

Thorsten ALBERS, Hamburg
Nicole VON LIEBERMAN, Hamburg

Risikoabschätzung für die Küstenstadt Emden

Summary

On the basis of risk analyses coastal protection systems can be designed or existing coastal defences for a certain area can be assessed. In the process the use of the hinterland, the occurrence probability of various loads and the impacts of a failure are taken into consideration.

The statistical analysis of water level records and wind records permits the calculation of recurrence intervals of different loads. With a suitable delimitation criterion the failure probability of an element of the coastal defence system can be set. In combination with the damage in the hinterland in case of failure the risk of an area can be assessed. For this purpose, a detailed calculation of the damage potential is as important as an accurate assessment of the inundation area in case of failure.

The aim of this article is to assess the risk of the coastal city Emden in case of failure of an element of the coastal protection system and therefore to judge the existing coastal defences. It is focused on the assessment of the existing values in the investigation area. Further the effects of a potential increase of the tidal high water level as a result of the climate change are surveyed and possible consequences for the concerning area are described.

1 Einleitung

Die Intensität und Häufigkeit von Angriffen des Meeres auf die Küste steigen langsam aber stetig an, wobei anthropogene Einflüsse den Prozess beschleunigen. Mit einer zunehmenden Konzentration von monetären Werten in den Küstenniederungen steigt auch das Risiko während einer Sturmflut. Dies hat zur Folge, dass der vorhandene Küstenschutz kontinuierlich überprüft und gegebenenfalls verbessert werden muss.

Aus ästhetischen, ökologischen, aber in der heutigen Zeit vielmehr finanziellen Gründen, kann eine absolute Deichsicherheit nicht gewährleistet werden. Der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN 2006) untersuchte und vermaß im Laufe des Jahres 2006 die mehr als 600 km Deichlinie des Landes. Die Untersuchung ergab, dass rund 125 km Deiche erhöht und verstärkt werden müssen. Die Umsetzung dieser Aufgaben, die im

„Generalplan Küstenschutz, Niedersachsen-Bremen“ festgehalten sind, der Ende 2006 auszugsweise veröffentlicht wurde, wird über eine halbe Milliarde Euro kosten. Eine Anpassung der Deichlinie entlang der gesamte Deutschen Nordseeküste an den zu erwartenden Meeresspiegelanstieg, würde die finanziellen Mittel von Bund und Ländern deutlich übersteigen. Küstenschutz wird zum Entscheidungsproblem. Es wird ein Rahmenplan benötigt, der die verschiedenen Aspekte und Interessen behandelt und eine Entscheidungshilfe darstellt. Probabilistische Risikoanalysen sind die Methoden, wie sie für einen solchen Rahmenplan gebraucht werden.

Eine quantitative Risikoanalyse eröffnet die Möglichkeit, die Strategie für die Bemessung, die periodische Überwachung, die Unterhaltung und die Katastrophenbewältigung (z.B. im Falle eines Deichversagens) zu optimieren (KORTENHAUS u. OUMERACI 2000). Probabilistische Bemessungsverfahren, die nicht nur auf Deiche, sondern auf alle Elemente eines Küstenschutzsystems anzuwenden sind, bilden hierfür die Grundlage.

Eine Umsetzung des Risikomanagements im Küstenschutz findet bisher lediglich im „Generalplan Küstenschutz – Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein“ (MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE RÄUME et al. 2001) Verankerung. Dabei dient das Risikomanagement nicht dazu, unterschiedliche Sicherheitsstandards für durch Landesschutzdeiche geschützte Gebiete festzulegen. Mit dem eingeführten Risikomanagement wird es jedoch möglich, die Gebiete mit den höchsten Risiken nachvollziehbar zu ermitteln, in Prioritätenlisten aufzunehmen und die Effektivität verschiedener Küstenschutzmaßnahmen (Varianten) zu vergleichen.

Trotz umfangreicher Forschungsarbeiten ist es bisher nicht möglich, die Versagenswahrscheinlichkeit von Küstenschutzanlagen bzw. deren Wehrfähigkeit wissenschaftlich abgesichert zu ermitteln. Die statistisch abgesicherte Berechnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten von Sturmhochwassern und die daraus folgende Ableitung eines Sicherheitsstandards ist für die Nordseeküste möglich, wodurch eine Wehrfähigkeit der Deiche gegenüber definierten Ereignissen gewährleistet ist. Bei höher eintretenden Sturmfluten werden die Deiche nicht sofort brechen, sondern erst bei Ereignissen mit deutlich geringerer Eintrittswahrscheinlichkeit. Diese Versagenswahrscheinlichkeit ist zudem abhängig von den Materialeigenschaften und dem Instandhaltungszustand. Neue Forschungsergebnisse müssen durch ein dynamisches Risikomanagement in die Küstenschutzplanung einfließen.

2 Untersuchungsgebiet Küstenstadt Emden

Die Küstenstadt Emden liegt auf einer Fläche von etwa 112 km² in den Marschgebieten der Emsmündung im Nordwesten Niedersachsens (Abb. 1). Die im Mittelalter angelegte Warft, auf der der historische Stadtkern entstand, bildet mit einer Höhe von bis zu + 6 m NN auch heute noch die am höchsten gelegene bebaute Fläche, wobei große Gebiete des übrigen im Laufe der Jahrhunderte erschlossenen Stadtgebietes nur bis zu 1 m über Normalnull liegen. Weite Teile der Stadtfläche im Westen Emdens wurden erst im 19. und 20. Jahrhundert eingepoldert und besitzen eine dementsprechend höhere Lage mit bis 4 m über NN unmittelbar am Emsdeich.

