

Stephan MAI, Hannover
Anne ELSNER, Hannover
Claus ZIMMERMANN, Hannover

Sturmflutrisiko der Insel Wangerooge

Summary

The island of Wangerooge is the most eastern of the seven East Frisian Islands located on the German North Sea coast. As for all these dune islands, a large part of the island Wangerooge is endangered from flooding due to its ground level lying below the water level during storm surges. A system of coastal defence elements, e.g. dunes and dikes, is installed for flood prevention. However in case of a failure of this defence system flooding of the island is possible. The probability of such an occurring can be calculated using the statistics of water levels and waves. The annual failure probability amounts approximately to 1 over 3000 today. It will quadruple in case of a sea-level rise of 0.55 m which is to be expected within the next 100 years. In case of an inundation of the island the assets, e.g. the household effects and the real estate, are partly damaged. For a characteristic dike breach the average loss amounts to 12 million € today. A sea-level rise of 0.55 m will increase the loss by 40 %. The flood risk, defined as the product of failure probability and flood loss, will therefore increase by a factor of 6.

Einführung

Die Insel Wangerooge als östlichste der der niedersächsischen Festlandsküste vorgelagerten ostfriesischen Inseln (weitere sind: Borkum, Juist, Norderney, Baltrum, Langeoog, Spiekeroog und Wangerooge) weist in weiten Teilen eine Höhenlage unterhalb des möglichen Scheitelwasserstands von Sturmfluten auf. Daraus resultiert eine erhebliche Überflutungsgefährdung, welche insbesondere die bebauten Inselnflächen betrifft. Zum Schutz vor Überflutung wird daher ein umfangreiches System von Küstenschutzelementen (ZIMMERMANN u. MAI 1998; KORTENHAUS u. OUMERACI 2000) unterhalten. Neben natürlichen Schutzelementen, wie Strand und Dünen, welche vornehmlich den Schutz der Inselnordseiten sicherstellen, kommen an den Inselnordseiten auch künstliche Schutzeinrichtungen (VON LIEBERMAN u. MAI 1999), wie Deiche und Lahnungen, zum Einsatz.

Trotz der vorhandenen Küstenschutzmaßnahmen verbleibt jedoch ein Restrisiko der Überflutung. Eine Quantifizierung dieses Restrisikos und seiner bei einem Wasserspiegelanstieg zu erwartenden Erhöhung ist mit Hilfe der probabilistischen Risikoanalyse (MAI 2004) möglich. Im Folgenden wird das mathematische Konzept der Risikoanalyse dargestellt und exemplarisch zur Bewertung der künstlichen Küstenschutzelemente von Wangerooge eingesetzt.

Mathematisches Konzept der Risikoanalyse

Das Risiko (Ri) wird im wissenschaftlich-technischen Kontext (SCHUCHARD et al. 2005) als Produkt der Versagenswahrscheinlichkeit eines Küstenschutzsystems (p_f) und des bei Versagen eintretenden Überflutungsschaden (C_f) aufgefasst:

$$R_i = p_f \cdot C_f$$

Die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit erfordert zunächst die Analyse der möglichen Versagensformen der Küstenschutzelemente. Für Deiche ist ein Versagen durch Erosion der Binnenböschung nach Wellenüberlauf, durch Erosion der Außenböschung infolge des Wellenbrechens und –auflaufs und durch innere Erosion infolge einer Durchsickerung des Deichkörpers zu unterscheiden (KORTENHAUS 2003). Bei vergangenen Deichbrüchen während der Sturmfluten in den Jahren 1954, 1962 und 1976 hat sich gezeigt, dass diese stets mit Wellenüberlauf und anschließender Erosion der Binnenböschung verbunden gewesen sind (ROELSE u. BAKKAR 1986; KRAMER et al. 1962; HEINSOHN et al. 1979; TRAEGER 1962; ZITSCHER 1978). Dieser Versagenspfad lässt sich mathematisch durch folgende Grenzzustandsgleichung für die Zuverlässigkeit (Z) als Differenz von Deichhöhe (h_D), Tidehochwasserstand (Thw) und Wellenauflauf (R_{98}) beschreiben:

$$Z = h_D - Thw - R_{98}$$

Ein Versagen des Küstenschutzelementes Deich liegt bei negativen Werten der Zuverlässigkeit, d.h. $Z < 0$, vor. Der Tidehochwasserstand und der Wellenauflauf sind als natürliche Variable statistisch verteilt. Ihre statistische Verteilung wird durch die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte $p_{Thw, R_{98}}(Thw, R_{98})$ mit

$$p_{Thw, R_{98}}(Thw, R_{98}) \geq 0$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} p_{Thw, R_{98}}(Thw, R_{98}) dR_{98} dThw = 1$$

beschrieben.

Die Versagenswahrscheinlichkeit von Deichen, d.h. die Wahrscheinlichkeit eines Wellenüberlaufs, folgt aus der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsdichte von Tidewasserstand und Wellenauflauf durch Integration

$$p_f = \iint_{Z < 0} p_{Thw, R_{98}}(Thw, R_{98}) dThw dR_{98}$$

Da an den deutschen Küsten direkt aus Messungen keine langjährigen gleichzeitigen Zeitreihen von Wasserstand und Wellenauflauf zur Ermittlung der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsdichte vorliegen, sind diese aus langjährigen Zeitreihen von Wasserstand und Wind zunächst durch numerische Seegangssimulation (MAI u. ZIMMERMANN 2004) zu gewinnen. Für die deutsche Nordseeküste werden entsprechende Simulationen zur Zeit durchgeführt (NIEMEYER 2005).

Der bei Deichversagen zu erwartende Überflutungsschaden ist abhängig von der im Überflutungsgebiet vorhandenen räumlichen Verteilung des nach Vermögensarten kategorisierten Wertbestands ($W_i(x,y)$) und dem Grad seiner Schädigung ($\phi_i(x,y)$) infolge Überflutung (MAI et al. 2004). Es gilt

$$C = \sum_i \iint_A W_i(x, y) \cdot \phi_i(x, y) \, dx \, dy$$

Der Schädigungsgrad ist seinerseits abhängig von der Wassertiefe ($d(x,y)$) und Dauer der Überflutung ($t(x,y)$). Es gilt

$$\phi_i(x, y) = f_i(d(x, y), t(x, y))$$

Bei der Parametrisierung bleibt häufig die Überflutungsdauer unberücksichtigt (MAI 2004). Eine Abschätzung von Überflutungswassertiefe und –dauer ist mit Hilfe numerischer Simulation möglich (MEYER u. MAI 2004).

