochwasserschutzdüne, wie es nach dem Regelwerk Küstenschutz des Landes Mecklenburg-Vorpommern (StALU MM 2009) anzuwenden ist, abgeleitet. Als Grundlage für die probabilistische Betrachtung des Versagens wurden den Eingangsdaten entsprechende bi- bzw. multivariate Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet. Für das semi-empirische Modell Van Gent et al. (2008) wurden die Belastungsgrößen Wellenhöhe und Wasserstand mit einer gemeinsamen Eintrittswahrscheinlichkeit versehen. Für die Berechnungen mit dem numerischen Modell XBeach wurden neben den bivariaten Eintrittswahrscheinlichkeiten des Seegangs auch die bivariaten Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserstand und Fülle als Sturmflutwasserstandsganglinie berücksichtigt.

Auf Grundlage der gewählten Dünenerosionsmodelle und der abgeleiteten Eingangsdaten wurden die Versagenswahrscheinlichkeiten des Bauwerktyps Hochwasserschutzdüne für Sturmereignisse mit unterschiedlichen Wiederkehrintervallen analysiert und Versagensfunktionen in Abhängigkeit eines Bauwerksparameters sowie Versagenseinwirkungsfunktionen in Abhängigkeit einer hydrodynamischen Belastungsgröße abgeleitet.

Da die Ermittlung der Versagensfunktionen und der Versagenseinwirkungsfunktionen eine Vielzahl von Berechnungen notwendig macht, wurden Programmroutinen erstellt, welche die Zusammenstellung der notwendigen Eingangsdaten, die Berechnung der eigentlichen Dünenerosionsmodelle sowie die Auswertung der Ergebnisse automatisieren.

Die Versagenseinwirkungsfunktionen wurden auf Grundlage der beschriebenen Dünenerosionsmodelle abgeleitet. Es fällt auf, dass der Bereich der versagensrelevanten Wasserstände verschoben ist. Mit dem Dünenerosionsmodell von Van Gent et al. (2008) ergibt sich ein sehr schmaler Wasserstandsbereich, der zu einem Versagen des beispielhaft betrachteten Bauwerks führt. Unter Anwendung des numerischen Modells XBeach

ist dieser Bereich breiter. Der Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse liegt in der unterschiedlichen Abbildung der physikalischen Prozesse in den jeweiligen Modellen. Das Dünenerosionsmodell von Van Gent et al. (2008) ist ein empirisches Modell, in das die Wellenhöhen, Wellenperiode und Fallgeschwindigkeit des Sediments direkt in die Berechnungsgleichungen eingehen. Der Sturmflutwasserstand wird über die Lage des Dünenfußes im Erosionsfall im Modell berücksichtigt. Die Dauer des Sturmereignisses bleibt unberücksichtigt.

Die physikalischen Prozesse werden in dem numerischen Modell detaillierter aufgelöst. Neben den genannten Parametern gehen hier auch der Wasserstand und die Dauer des Sturmereignisses direkt in die Berechnung ein. Der Wasserstand wird in Form einer Zeitreihe berücksichtigt, über die auch die Dauer des Sturmereignisses gesteuert werden kann.

Aufgrund der detaillierteren Abbildung der physikalischen Prozesse während des Dünenerosionsprozesses in dem numerischen Modell sollte dieses für die Berechnung der Versagenseinwirkungsfunktionen herangezogen werden.

In Anbetracht der vergleichsweise langen Rechenzeit des numerischen Modells XBeach musste im Vorhaben leider auf eine Ableitung der Versagensfunktionen mit diesem Modell verzichtet werden.

11 Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben (HoRisk) wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03KIS079 gefördert und vom KFKI unterstützt.

12 Schriftenverzeichnis

- Allsop, W.; Kortenhaus, A.; Morris, M.: Failure mechanisms for flood defence structures, FloodSite Report Nr. T04-06-01, 2007.
www.floodsite.net/html/publications2.asp?ALLdocs=on&Submit=View.
- Bachmann, D.: Beitrag zur Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Bewertung und Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen. Dissertation. RWTH Aachen, 2012.
- Bachmann, D.; Huber, N. P.; Schüttrumpf, H.: REISE: Multikriterielle Entscheidungsunterstützung zur Planung von Hochwasserschutzkonzepten, 2009. Stand Abrufdatum: 20.08.2010. http://www.iww.rwth-aachen.de/fileadmin/internet/iwasa/vortraege2009/IWASA2009_Bachmann.pdf.
- Bruun, P.: Coast erosion and the development of beach profiles, Beach Erosion Board, Technical Memorandum No. 44, U.S. Army Corps of Engineers, 1954.
- Edelman, T.: Dune erosion during storm conditions. In: ASCE (Hrsg.): Proceedings 11th International Conference on Coastal Engineering, New York, 719–722, doi: 10.9753/icce.v11.46, 1968.
- Edelman, T.: Dune erosion during storm conditions. In: ASCE (Hrsg.): Proceedings 13th International Conference on Coastal Engineering, New York, 1305–1312, doi: 10.9753/icce.v13.66, 1972.