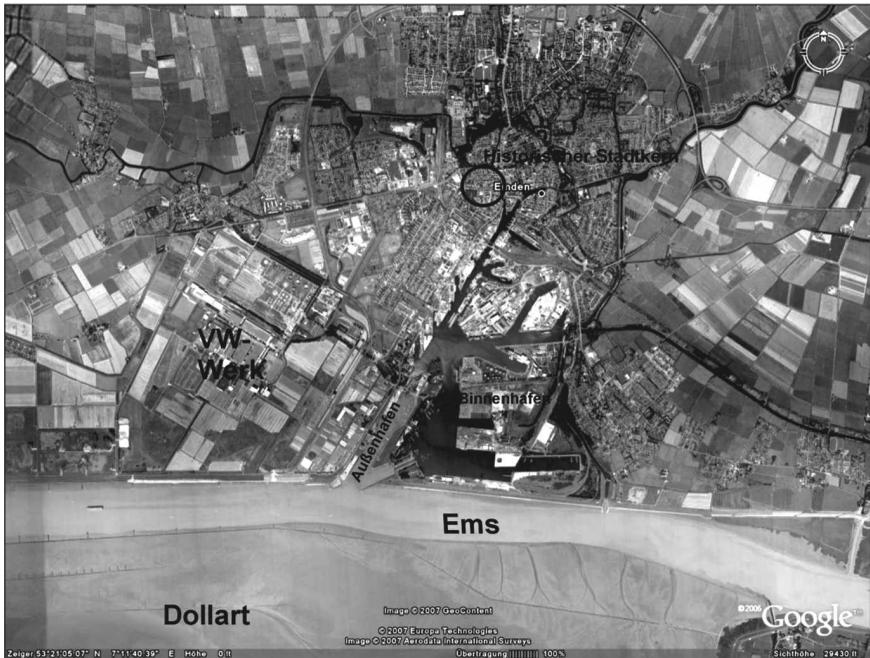


Abb. 1: Satellitenaufnahme der Stadt Emden

Quelle: Google

Die Stadt wird westlich und östlich des Hafens durch Deiche vor erhöhten Tidehochwasserständen des Emsästuars geschützt. Der tidefreie Binnenhafen ist durch zwei Seeschleusen vom Außenhafen getrennt.

Immer wieder wurde das Leben der Stadtbewohner durch Sturmfluten beeinflusst. Viele Extremereignisse sind übermittelt, die zum Teil vielen Menschen das Leben kosteten, aber auch die wirtschaftliche Situation der Stadt veränderten. So wurde als Folge eines Dollarteinbruches im Jahr 1509 die Stadt Emden, die vorher unmittelbar an der Ems lag, von der Emsschleife abgeschnitten. Durch die Verlagerung der Hauptströmung der Ems verschlickte der Hafen zunehmend. Die Folge war eine abnehmende Bedeutung des Seehafens Emden im 17. Jahrhundert. In den vergangenen Jahrzehnten trafen zwar immer wieder auch schwere Sturmfluten auf die Deiche der Stadt, ernsthafte Schäden blieben aber aus. Die Treibselgrenze lag jedoch sowohl bei der Januarsturmflut 1994 mit einem Scheitelwasserstand von +4,60 m NN als auch bei der Sturmflut im November 2006 mit einem in diesem Bereich höchsten jemals gemessenen Wasserstand von + 5,30 m NN unmittelbar unter den Deichkronen.

Emden stellt als Hafen mit dem fünftgrößten Seeumschlag Deutschlands das Wirtschaftszentrum Ostfrieslands dar. Nicht zuletzt wegen des Volkswagenwerkes Emden entwickelte sich der Emdener Hafen zur Drehscheibe des europäischen und überseeischen Automobilumschlags, die nach dem jüngst fertig gestellten Neubau der Emispier im Außenhafen mit weiteren Liegeplatz- und Lagerkapazitäten auch zukünftig ausgebaut werden kann. Bis in das späte 20. Jahrhundert wurde Kohle

über den Dortmund-Ems-Kanal aus dem Ruhrgebiet nach Emden transportiert, in umgekehrter Richtung wurde importiertes Eisenerz für die Stahlindustrie verschifft. Inzwischen ist der Kraftfahrzeugumschlag die bedeutendste Säule des Emder Hafens. Zudem ist Emden seit einigen Jahren auch als Umschlaghafen für Windenergieanlagen bekannt, und es bestehen Planungen, Emden als Basishafen für Offshore Windenergieanlagen in der Nordsee zu etablieren.

Größter Arbeitgeber in Emden ist das ansässige VW-Werk, das als Leitwerk für das Modell „Passat“ fungiert. Gemessen an der Zahl der Beschäftigten handelt es sich um den größten industriellen Produktionsstandort westlich von Bremen und nördlich des Ruhrgebietes. Das Werk zählt knapp 10.000 Beschäftigte. In der Umgebung des VW-Werkes haben sich zahlreiche Zulieferfirmen angesiedelt.

Zweitgrößter industrieller Arbeitgeber in Emden sind die ThyssenKrupp Nordseewerke, eine Werft mit zirka 1.400 Beschäftigten. Sie ist auf den Bau von Schiffen und U-Booten für Seestreitkräfte verschiedener Länder sowie von Spezialschiffen spezialisiert. Neben den Industrie-Beschäftigten auf den Werften und im VW-Werk gibt es zudem noch eine große Anzahl von Beschäftigten bei Schiffsausrüstungsbetrieben und anderen Werft-Zulieferern.

Die Konzentration monetärer Werte insbesondere in direkter Nähe zum Emsästuar gab Anlass, eine Abschätzung des Risikos der Stadt Emden vorzunehmen.

In Abb. 2 sind Informationen über die Deichhöhen im Untersuchungsgebiet zusammengestellt. Es sind sowohl die Soll- und Ist-Höhen des Jahres 1997, als auch die aktuellen Deichhöhen (Stand: Dezember 2004) dargestellt. Die Deichhöhen des Jahres 1997 sind dem „Generalplan Küstenschutz für den Regierungsbezirk Weser-Ems“ (BEZIRKSREGIERUNG WESER-EMS 1997) entnommen, aktuelle Deichhöhen wurden in den jeweils zuständigen Behörden erfragt. Die Berechnungen erstrecken sich im Folgenden von Deichkilometer 127,75 (etwa 600 m östlich des Borßumer Siels) bis Deichkilometer 137,70 (etwa die Hälfte der Strecke zwischen Emder Außenhafen und der „Knock“).