Versagenswahrscheinlichkeit

Der auf der Südseite der Insel Wangerooge angeordnete Deich weist eine Höhe von NN + 5,80 m im Westen bis NN + 6,16 m im Osten bei Deichneigungen von 1:10 bis 1:6 auf. Abbildung 1 gibt eine Übersicht über den Verlauf des an das Rückseitenwatt angrenzenden Deichs. Deichhöhe und Deichneigung sind in Tab. 1 zusammengefasst.

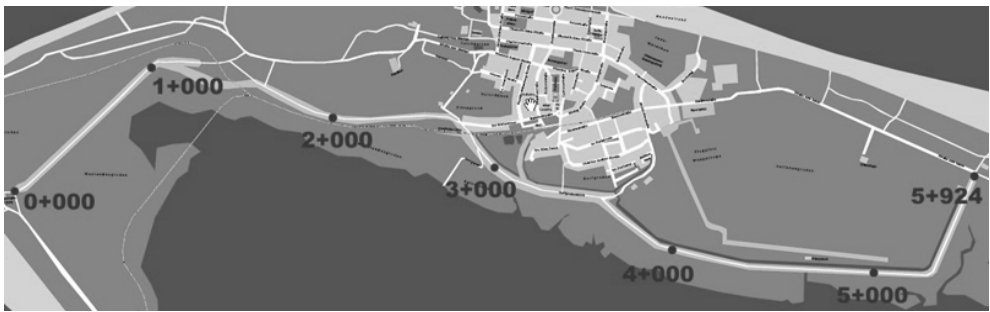


Abb. 1: Deich auf der Insel Wangerooge – Lage und Stationierung

Tabelle 1: Deichhöhe und Deichneigung des Wangerooger Deichs

Deichname	Station	Deichhöhe [mNN]	Neigung
Westgrodenendeich	0–1090	5,80	1:7
Süddeich	1090–2800	5,80-5,97	1:7–1:10
Dorfgrodenendeich	2800–3760	5,97	1:6
Ostgrodenendeich	3760-5920	5,97–6,16	1:6

Da der Deich mit Vorlandbreiten von 150 m bis 950 m nicht scharf liegend ist, erfolgt seine wesentliche Beanspruchung bei Sturmfluten. Trotz der Lage im Lee des von der Nordsee anlaufenden Seegangs ist dennoch, insbesondere bei West- und Südweststürmen, mit einer erheblichen Seegangbelastung des Deiches zu rechnen. Abb. 2 gibt eine detaillierte Darstellung der Seegangsverhältnisse im Nahbereich der Insel Wangerooge. Für den dargestellten Wasserstand von NN + 5,1 m – dies ist der derzeit gültige Bemessungswasserstand - mit Westwinden einer Geschwindigkeit von 30 m/s – dies ist der derzeit gültige Bemessungswind - ist am Deich eine signifikante Wellenhöhe von 0,15 m bis 0,95 m und eine mittlere Wellenperiode von 1,4 s bis 3,7 s zu erwarten. Abb. 3 zeigt die Wellenhöhe und –peri-

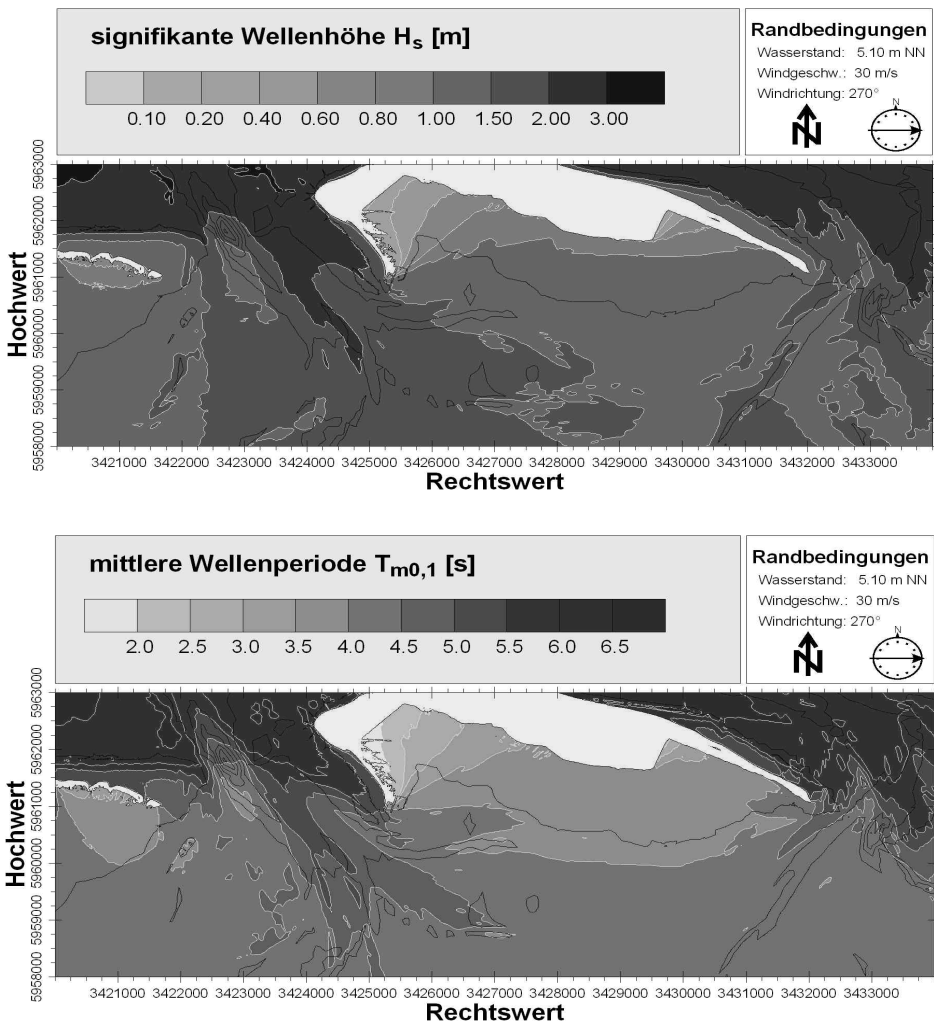


Abb. 2: Seegangsbedingungen im Nahbereich der Insel Wangerooge bei Orkan aus West – signifikante Wellenhöhe (oben) und mittlere Wellenperiode (unten)