- Fröhle, P.; Gruhn, A.; Salecker, D.: Abschlussbericht HoRisk B (03KIS079) Belastungen von Küstenschutzanlagen und Konsequenzen des Versagens im Bereich der Ostseeküste, 2014. Stand Abrufdatum: 20.12.2016. http://www.kfki.de/files/dokumente/0/104_2_2_36142-1-4.pdf.
- Gruhn, A.; Fröhle, P.; Salecker, D.; Schlamkow, C.: On Failure Mechanisms and Failure Probabilities of Flood Protection Dunes at the German Baltic Sea Coast – First Results of a Research Project. In: Proceedings of the 5th SCACR – International Short Conference on Applied Coastal Research, Aachen, Shaker, 482–489, ISBN: 978-8440-1132-6, 2012a.
- Gruhn, A.; Salecker, D.; Fröhle, P.; Schüttrumpf, H.; Thorenz, H.: Flood Protection Dunes – An approach for reliability assessment by means of fragility curves as part of a risk and damage analysis. In: Proceedings of the 33rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2012), Santander, Spain, 2012b.
- Gruhn, A.; Salecker, D.; Fröhle, P.; Schüttrumpf, H.; Thorenz, H.: Assessment of Hydraulic Loads and Derivation of Failure Probabilities as a Basis for the Determination of Fragility Curves for Flood Protection Dunes. In: Proceedings of the 6th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (CG Joint 2012), 2012c.
- Gruhn, A.; Salecker, D.; Fröhle, P.: Application of a Numerical Model for the Derivation of Fragility Curves for Flood Protection Dunes as Part of a Risk and Damage Analysis. In: Proceedings of the 7th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (CG JOINT 2014), 2014.
- Hanson, H.; Larson, M.; Kraus, N. C.: Calculation of beach change under interaction cross-shore and longshore processes. *Coastal Engineering*, 57, 6, 610–619, doi: 10.1016/j.coastaleng.2010.02.002, 2010.
- Kriebel, D. L.; Dean, R. G.: Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion. *Coastal Engineering*, 9, 3, 221–245, doi: 10.1016/0378-3839(85)90009-2, 1985.
- Larson, M.: SBeach: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Report 1: Empirical foundation and model development, 1989. Stand Abrufdatum: 10.06.2010. <http://chl.erdc.usace.army.mil./chl.aspx?p=s&a=PUBLICATIONS;118&g=92>.
- Loder, M.: Sedimentcharakteristik Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommern. Bachelorarbeit. Technische Universität Hamburg-Harburg, 2015.
- Newe, J.; Dette, H. H.: Bemessung der Landesküstenschutzdünen Mecklenburg-Vorpommerns, Bericht Nr. 879a, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, 2004.
- Roelvink, D.; Reniers, A.; Van Dongeren, A.; Van Thiel de Vries, J.; McCall, R.; Lescinski, J.: Modelling storm impacts on beaches, dunes, and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56, 11–12, 1133–1152, doi: 10.1016/j.coastaleng.2009.08.006, 2009.
- Roelvink, D.; Reniers, A.; Van Dongeren, A.; Van Thiel de Vries, J.; McCall, R.; Lescinski, J.: XBeach Manual, 2015. Stand: 22.12.2016. http://xbeach.readthedocs.io/en/latest/user_manual.html.
- Salecker, D.; Gruhn, A.; Schlamkow, C.; Fröhle, P.: Statistical Analysis of Hydrodynamic Impacts for Risk Assessment in Coastal Areas. *Journal of Coastal Research*, SI 64

- (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium, 1906–1910, Szczecin, Poland, ISSN: 0749-0208, 2011.
- Salecker, D.; Gruhn, A.; Schlamkow, C.; Fröhle, P.: Parameterization of Storm Surges as a Basis for Assessment of Risks of Failure for Coastal Protection Measures. In: Proceedings of the 5th SCACR – International Short Conference on Applied Coastal Research, Aachen, Shaker, ISBN: 978-3-8440-1132-6, 2012a.
- Salecker, D.; Gruhn, A.; Schlamkow, C.; Fröhle, P.: Parameterization of Storm Surge Hydrographs Using Univariate and Bivariate Statistical Models. In: Pianc Copedec VIII – Proceedings of the Eighth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, IIT, Madras, Chennai, ISBN: 978-93-80689-06-7, 2012b.
- StALU MM: Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Übersichtsheft: Grundlagen, Grundsätze, Standortbestimmungen und Ausblick. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.). Ostseedruck Rostock, Rostock, 2009.
- Steetzel, H. J.: Cross-shore transport during storm surges. Dissertation. Technische Universität Delft, 1993.
- Stegemeier, M.: Sedimentinventar Deutsche Ostseeküste. Projektarbeit. Technische Universität Hamburg-Harburg, 2015.
- Tuan, Q. T.: Seasonal breaching of coastal barriers. Dissertation. Technische Universität Delft, 2007.
- Tuan, Q. T.; Stive, M. J. F.; Verhagen, H. J.; Visser, P. J.: Process-based modeling of the overflow-induced growth of erosional channels. *Coastal Engineering*, 55, 6, 468–483, doi: 10.1016/j.coastaleng.2008.01.002, 2008.
- Türker, U.; Kabdasli, M. S.: The effect of sediment characteristics and wave height in the shape-parameter for representing equilibrium profiles. *Ocean Engineering*, 33, 2, 281–291, doi: 10.1016/j.oceaneng.2004.12.016, 2006.
- Van Gent, M. R. A.; Van Thiel de fries, J. S. M.; Coeveld, E. M.; de Vroeg, J. H.; Van de Graaff, J.: Large-scale dune erosion tests to study the influence of wave periods. *Coastal Engineering*, 55, 12, 1041–1051, doi: 10.160/j.coastaleng.2008.04.003, 2008.
- Van Rijn, L. C.: Prediction of dune erosion to storms. *Coastal Engineering*, 56, 4, 441–457, doi: 10.1016/j.coastaleng.2008.10.006, 2009.
- Vellinga, P.: Beach and dune erosion during storm surges. Dissertation. Technische Universität Delft, 1986.
- Visser, P. J.: Beach growth in sand-dikes. Dissertation. Technische Universität Delft, 1998.
- Visser, P. J.: A model for breach erosion in sand-dikes. In: Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2000). doi: 10.1061/40549(276)299, 2000.