Während noch 1997 im Bereich des Emder Außenhafens Fehlhöhen (Differenzen zwischen den im Generalplan geforderten und den tatsächlichen Deichhöhen) vorhanden waren, sind zum heutigen Zeitpunkt die Vorgaben des Generalplans weitestgehend erfüllt und zum Teil auch übertroffen. Lediglich in der unmittelbaren Umgebung der Seeschleusen liegen die geforderten Deichhöhen noch nicht vor. Im neu aufgelegten „Generalplan Küstenschutz, Niedersachsen-Bremen, Festland“, der im Dezember 2006 auszugsweise veröffentlicht wurde (NLWKN 2006), wird als eine erforderliche Baumaßnahme die bestickgemäße Herstellung der Emder Hafendeiche mit Bauwerken wie Schleusen und Deichscharten aufgeführt.

3 Wasserstands- und Seegangsstatistik

Bei der Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit des Küstenschutzsystems im Untersuchungsgebiet sind verschiedene Schutzelemente zu beachten. Dabei ist die Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit für punktuelle Schutzelemente, wie Sturmflutsperrwerke und Schleusen, aufgrund der technischen Komplexität eher schwierig. Für den Deich als linienartiges Schutzelement bestehen Berechnungsansätze, nach denen verschiedene Versagensformen unterschieden werden können:

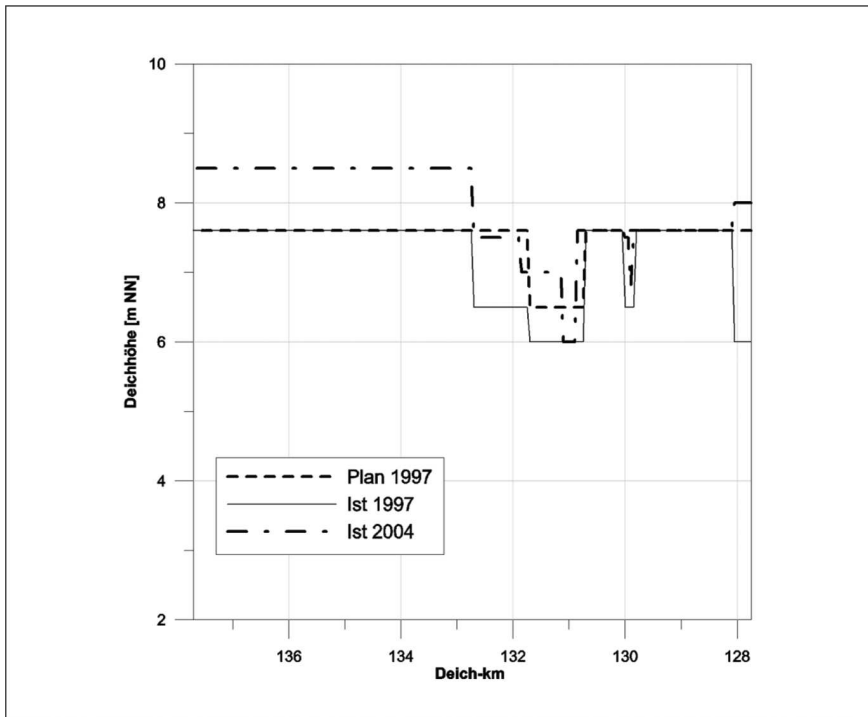


Abb. 2: Deichhöhen im Untersuchungsgebiet (ALBERS u. von LIEBERMAN 2005)

- Versagen durch Überströmen und/oder Wellenüberlauf,
- Versagen durch Schiffsstoß und
- Versagen durch rückschreitende Erosion.

Vergangene Sturmfluten zeigten, dass dem Deichversagen in der Regel Wellenüberlauf vorausging und dass diese Versagensart zur Zeit als maßgebender Mechanismus angesehen werden kann (VON LIEBERMAN u. MAI 2001). Dadurch kann die mathematische Beschreibung des Versagens auf einfache Weise durch den Vergleich von Deichhöhe und der Summe von Wasserstand und Wellenauflauf (MAI u. VON LIEBERMAN 2000) erfolgen. Da für eine statistische Analyse keine ausreichenden Zeitreihen von Seegangsmessungen vorliegen, wird die Seegangstatistik in der Regel aus der gemeinsamen Statistik von Wasserstand und Wind unter Verwendung numerischer Seegangmodelle abgeleitet. In dieser Arbeit wird die Seegangstatistik mit Hilfe des Seegangsatlas des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover (www.fi.uni-hannover.de) aus den Statistiken des Wasserstandes und des Windes ermittelt.

3.1 Windstatistik

Die für den Seegang in der Außenems verantwortlichen Windverhältnisse wurden mit Hilfe des Europäischen Windatlas (TROEN u. PETERSEN 1990) abgeschätzt. Hier sind unter anderem umfangreiche Messungen veröffentlicht, die auf der Insel Helgo-

land, 70 km westlich der Westküste Schleswig-Holsteins, vorgenommen worden. Der Standort Helgoland wird an dieser Stelle repräsentativ für die Windverhältnisse der Deutschen Bucht verwendet und so aufbereitet, dass die Windschattenwirkung der Stadt Emden auf den Dollart beachtet wurde. Für extreme Windgeschwindigkeiten wurde die Wahrscheinlichkeitsdichte der Windgeschwindigkeiten unter Voraussetzung des Vorliegens einer Weibull-Verteilung extrapoliert.

Unter anderem wurde untersucht, wie sich durch eine Klimaänderung die veränderten Belastungen auf die Sicherheit des Küstenschutzsystems auswirken. Nach dem heutigen Stand der Klimaforschung wird für den Jade-Weser-Raum innerhalb der nächsten 100 Jahre eine Erhöhung der mittleren Windgeschwindigkeit von 3,8% erwartet (SCHUCHARDT u. SCHIRMER 2005). Dieser Wert wird für das Untersuchungsgebiet übernommen, und es werden verschiedene Szenarien der Windgeschwindigkeitsentwicklung bei einer Klimaänderung untersucht.