ode entlang der in Abb. 1 dargestellten Deichstrecke im Überblick. Zur Ermittlung der Seegangsbedingungen ist das phasengemittelte Seegangmodell SWAN (BOOIJ et al. 1999) eingesetzt worden (MAI u. DAEMRICH 2005). Neben der in Abb. 3 und 4 dargestellten Wasserstands- und Windsituation sind Seegangsberechnungen auch für Wasserstände von NN + 3 m bis NN + 6 m mit Windgeschwindigkeiten bis zu 32 m/s für sämtliche Windrichtungen durchgeführt worden. Insgesamt sind 1344 Kombinationen von Randbedingungen untersucht worden. Um eine wahrscheinlichkeitstheoretische Auswertung der Ergebnisse zur Ableitung der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsdichte von Wasserstand und Wellenauflauf zu ermöglichen, ist den verschiedenen Randbedingungskombinationen ihre Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet worden.

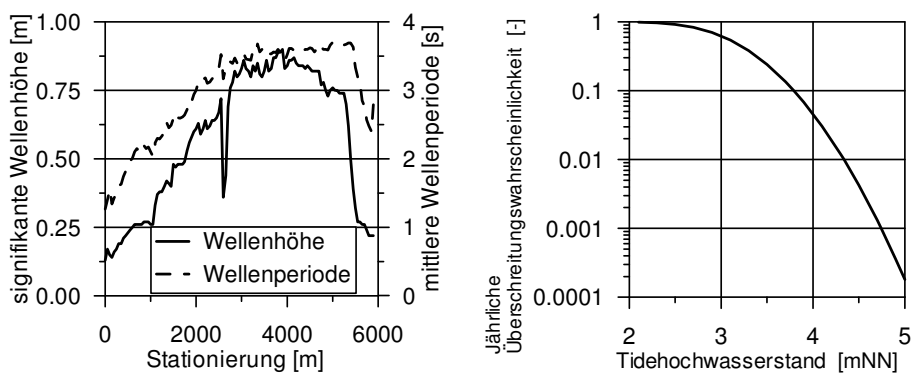


Abb. 3: Signifikante Wellenhöhe und mittlere Wellenperiode vor dem Wangerooger Rückseitendeich (links) und Statistik des Tidehochwasserstands am Pegel Wangerooge West (rechts)

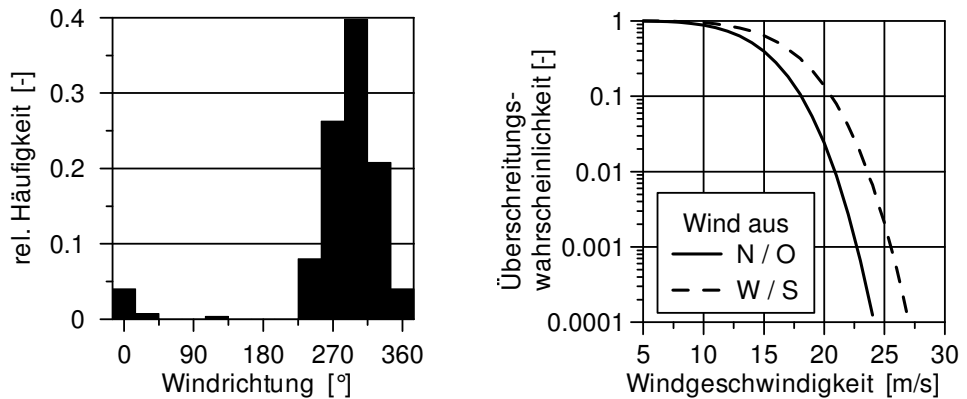


Abb. 4: Windstatistik während Sturmfluten – Wahrscheinlichkeit der Windrichtung (links) und Überschreitungswahrscheinlichkeit der Windgeschwindigkeit (rechts)

Diese Zuordnung ist auf der Grundlage eines 50-jährigen Datensatzes zeitgleicher Messungen des Tidehochwasserstands und der Windgeschwindigkeit erfolgt (MAI et al. 2003). Eine Extrapolation der Statistik zu sehr kleinen (geringer als 1/50) jährlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten ist unter Annahme einer Log-Pearson 3-Verteilung für die Wasserstandsstatistik und einer Weibull-Verteilung für den Wind erfolgt. Die extrapolierte Wasserstandsstatistik ist in Abb. 3, die Windstatistik in Abb. 4 notiert. Aus der Eintrittswahrscheinlichkeit von Wasserstand und Wind sowie den Ergebnissen der Seegangssimulation mit nachgeschalteter Berechnung des Wellenaufbaus (MAI et al. 2005) folgt entlang der Deichlinie Wangeroo- ges die zur Berechnung der Überlaufwahrscheinlichkeit nötige gemeinsame Wahr- scheinlichkeitsdichte von Wasserstand und Wellenaufbau.

Für Wangeroo-ge beträgt die jährliche Überlaufwahrscheinlichkeit am Deich maximal 1:2900. Insgesamt weist der Deich jedoch stark variierende Überlauf- wahrscheinlichkeiten auf, wie Tab. 2 zeigt. Diese sind im Wesentlichen auf die in Tab. 1 wiedergegebenen Unterschiede in der Deichhöhe zurückzuführen.

Tab. 2: Jährliche Wahrscheinlichkeit eines Wellenüberlaufs für verschiedene Stationen entlang des Rückseitendeichs.

Station	1000	2000	3000	4000	5000
Wahrscheinlichkeit pro anno	1/2900	1/4400	1/15300	1/15700	1/5600

Erhebung von Vermögenswerten

Das hohe Sicherheitsniveau der Deiche bzw. des Küstenschutzsystems im Allgemeinen hat eine dauerhafte Besiedlung der Insel Wangeroo-ge erst ermöglicht. Es hat jedoch auch dazu geführt, dass die Vermögenswerte auf der Insel stark gestiegen sind, so dass heute das Versagen des Küstenschutzsystems zu hohen finanziellen Schäden führen kann.