3.2 *Wasserstandsstatistik*

Neben den Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen müssen zur Erstellung einer Seegangsstatistik die Wasserstände und ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt sein. Als Datengrundlage dienen hierzu die vom Wasser- und Schifffahrtsamt Emden bereitgestellten, am Pegel Emden, Neue Seeschleuse gemessenen Scheitelwasserstände (WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION NORDWEST 2004). Die Daten umfassen Messungen vom 01.10.1949 bis zum 31.12.2003. Unter Annahme verschiedener Verteilungsfunktionen werden die Messungen extrapoliert. Je nach gewählter Verteilungsfunktion unterscheiden sich die resultierenden Eintrittswahrscheinlichkeiten, was gerade bei einer Extrapolation auf höhere Wasserstände zu unterschiedlichen Ergebnissen führt, die auch die sich ergebenden Versagenswahrscheinlichkeiten beeinflussen.

Neben der Berechnung der aktuellen Versagenswahrscheinlichkeit des Küstenschutzes, ist auch eine Beurteilung des Einflusses eines durch den Klimawandel bewirkten Anstiegs des Tidehochwassers auf die Sicherheit des Systems möglich. Vereinfachend wird dabei eine achsenparallele Verschiebung der Kurve der Wahrscheinlichkeitsdichte um den Betrag des angenommenen Anstiegs vorgenommen.

3.3 *Seegangsstatistik*

Mit Hilfe des Seegangsatlas des Franzius-Instituts der Universität Hannover können in Abhängigkeit von Wasserstand, Windrichtung und Windgeschwindigkeit die Seegangsparameter mit für diese Untersuchungen ausreichender Genauigkeit für einen bestimmten Punkt ermittelt werden. Für verschiedene Punkte entlang der Deichlinie des Untersuchungsgebietes wurden die Wellenhöhen und die Wellenperioden mit Hilfe des Seegangsatlas berechnet. Da die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Eingabeparameter bekannt sind, kann auf diesem Wege eine Seegangsstatistik für einen bestimmten Punkt erstellt werden, deren Ergebnisse zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit des jeweiligen Deichabschnittes herangezogen werden können.

4 Versagenswahrscheinlichkeiten

Nachdem die Wasserstandsstatistik und die Seegangstatistik erstellt wurden, können jetzt die Versagenswahrscheinlichkeiten verschiedener Deichabschnitte ermittelt werden. Die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit, in diesem Fall die Berechnung der Wahrscheinlichkeit von Wellenüberlauf, erfolgt anhand der Gleichung

$$P_{Z<0} = \int_0^{2\pi\infty} \int_0^{\infty} \int_{h_d - z_{98\%}}^{\infty} p(Thw, u_w, \gamma_w) dThw du_w d\gamma_w \quad (1)$$

mit:	u_w	Windgeschwindigkeit [m/s]
	γ_w	Windrichtung [°]
	h_d	Deichhöhe [m]
	$z_{98\%}$	Wellenaufauhöhe, die von 2% aller Wellenaufläufe überschritten wird [m]
	Thw	Tidehochwasser

Die Zuverlässigkeitsfunktion Z wird durch die Differenz von zulässiger Wellenüberlaufrate und mittlerer Überlaufrate beschrieben.

$$Z = q_{\text{tol}} - q_{\text{mittel}} \quad (2)$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Deichabschnittes berechnet sich demnach aus den Eintrittswahrscheinlichkeiten aller Fälle, in denen die mittlere Wellenüberlaufrate die zulässige Wellenüberlaufrate überschreitet, wobei die Eintrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Belastungskombinationen sich aus den Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen von Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Tidehochwasserstand ergeben.

Die Berechnung der mittleren Wellenüberlaufrate erfolgte nach den Empfehlungen des Ausschusses für die Ausführung von Küstenschutzwerken EAK aus dem Jahr 2002 (KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN 2002), wobei eine tolerierbare Überlaufrate von $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ gewählt wurde.

An ausgewählten Profilen entlang der Deichlinie im Untersuchungsgebiet wurden die Versagenswahrscheinlichkeiten berechnet. Das Hafengebiet wurde bei der Betrachtung ausgenommen, da hier aufgrund der geschützten Lage ein anderer Versagensmechanismus zu erwarten ist. In den Abb. 3 und 4 sind die Ergebnisse der Berechnung dargestellt. Die Wiederkehrzeiten des Deichversagens (das Inverse der Versagenswahrscheinlichkeiten) sind zum heutigen Zeitpunkt sehr groß, was den zum Teil sehr hohen Deichen, die die Stadt Emden schützen, zuzuschreiben ist. Selbst im Falle eines Anstiegs des Tidehochwassers bleiben die Wiederkehrintervalle auf einem hohen Niveau. Der Einfluss steigender Windgeschwindigkeiten ist gering, im Vergleich zu dem steigender Wasserstände. Auffällig sind die verschiedenen Level der Wiederkehrintervalle entlang der Deichlinie aufgrund verschiedener Deichhöhen und Deichgeometrien. Die größten Wiederkehrintervalle sind auf Höhe des Volkswagenwerkes (Deich-km 135) sowie auf der Höhe von Wohnbaugebieten östlich des Hafens (Deich-km 128) zu verzeichnen.

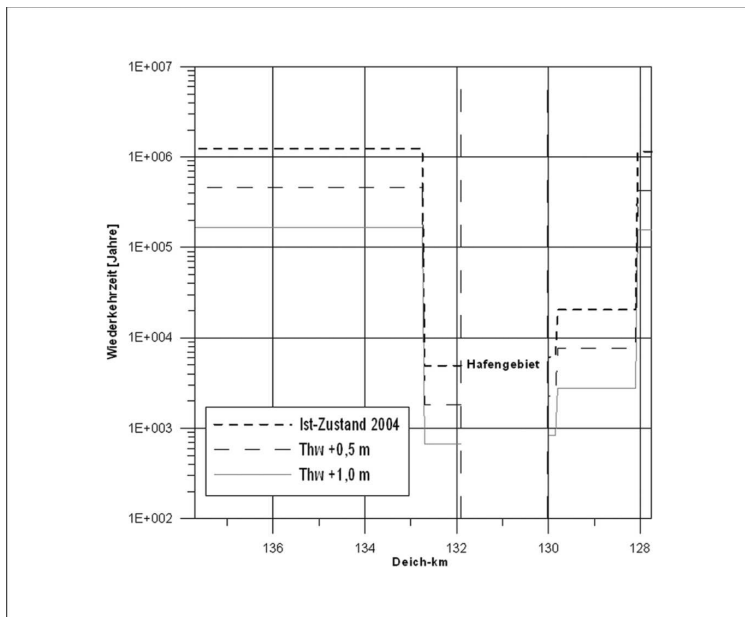


Abb. 3: Wiederkehrzeiten des Deichversagens im Untersuchungsgebiet bei Anstieg des Tidehochwassers (ALBERS u. VON LIEBERMAN 2005)