Um die Höhe eines solchen Schadens für eine Region abschätzen zu können, muss der Bestand an Vermögenswerten, d.h. das Schadenpotential, ermittelt werden. Da eine kleinräumige Erhebung von einzelnen Wertobjekten (z.B. Gebäude, PKW) in der Regel zu zeitaufwändig (BLUM u. THORENZ 2005) und damit – be- sonders für weitläufigere Gebiete – nur schwer realisierbar ist, bietet sich eine mesoskalige Methode der Werteermittlung an (MEYER 2005). Bei dieser Methode werden einzelne Wertkategorien über sekundärstatistische Quellen auf Gemeinde- ebene erhoben.

Für die Insel Wangeroo-ge ergibt sich dabei für verschiedene Wertkategorien folgendes Vermögen: Wohnkapital 42,6 Mio. Euro, Hausrat 23,6 Mio. Euro, Kfz 2,7 Mio. Euro, Nettoanlagenvermögen 61,7 Mio. Euro und Vorratsvermögen 2,2 Mio. Euro.

Mit diesen Werten der einzelnen Vermögenswertkategorien lässt sich jedoch noch keine Aussage über deren räumliche Verteilung machen. Daher werden die ermittelten Vermögenswerte in einem zweiten Schritt mit den digitalen Flächennut- zungsdaten des Digitalen Landschaftsmodells des Amtlichen Topographisch-Kar- tographischen Informationssystems (ATKIS-Basis-DLM) verschnitten (Abb. 5).

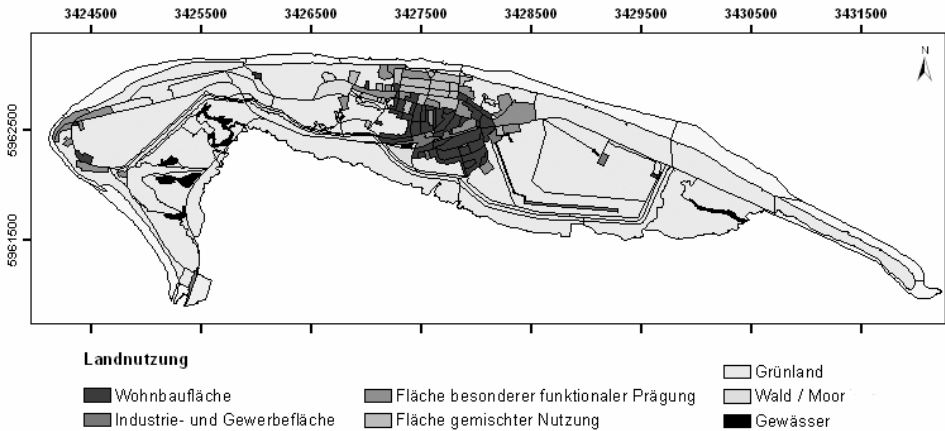


Abb. 5: Landnutzung auf Wangerooge (nach ATKIS-Basis-DLM).

Bei dieser Verschneidung werden zum Beispiel die Wertkategorien Hausrat und Wohnkapital mit den ATKIS-Landnutzungsflächen „Wohnbauflächen“ und „Flächen gemischter Nutzung“ verortet, während das Anlagenvermögen den „Industrie- und Gewerbeflächen“ zugeordnet wird. Abb. 6 zeigt die räumliche Verteilung der Vermögenswerte auf der Insel Wangerooge. Zu erkennen ist, dass im Kernbereich der Insel Flächen, die nur als Wohnbaufläche genutzt werden, Vermögenswerte zwischen 100 und 200 Euro pro m² aufweisen, während in Bereichen mit gemischter Nutzung, d.h. der gemeinsamen Nutzung als Wohnbau- und Gewerbefläche, die Vermögenswerte zwischen 200 und 300 Euro pro m² liegen.

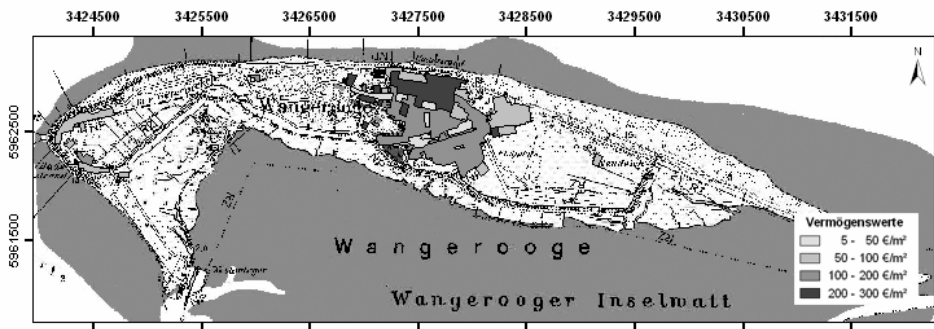


Abb. 6: Räumliche Verteilung der Vermögenswerte auf der Insel Wangerooge.

Numerische Simulation der Überflutungsflächen

Eine Abgrenzung des bei Deichbruch durch Überflutung betroffenen Vermögensbestands ist mit Hilfe zweidimensionaler numerischer Simulationen erfolgt. Die Durchführung solcher Simulationen bietet trotz des großen Rechenaufwands entscheidende Vorteile gegenüber einer einfachen statischen Verschneidung der Geländehöhen mit einem Sturmflutwasserstand, welche häufig zu einer Überschät-

zung des Überflutungsgebietes führt. Zudem lassen sich aus der Simulation nicht nur die Überflutungsausdehnung und die Wassertiefen auf den betroffenen Flächen gewinnen, sondern auch Informationen über den zeitlichen Verlauf des Überflutungsprozesses. Von Interesse sind hierbei beispielsweise die Ermittlung von Vorwarnzeiten für ein rechtzeitiges Einleiten von Hilfsmaßnahmen nach einem Deichbruch oder die Abschätzung, wie lange bestimmte Bereiche überflutet sind.

Die Basis der numerischen Überflutungssimulation ist ein Geländemodell, welches neben den Geländehöhen auch Bathymetriedaten enthält. Abb. 8 zeigt dies für Wangerooge mit einer Rasterzellenauflösung von 12,5 m. Zur Steuerung der Simulation wird am südlichen Modellrand der sich im Verlauf der Zeit ändernde Wasserstand über eine Tidekurve eingesteuert. Neben der Kenntnis über die momentane Überflutungsgefährdung eines Gebietes gewinnt - im Zuge des prognostizierten beschleunigten Meeresspiegelanstiegs - auch die Kenntnis über die zukünftig zu erwartenden Auswirkungen eines Deichbruchs an Bedeutung. Aus diesem Grund ist die Simulation zunächst zur Darstellung des heutigen Zustands mit einer bereits gewesenen Sturmflut (Status quo) und anschließend mit einer erhöhten Tidekurve (Klima-Szenario) gerechnet worden.

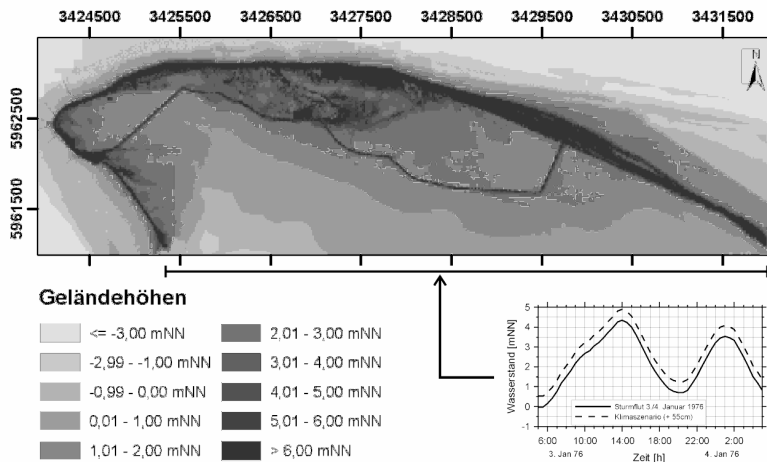


Abb. 8: Simulationsmodell mit eingesteuerter Tidekurve der Sturmflut vom 3. Januar 1976 (Pegel Wangersiel)

Für das Status quo-Szenario wurde die Tidekurve der Sturmflut vom 3. Januar 1976 mit einem Tidehochwasser von 4,34 mNN - gemessen am Pegel Wangersiel - eingebunden, für das Klima-Szenario wurde der Wert um 55 cm erhöht.

Im digitalen Geländemodell sind die den Sturmflutschutz gewährleistende Dünenkette im Norden sowie die Deichlinie im Süden deutlich von den Niederungsgebieten der Insel unterscheidbar. Im Zentralbereich der Insel findet sich eine zerklüftete Dünenlandschaft, in deren Schutz auch der Ort Wangerooge angesiedelt ist. Jedoch finden sich auch innerhalb dieser Erhöhungen Täler, in denen die Geländehöhen zwischen 2 mNN und 3 mNN - also unter einem Sturmflutscitel-

stand – liegen. Westlich und östlich des Dünenkerns schließen jeweils großflächige Niederungsgebiete mit Höhen um 2 mNN an. Während die westliche Niederung nur als Grünland genutzt wird, ist auf der östlichen der Flughafen von Wangerooge angesiedelt.

Um zu überprüfen, inwieweit die niedrig gelegenen Flächen der Ortschaft Wangerooge bei einem Deichbruch durch Überflutung gefährdet sind, wurden zwei Deichbruchszenarien gerechnet – ein Deichbruch westlich der Ortschaft und ein zweiter an einem östlichen Deichabschnitt. Damit lassen sich auch Aussagen darüber machen, ob bei einem Deichbruch im Westteil auch östliche Flächen gefährdet sind und umgekehrt. Für die Simulation wurde jeweils eine Deichbruchweite von 100 m angenommen und die Deichbruchschwelle auf die Höhe des Vorlandes des jeweiligen Deichabschnitts gesetzt, 2,1 m im Westen und 3,3 m im Osten.

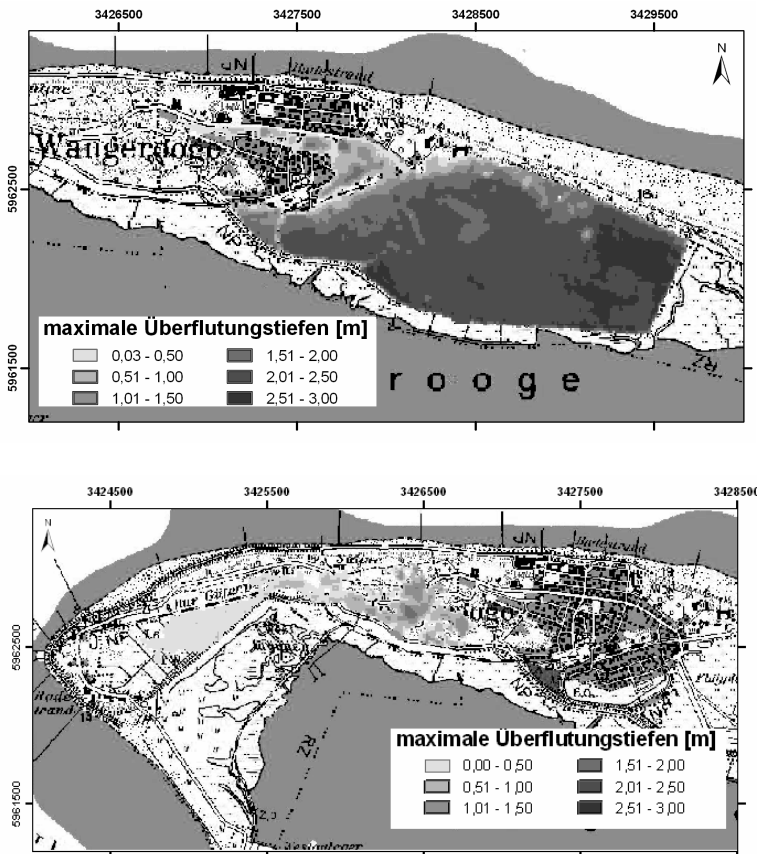


Abb. 9: Simulation einer Überflutung nach einem Deichbruch an einem östlichen Deichabschnitt (oben) bzw. an einem westlichen (unten).