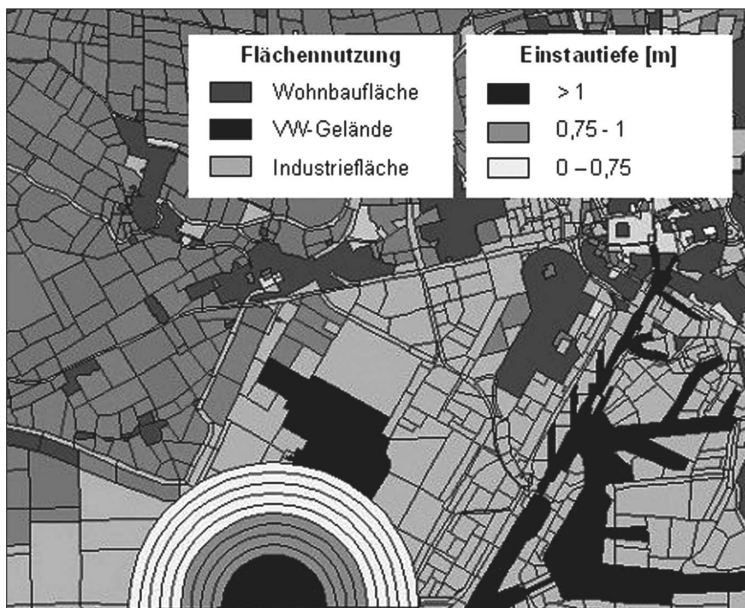


Abb. 4: Wiederkehrzeiten des Deichversagens bei Anstieg des Tidehochwassers und der Windgeschwindigkeit

Dieser beschriebene Ansatz stellt im Vergleich zur Methode, die von WEBBERS et al. (2002) diskutiert wurde und die eine gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (JPDF) zur Abschätzung der Belastungsgrößen verwendet, einen vereinfachten Ansatz dar.

5 Überflutungsflächen

Zur Abschätzung des möglichen Folgeschadens ist die Ermittlung der Überflutungsfläche nötig. Hierfür sind Informationen über die Geländehöhe erforderlich, die in diesem Fall in Form des DGM 5 vorlagen (ALBERS 2004).

Beim Standardvorgehen werden die Geländehöhen des Hinterlandes mit einem erwarteten Sturmflutwasserstand verschnitten. Dieses Verfahren führt zu einer starken Überschätzung des Überflutungsbereiches nach Versagen des Küstenschutzsystems (z.B. Deichbruch), kann allerdings in der Regel als erste Annäherung zur Abgrenzung des überflutungsgefährdeten Bereichs angewendet werden. Weiterhin bleiben beim Standardvorgehen den Überflutungsschaden beeinflussende Faktoren, wie Fließgeschwindigkeit und Anstiegsgeschwindigkeit des Wassers sowie Vorwarnzeit unberücksichtigt. Im Falle der Stadt Emden ist das Verfahren der statischen Verschneidung nicht anwendbar. Gerade die größeren Geländehöhen nahe der Ems bilden eine natürliche Barriere und verhindern, dass selbst bei einem Deichbruch über einen längeren Zeitraum das Hinterland geflutet wird. Die mit Hilfe einer statischen Verschneidung ermittelten Einstauhöhen werden sich nicht einstellen.

Um eine objektive Risikoanalyse vornehmen zu können, ist eine genauere Kenntnis über die überflutete Fläche notwendig. Eine erste Abschätzung des Fortschreitens der Flutwelle kann in der Regel unter Voraussetzung einer halbkreisförmigen Ausbreitung um die Deichbruchstelle erfolgen. Dabei wird eine mittlere Geländehöhe des Hinterlandes vorausgesetzt und die Berechnung mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung und der Manning-Strickler-Gleichung vorgenommen.

Dieses Näherungsverfahren findet insbesondere bei Versicherungen Anwendung. Es löst hier das Verfahren des Verschneidens ab und reduziert so die vormals angesetzten Überflutungsflächen um ca. 40% (MAI u. VON LIEBERMAN 2002).

In Abb. 5 ist die Überflutung dargestellt, die sich 60 Minuten nach einem Deichbruch von 200 m Länge in Höhe des Volkswagenwerkes ergibt. An dieser Stelle wurde ein Deichbruchszenario simuliert, da sich im Hinterland mit dem Volkswagenwerk ein sehr großes Schadenpotenzial befindet.

Die maximal überflutete Fläche beträgt 12 km². Mit Hilfe von Schadensfunktionen kann in Abhängigkeit von der Einstautiefe der Schädigungsgrad bestimmt werden. Dabei muss zwischen verschiedenen Flächennutzungsarten unterschieden werden. Um den Folgeschaden einer Überflutung zu berechnen, muss neben dem Grad der Schädigung der auf der jeweiligen Fläche maximal mögliche Schaden bekannt sein.

6 Schadenpotenzial

Das Versagen eines Küstenschutzsystems zieht Schäden am Wertbestand des Küstenhinterlandes nach sich. Für das Untersuchungsgebiet wurde dieser Wertbe-

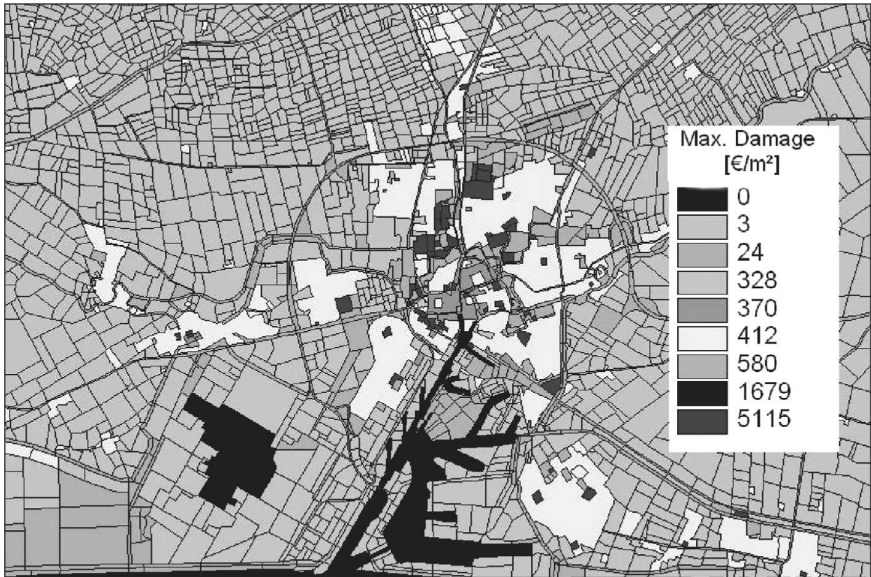


Abb. 5: Abschätzung des Fortschreitens einer Flutwelle mit Hilfe der Kontinuitäts- und der Manning-Strickler-Gleichung (Einstauhöhe in m, Ringabstand 100m)

stand im Rahmen einer Studienarbeit an der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Institut für Wasserbau, detailliert für verschiedene Flächennutzungen abgeschätzt (ALBERS 2004). Berücksichtigt wurden Vermögensschäden und Produktionsausfall. Aufgrund der Größe des Untersuchungsgebietes wurde ein mesoskaliger Ansatz gewählt, wobei die Erhebung des Schadenpotenzials mit Hilfe von Statistiken auf Bundes- oder Landesebene erfolgte, deren Ergebnisse auf das Untersuchungsgebiet „heruntergebrochen“ wurden. Der Wert einzelner Linien-elemente, wie Straßen und Bahngleise, wurde bei zuständigen Behörden und ausführenden Firmen erfragt. Die bedeutendsten Anteile nahmen die Elemente landwirtschaftliche Nutzflächen, gewerbliche Bauflächen und Wohnbauflächen ein. Zur Ermittlung des Schadenpotenzials von Wohnbau- und gewerblichen Nutzflächen wurden detaillierte Statistiken herangezogen. Sofern auf Landesebene erhobene Statistiken verwendet wurden, wurde auf solche des Landes Bremen zurückgegriffen, da diese für eine Hafenstadt wie Emden repräsentativer sind, als Statistiken des Flächenlandes Niedersachsen.

Schlüsselgröße bei der Beurteilung der Wohnbauflächen ist die Bevölkerung. Relevant sind das Wohnvermögen, das Hausratvermögen sowie das Pkw-Vermögen. Die in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl ermittelten vorhandenen Werte wurden gleichverteilt über die gesamte Wohnbaufläche angenommen (Top-Down-Ansatz). Als Schlüsselgröße der gewerblichen Nutzflächen wurde die Beschäftigung verwendet. Über länderspezifische Kapitalintensitäten bzw. Wertschöpfungsintensitäten für verschiedene Wirtschaftssektoren ließen sich durch Verwendung der Beschäftigtenzahlen in diesen einzelnen Sektoren das Bruttoanlagevermögen zu Wiederbeschaffungspreisen (BAVW) bzw. die Bruttowertschöpfung für die Stadt

Emden abschätzen. Diese Werte wurden dann jeweils nach Wirtschaftssektoren (landwirtschaftliche bzw. gewerbliche Nutzung) gleichverteilt über die entsprechende Gesamtfläche angenommen. Bei den landwirtschaftlich genutzten Flächen fand weiterhin der Verkehrswert der Flächen Berücksichtigung, der der Bodenrichtwertkarte entnommen wurde.

Bei den gewerblich genutzten Flächen heben sich allein durch die große Anzahl der Beschäftigten das Volkswagen Werk sowie die Nordseewerke GmbH ab. Bei einer Gleichverteilung des Anlagevermögens sowie der Wertschöpfung über die gesamte gewerbliche Nutzfläche ist davon auszugehen, dass das Schadenpotenzial dieser beiden größten Betriebe unterschätzt und auf kleinere Firmen verteilt wird. Da aber gerade die Werksgelände von VW und der Nordseewerke in unmittelbarer Nähe der Ems bzw. des Hafens liegen, ist eine Verwischung des Schadenpotenzials in diesen Fällen unerwünscht. Somit wurde bei der Werterhebung der gewerblich genutzten Flächen der Top-Down-Ansatz mit Hilfe des so genannten Gegenstromprinzips um Komponenten des Bottom-Up-Ansatzes ergänzt, welcher unter Verwendung branchenspezifischer Kapital- und Wertschöpfungsintensitäten in Abhängigkeit von der Beschäftigtenzahl die gesonderte Betrachtung des Volkswagen Werkes und der Nordseewerke GmbH zuließ. Das Schadenpotenzial der übrigen gewerblichen Nutzflächen verringerte sich, während das des Volkswagen Konzerns sowie der Nordseewerke im Vergleich zu einer reinen Anwendung des Top-Down-Ansatzes stieg (Tab. 1).

Tab: 1: Geschätzte Flächenwerte nach dem Gegenstromprinzip für die Stadt Emden

	Gewerbe- und Mischflächen				
	m ²	Bruttoanlagevermögen		Bruttowertschöpfung	
		Mio. Euro	Euro/m ²	Mio. Euro	Euro/m ²
Top-Down-Ansatz (1)	12.643.218	3.926	310,52	1.619,40	128,10
Bottom-Up-Ansatz (2)	1.583.412	1.381	872,17	733,05	462,95
Volkswagen AG	1.109.320	1.210	1.090,76	636,00	573,32
Nordseewerke GmbH	474.092	171	360,69	97,05	204,71
Gegenstromprinzip (1)–(2)	11.059.806	2.545	230,11	886,35	80,14

In Abb. 6 ist das Ergebnis der Erhebung des Schadenpotenzials der Stadt Emden zu sehen. Die Fläche des Volkswagenwerkes Emden ist schwarz dargestellt. Insgesamt ergibt sich ein Schadenpotenzial für die Küstenstadt Emden von ca. 15 Mrd. Euro.