Die Ergebnisse der Überflutungssimulationen der beiden Deichbruchszenarien sind in Abb. 8 dargestellt. Gezeigt ist jeweils die maximale Überflutungstiefe, die sich während des gesamten Verlaufs der Überflutung auf den Flächen ergibt.

Bei einem Bruch des Deiches entlang der östlichen Niederungsfläche wird diese vollständig mit Wasser gefüllt. Auch die niedrigen Siedlungsbereiche der Ortschaft Wangerooge werden überflutet, die Überflutung zieht sich als Band durch den Ort bis auf die westliche Seite. Insgesamt sind knapp 170 ha von der Überflutung betroffen. Dabei steht das Wasser auf den Flächen meist 2,0 m bis 2,5 m hoch (Abb. 9, rechts). Aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung der Niederung hat das Wasser keine Möglichkeiten sich weitläufig auszubreiten, so dass sich der Wasserstand auf den überfluteten Flächen an den Sturmflutwasserstand angleicht.

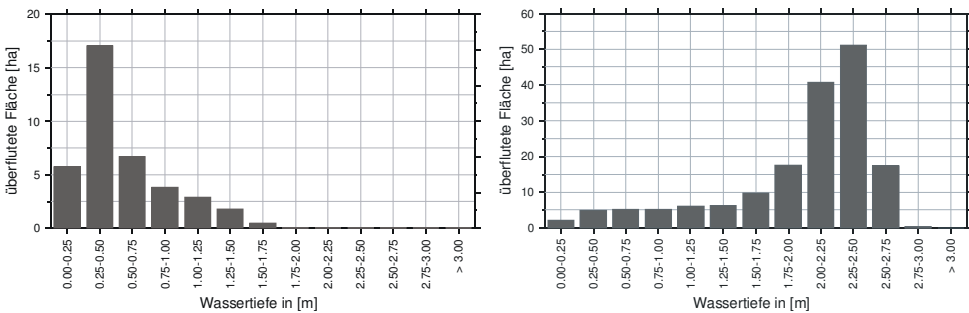


Abb. 9: Histogramme der maximalen Überflutungswassertiefen für die Simulation West (links) und Ost (rechts).

Anders sieht es bei einem Deichbruch westlich der Ortschaft aus. Der Deichbruch wurde hier in einem Bereich gewählt, wo das Gelände zwischen Höhen von 2,5 m und 4 m variiert. Westlich angrenzend befindet sich das Niederungsgebiet. Aufgrund der höheren Geländehöhe ist die Zeitdauer der Überflutung während des Tideverlaufs geringer, so dass insgesamt weniger Wasser ins Hinterland fließt. Die Ausbreitung des Wassers erfolgt zunächst in die Mulden in direkter Umgebung des Deichbruchs und weiter in westlicher Richtung zum Niederungsgebiet. Dabei werden ca. 40 ha überflutet. Die östlich gelegene Ortschaft Wangerooge ist in diesem Szenario nicht von der Überflutung betroffen (Abb. 8, unten). Bei der Überflutung fallen die Wassertiefen deutlich niedrigerer aus als bei einem Deichbruch im Ostteil (Abb. 9).

Berechnung des Überflutungsschadens

Die sich bei der Überflutungssimulationen ergebenden maximalen Überflutungswassertiefen bestimmen den Grad der Schädigung des Vermögensbestands und sind damit für die Berechnung des Überflutungsschadens essentiell. Die Berechnung des Schädigungsgrades ist hier differenziert nach einzelnen Vermögenswertkategorien mit Hilfe von so genannten Schadensfunktionen erfolgt. Für jede Fläche

müssen die Schädigungsgrade für die verschiedenen flächenrelevanten Vermögenswertkategorien separat berechnet werden. Abb. 10 zeigt die für die folgenden automatisierten Schadensberechnungen verwendeten Schadenfunktionen.

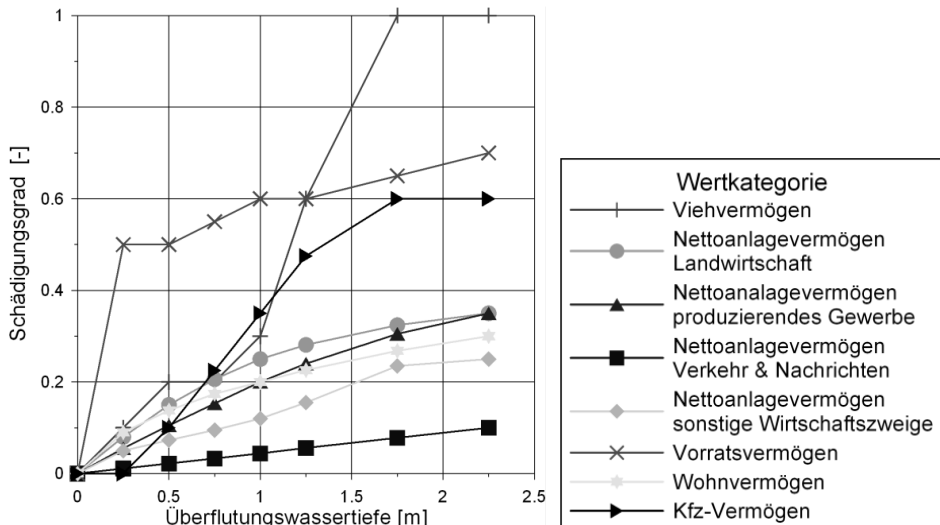


Abb. 10: Schadensfunktionen für verschiedene Vermögenswertkategorien (nach KLAUS u. SCHMIDTKE 1990).

Im Rahmen der automatisierten Schadenberechnung werden zunächst den überfluteten Flächen ihre Nutzungstypen zugeordnet. In einem zweiten Schritt wird unter Berücksichtigung der maximalen Überflutungswassertiefen auf diesen Flächen jeder Nutzungstyp detailliert analysiert. Hierzu findet eine Zuordnung der für den zu untersuchenden Nutzungstyp relevanten Vermögenswertkategorien statt, um für diese den jeweiligen Schädigungsgrad zu ermitteln. So werden dem Nutzungstyp Wohnbauflächen die Vermögenswertkategorien Hausrat, Wohnkapital und Kfz zugeordnet und für jede der drei Kategorien der Schädigungsgrad separat berechnet.