Unter Verwendung des errechneten Schadenpotenzials der verschiedenen Flächennutzungen, kann aus den in Abbildung 5 dargestellten Einstauhöhen mit Hilfe von Schädigungsfunktionen, die aus Erfahrungen der Holland-Sturmflut 1953 hervorgingen, der Folgeschaden berechnet werden.

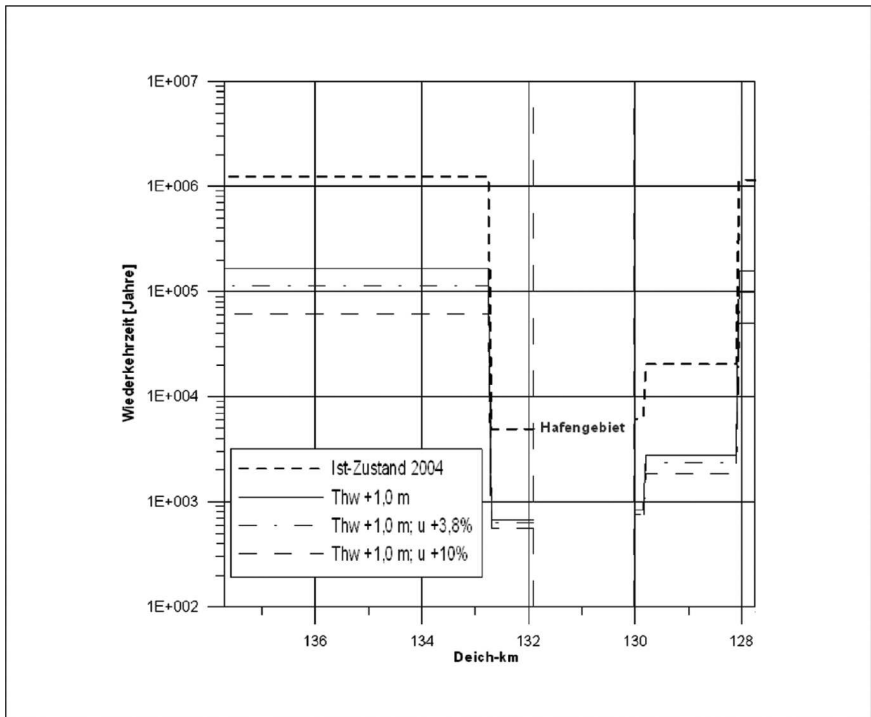


Abb. 6: Maximaler Schaden in Euro pro Quadratmeter

7 Berechnung des Risikos

Ein Deich als Teil eines Küstenschutzsystems sollte so konstruiert werden, dass er eine spezielle Fläche im Hinterland schützen kann. Das Ziel ist es dabei, die Baukosten und das Risiko einer Überflutung zu minimieren, wobei Kronenhöhe und die Böschungsneigung als primäre Optimierungsvariablen anzusehen sind. VAN GELDER u. VRIJLING (2004) zeigten, dass die Optimierung einer Deichbemessung unter Beachtung der Baukosten und des mit der Deichhöhe korrespondierenden Risikos praktikabel ist.

Für das oben dargestellte Deichbruchszenario (Abb. 5) ergibt sich bei einer maximalen Überflutungsfläche von 12 km² unter Zugrundelegung des errechneten Schadenpotenzials ein Folgeschaden von ca. 120 Mio. Euro. Nach der Formel

$$\text{Risiko} = \text{Versagenswahrscheinlichkeit} \times \text{Folgeschaden}$$

kann unter Verwendung der berechneten Versagenswahrscheinlichkeit von $8,08 \times 10^{-7}$ 1/a das Risiko bestimmt werden. Dieses liegt zur Zeit für den betrachteten Deichabschnitt bei etwa 100 Euro pro Jahr und ist somit aufgrund der sehr großen Deichhöhen an dieser Stelle extrem gering. Selbst bei einem Anstieg des Tidehochwassers um einen Meter erhöht sich das Risiko auf einen immer noch geringen Wert von etwa 700 Euro pro Jahr. Durch die Erhöhung dieses Deiches in

unmittelbarer Nähe zum VW-Werk im Jahr 1999 wurde das Risiko minimiert. Vor der Deicherhöhung lag das Risiko bei ca. 20.000 Euro pro Jahr und wäre bei einem Anstieg des Tidehochwassers um 1 Meter auf 140.000 Euro pro Jahr gestiegen. Vor dem Hintergrund eines möglichen Meeresspiegelanstiegs kann daher diese Deicherhöhung als gerechtfertigt gewertet werden.

Die Auswirkung der Deichhöhe auf das Wiederkehrintervall eines Deichversagens ist in Abbildung 7 dargestellt. Das Deichprofil 5 befindet sich dabei östlich des Emdener Hafens (Deich-km 128). Um das Wiederkehrintervall bei einem Anstieg des Tidehochwassers von 0,5 m sowie einer Erhöhung der Windgeschwindigkeiten von 3,8 % konstant zu halten, hätte es einer Deicherhöhung von etwa 0,6 m bedurft. Durch die Deichverstärkung und -erhöhung um 2 m im Zuge des Baus des Emsperrwerkes, wurde eine deutliche Reduzierung des Wiederkehrintervalls erzielt.