Durch Multiplikation des Vermögenswertes der einzelnen Kategorien mit dem jeweiligen Schädigungsgrad ergibt sich der Schaden für eine Wertkategorie. Der Schaden eines Nutzungstyps berechnet sich damit aus der Aufsummierung aller relevanten Schäden der Wertkategorien. Sind alle Nutzungstypen auf diese Weise detailliert analysiert, ergibt sich der Gesamtschaden aus der Aufsummierung der berechneten Einzelschäden der Nutzungstypen.

Zur Durchführung dieser detaillierten Schadensberechnungen bieten sich Geographische Informationssysteme an, mit deren Hilfe räumliche Informationen miteinander verschnitten und analysiert werden können. Um die komplexe Analyse durchzuführen, wurde in der GIS-Umgebung von ArcView das Tool „Loss Calculator“ entwickelt (ELSNER et al. 2003) und angewendet. Der Schaden wird dabei detailliert nach Nutzungstyp und Wertkategorie berechnet und tabellarisch festgehalten.

So ergibt die Schadensanalyse des östlichen Deichbruchs, dass ca. 24 ha Wohnbauflächen von der Überflutung betroffen sind und mit einem Schaden von ca. 8,7 Mio. Euro - berechnet aus den Vermögenswertkategorien Wohnkapital (5,2 Mio. Euro), Hausrat (2,9 Mio. Euro) und Kfz (0,6 Mio. Euro) - zu rechnen ist.

Ein Vergleich der Deichbruchszenarien zeigt, dass die Schadensanalysen sehr unterschiedliche ausfallen. Bei einem Deichbruch westlich der Ortschaft Wangerooe ist im Wesentlichen nur 40 ha Grünland von der Überflutung betroffen, der berechnete Schaden liegt mit 6.000 Euro sehr niedrig. Der geringe zu erwartende Schaden sowie die geringe Versagenswahrscheinlichkeit von $1/4.380$ führen zu einem sehr niedrigen Risiko für den Ist-Zustand.

Bei einem Deichbruch im östlichen Niederungsgebiet fällt der Schaden mit 12 Mio. Euro schon heute deutlich höher aus. Dies liegt vor allem daran, dass hier der Flughafenbereich sowie Wohnbauflächen in der Ortschaft von der Überflutung betroffen sind. Aufgrund der sehr geringen Versagenswahrscheinlichkeiten von $1/15.720$ ergibt sich aber auch hier mit 760 Euro pro Jahr nur ein geringes Risiko.

Konsequenzen des Klimawandels

Das derzeit geringe Sturmflutrisiko der Insel Wangerooe wird sich jedoch infolge des mit der Klimaveränderung erwarteten Wasserstandsanstiegs erheblich erhöhen. Die Zunahme des Risikos geht dabei einerseits auf eine Zunahme der Wahrscheinlichkeit des Deichversagens und andererseits auf einen Anstiege des zu erwartenden Überflutungsschadens zurück.

Die Zunahme der Versagenswahrscheinlichkeit des Deiches mit einem Ansteigen des Wasserspiegels ist in Abb. 11 verdeutlicht.

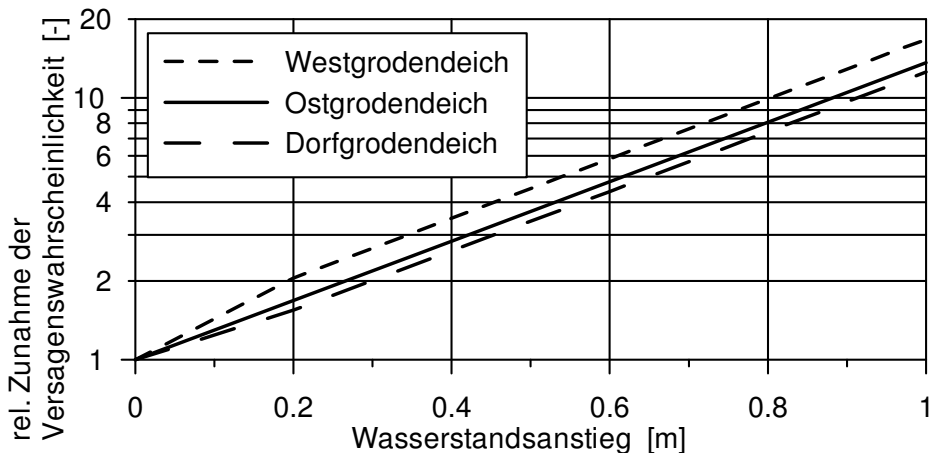


Abb. 11: Zunahme der Überlaufwahrscheinlichkeit am Hauptdeich als Folge eines Wasserstandsanstiegs.

Demnach wird ein Wasserstandsanstieg von 55 cm, welcher nach Schirmer u. Schuchardt (2005) bis zum Jahr 2050 erwartet wird, im Mittel zu einer Verfünffachung der Versagenswahrscheinlichkeit führen. Die Wahrscheinlichkeit eines Deichversagens betrage demnach im Jahr 2050 östlich der Ortschaft Wangerooge (vgl. Abb. 8 oben) etwa $1/1.050$ und westlich der Ortschaft (vgl. Abb. 8 unten) $1/3.860$.

Die mit dem Anstieg des Meeresspiegels von 0,55 m zu erwartende Zunahme des Überflutungsschadens bei Deichbruch weist im Vergleich zur Versagenswahrscheinlichkeit eine erheblich größere räumliche Variabilität auf. So ergibt sich für einen Deichbruch westlich der Ortschaft Wangerooge dann ein um den Faktor von 83 erhöhter Schaden von 0,5 Mio. Euro und östlich der Ortschaft ein um den Faktor von 1,4 erhöhter Schaden von 16,8 Mio. Euro.

Für das Sturmflutrisiko ergibt sich damit für das Jahr 2050 ein Wert von 470 Euro pro Jahr (westlich der Ortschaft Wangerooge) und ein Wert von 4400 Euro pro Jahr (östlich).

Schlussfolgerung

Durch die exemplarische Anwendung der probabilistischen Risikoanalyse auf die Insel Wangerooge ist der Nachweis der Eignung dieser Methodik zur Beurteilung des Sturmflutrisikos von teilweise deichgeschützten Inseln erbracht worden. Für die Insel Wangerooge besteht demnach zur Zeit ein geringes Sturmflutrisiko. Ein durch Klimawandel bedingter Wasserstandsanstieg führt jedoch zu einer erheblichen Erhöhung des Sturmflutrisikos. So ist für Wangerooge im Falle eines Wasserstandsanstiegs um 0,55 m mit einem mehr als versechsfachten Sturmflutrisiko zu rechnen.

Literatur

- BLUM, N. u. THORENZ, F. 2005: Risk Assessment for the Island of Langeoog - COMRISK Subproject 9. In: Die Küste, 70, S. 117-132.
- BOOIJ, N., R.C. RIS u. L.H. HOLTHUIJSEN 1999: A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions, 1. Model Description and Validation. In: Journal of Geophysical Research, 104, S. 7649-7666.
- ELSNER, A., S. MAI, V. MEYER u. C. ZIMMERMANN 2003: Integration of the Flood Risk in Coastal Hinterland Management. In: Proceedings of the International Conference CoastGis, Genua, Italy, CD-ROM.
- Heinsohn, G., J. Kramer, G. Krause 1979: Erfahrungen und Folgerungen aus den Januar-Sturmfluten 1976 für den Küstenschutz in Niedersachsen. In die Küste H. 33, S. 1-70.
- KLAUS, J. u. R.-F. SCHMIDTKE 1990: Bewertungsgutachten für Deichbauvorhaben an der Festlandsküste - Modellgebiet Wesermarsch. Untersuchungsbericht. Erstellt im Auftrag des Bundesministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Bonn: Referat Öffentlichkeitsarbeit u. Besucherdienst, BM für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
- KORTENHAUS, A. 2003: Probabilistische Methoden für Nordseedeiche. Vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Braunschweig genehmigte Dissertation, Braunschweig.
- Kramer, J., R. Liese, K. Lüders 1962: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im niedersächsischen Küstengebiet. In: Die Küste, J.g 10, H. 1, S. 17-54.
- MAI, S. 2004: Klimafolgenanalyse und Risiko einer Küstenzone am Beispiel der Jade-Weser-Region. In: Mitteilungen des Franzius-Instituts, 90, S. 1-291.

- MAI, S. u. K.-F. DAEMRICH 2005: Seegangsberechnungen zur Ermittlung der Höhen der Inseldeiche Juist und Wangerooge. In: Forschungszentrum Küste (Hrsg.): Tagungsband zum 5. FZK-Kolloquium "Seegang, Küstenschutz und Offshorebauwerke". Hannover, S. 57-63.
- MAI, S., K.-F. DAEMRICH u. C. ZIMMERMANN 2003: Wahrscheinlichkeit des Wellenüberlaufs an der Kaje eines geplanten Containerterminals. In: Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 89, S. 84-104.
- MAI, S. u. C. ZIMMERMANN 2004: Veränderung der Seegangsbedingungen an den Küsten von Jade und Weser als Folge der Klimaänderung. In: Coastal Reports, H. 1, S. 93-100.
- MAI, S., ELSNER, A., MEYER, V. u. ZIMMERMANN, C. 2004: Änderung des Sturmflutrisikos der niedersächsischen Küste bei Klimawandel. In: Tagungsband zur Konferenz "Klimaänderung und Küstenschutz", S. 281-290, Hamburg.
- MEYER, V. 2005: Methoden der Sturmflut-Schadenspotenzialanalyse an der deutschen Nordseeküste. Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften und Geographie der Universität Hannover, Hannover.
- MEYER, V. u. S. MAI 2004: Überflutungsschäden im Küstenhinterland nach Deichbruch. In: Wasserwirtschaft, Nr. 11, S. 23-28.
- NIEMEYER, H. D. 2005: Modellierung des mittelfristigen Seegangsklimas im deutschen Nordseeküstengebiet (MOSES). Zwischenbericht zum BMBF-Projekt 03 KIS 041, S. 1-9.
- PEERBOLTE, E.B. 1993: Sea-Level Rise and Safety – A Consideration of Safety Impacts in Low-Lying Coastal Areas with Particular Reference to the Netherlands. Twente: Unversiteit Twente, Netherlands.
- PLATE, E.J. 1995: Risk Management of Coastal Structures. In: Brasilian Water Resources Association (ABRH) (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Conference On Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC IV). Rio de Janeiro, Brazil.
- ROELSE, P. u. W.T. BAKKAR 1986: Statistical Investigations on Dike Failure. In: American Society of Civil Engineers (ASCE) (Hrsg.): Proceedings of the 20th International Conference On Coastal Engineering, Vol. 3, Taipei, Taiwan, S. 2173-2187.
- SCHIRMER, M. u. B. SCHUCHARDT 2005: Klimawandel und preventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste (KRIM) – Integrative Analyse und Decision Support System. Endbericht des BMBF-Forschungsprojektes (01 LD 0010). Bremen.
- SCHUCHARD, B., SCHIRMER, M., BAKKENIST, S., EPPPEL, D.-P., ELSNER, A., ELSNER, W., GRABEMANN, I., GRABEMANN, H.-J., HAARMANN, M., HAHN, B., HEINRICHS, H., KRAFT, D., KNOGGE, T., LANGE, H., MAI, S., MEYER, V., OTTE, C., PETERS, H.-P., WIESNER-STEINER, A., WITTIG, S., YU, I., ZIMMERMANN, C. 2005: KRIM Climate Change, Coastal Protection and Risk Management in North-West Germany. In: Proc. of the Final Symposium on DEKLIM, Leipzig, S. 133-142.
- TRAEGER, G. 1962: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im Lande Bremen. In: Die Küste, Jg. 10, H. 1, S. 93-112.
- V. LIEBERMAN, N. u. S. MAI 1999: Küstenschutz an der Unterweser vor dem Hintergrund von Naturraum und Nutzung. In: Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, 35, S. 109-127.
- ZIMMERMANN, C. u. S. MAI 1998: Analyse von Küstenschutzsystemen unter Risikoaspekten. In: HANSA. International Maritime Journal, 6, S. 67-70.
- ZITSCHER, F.-F. 1978: Schadenursachen an Küstenschutzanlagen herkömmlicher Art während der Sturmflut vom 3.1.1976 an der schleswig-holsteinischen Westküste. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 47, S. 180-195.