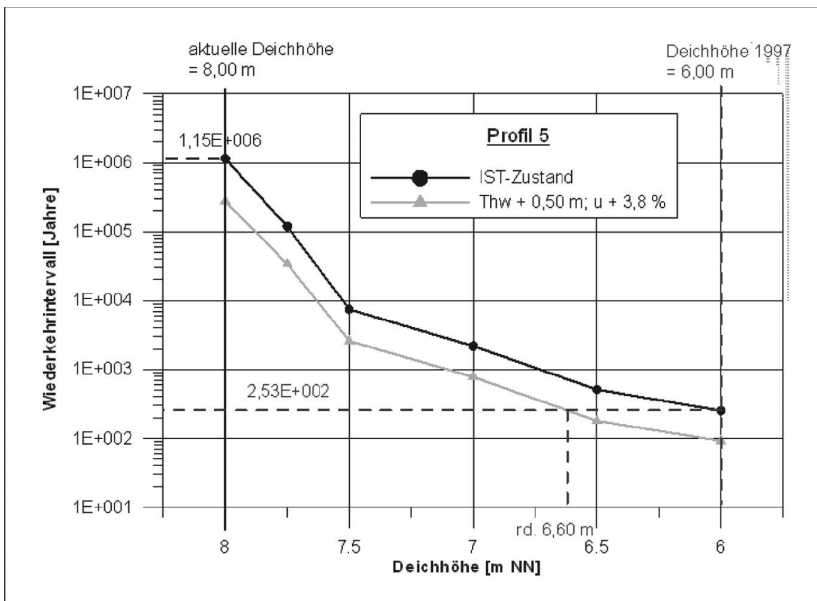


Abb. 7: Abhängigkeit des Wiederkehrintervalls des Deichversagens von der Deichhöhe

8 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorangegangenen Beitrag erfolgte die Bewertung der Sicherheit des Küstenschutzes der Stadt Emden sowie eine Abschätzung des in der Stadt vorhandenen Schadenpotenzials. Zum heutigen Zeitpunkt bietet der vorhandene Küstenschutz der Stadt Emden eine große Sicherheit. Geringere Fehlhöhen, die noch im Jahr 1997 existierten, wurden beseitigt. Selbst Deichabschnitte mit damals schon geringer Versagenswahrscheinlichkeit wurden erhöht, um frühzeitig möglichen Gefahren vorzubeugen. Als Resultat der Baumaßnahmen seit 1997 weisen die Deiche, die die Stadt Emden schützen, große Höhen auf, die extrem geringe Versagenswahrscheinlichkeiten ergeben.

Bei der Berechnung der Wiederkehrintervalle des Deichversagens wurden auch

verschiedene Szenarien des Klimawandels berücksichtigt. Insgesamt bleibt festzustellen, dass selbst bei einem Anstieg des Tidehochwassers um einen Meter die Versagenswahrscheinlichkeit der Deiche im Untersuchungsgebiet gering bleibt. Um dieses Ergebnis aber zufrieden stellend interpretieren zu können, wäre es eigentlich notwendig, die Wahrscheinlichkeit des Anstiegs des Tidehochwassers zu kennen.

Die Untersuchung ergab weiterhin, dass hinter den Deichen, die die Küstenstadt Emden schützen, enorme Werte vorhanden sind. Aufgrund der großen Bedeutung der Betriebe für die Wirtschaft der gesamten Region ist es erforderlich, langfristig zu planen und Gefahren zu erkennen, um so das Risiko von Überflutungen zu minimieren. Darüber hinaus darf nicht vergessen werden, dass im Falle eines Deichversagens auch Menschenleben gefährdet wären, die in einer Risikoanalyse nicht aufgeführt sind, aber von ungleich größerer Bedeutung als Vermögenswerte sind.

Literatur

- ALBERS, T. 2004: Gefährdungs- und Schadenpotenzialanalyse für die Küstenstadt Emden. Studienarbeit, Technische Universität Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Wasserbau, unveröffentlicht.
- ALBERS, T. u. N. VON LIEBERMAN 2005: Risikoanalyse für die Küstenstadt Emden – für den Status-Quo und mögliche Klimaänderungen. In: Hafenbautechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.), Tagungsband zum HTG-Kongress 2005. Bremen, S. 447–456.
- BEZIRKSREGIERUNG WESER EMS 1997: Generalplan Küstenschutz für den Regierungsbezirk Weser-Ems. Oldenburg (unveröffentlicht).
- IPCC 2001: Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press and New York.
- KORTENHAUS, A. u. H. OUMERACI 2000: Probabilistische Bemessungsverfahren und Risikoanalysen. In: HANSA, 137. Jahrgang, Nr. 11, S. 78–80.
- KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN (Hrsg.) 2002: EAK 2002 – Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken. In: Die Küste, H. 65. Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens, Heide.
- MAI, S. u. N. VON LIEBERMAN 2000: Internet-based tools for Risk Assessment for Coastal Areas. In: Proceedings of the 4th International Conference on Hydroinformatics 2000. Iowa, USA (CD-ROM).
- MAI, S. u. N. VON LIEBERMAN 2002: RISK – Risikoinformationssystem Küste. In: Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, Bd.53, S. 44–56.
- MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE RÄUME, LANDESPLANUNG, LANDWIRTSCHAFT UND TOURISMUS DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (Hrsg.) 2001: Generalplan Küstenschutz – Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein. Kiel.
- NLWKL 2006 = NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (Hrsg.) 2006: Generalplan Küstenschutz. Niedersachsen-Bremen, Festland. Auszug in: http://www.nlwkn.niedersachsen.de/master/C7593367_N5737693_L20_D0_I5231158.html
- SCHUCHARDT, B. u. M. SCHIRMER (Hrsg.) 2005: Klimawandel und Küste – Die Zukunft der Unterweser-region. Berlin.
- TROEN, I. u. E.L. PETERSEN 1990: Europäischer Windatlas. Roskilde, Dänemark.
- VAN GELDER, P. u. J.K. VRIJLING 2004: Reliability based design of flood defences and river dikes. In: A. LANNOY (Ed.): Life Time Management of Structures. Luxembourg, S. 206–225.
- VON LIEBERMAN, N. u. S. MAI 2001: Entscheidungsunterstützung im Sturmflutschutz durch Risikoanalyse. In: Wasser und Boden, Jg. 53, H. 12, S. 11–16.
- WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION NORDWEST – WSA EMDEN 2004: Scheitelwasserstände des Pegels Emden. Neue Seeschleuse: 01.10.1949 bis 31.12.2003, unveröffentlicht.
- WEBBERS, P.B., H.G. Voortman, P.H.A.I.M. van Gelder, J.K. Vrijling 2002: Multi-variate statistics of hydraulic boundary conditions for the Rotterdam harbour extension. In: 28th International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2002) – Solving Coastal Conundrums. Cardiff, S. 1254–1266. www.fi.uni-hannover.de