

# Sturmfluten

*Hans von Storch*

*(Institut für Küstenforschung, Helmholtz Zentrum Geesthacht  
und KlimaCampus Hamburg) und*

*Katja Woth*

*(Max Planck Institut für Meteorologie, Hamburg)*

Zusammenfassung: In dieser Übersicht beschreiben wir Sturmfluten als globales Phänomen, das an vielen Küsten der Welt bekannt und gefürchtet wird. Grundsätzlich unterscheiden sich dabei die Situationen in den Tropen, wo relativ kleinere aber dafür intensivere tropische Zyklonen Sturmfluten bewirken, und in mittleren Breiten, wo große „barokline“ Stürme wirken. Nach einer kurzen Rückschau auf zwei Fälle - die Nargis-Sturmflut in Myanmar in 2008 und die Weihnachtsflut in der Deutschen Bucht 1717 - wenden wir uns der Deutschen Nordseeküste zu. Wir beschreiben den gegenwärtigen Wandel des Sturmflutrisikos und mögliche zukünftige Änderungen als Folge des menschengemachten Klimawandels. Abschließend sprechen wir die Frage an, wie mit diesen Perspektiven umgegangen werden kann.

## Inhalt

Sturmfluten.....	1
1. Einführung.....	3
2. Wetter und Sturmfluten: Stürme .....	5
3. Beispiele.....	7
a) Nargis .....	7
b) Weihnachtsflut 1717 an der Nordseeküste.....	8
4. Sturmfluten an den deutschen Nordseeküsten .....	9
5. Küstenschutz und Klimawandel an der deutschen Nordseeküste .....	12
c) Gegenwärtiger Wandel .....	12
d) Zukünftig möglicher Wandel.....	13
6. Sturmflutrisiko und der Umgang damit.....	14
7. Literatur .....	17

## 1. Einführung

Sturmfluten (Gönnert et al., 2001; von Storch und Woth, 2008; Lowe et al., 2010) gehören neben Tsunamis und Erdbeben mit zu den stärksten Naturgefahren, denen Menschen auf dieser Welt ausgesetzt sind. In Nordeuropa werden die Sturmflut vom 31. Januar 1953, die Teile der Niederlande und Englands überschwemmten, sowie die Sturmflut vom 16. Februar 1962, die die Deutsche Bucht und gerade Hamburg traf, besonders gut erinnert. Auf Youtube findet man für beide Ereignisse eindrucksvolles Filmmaterial (für 1953 z.B.: <http://www.youtube.com/watch?v=kPpQx7KTvVE>, und für 1962 z.B.: <http://www.youtube.com/watch?v=9f8SSnGmPmM>). Diese Fluten (z.B. Meier, 2008) sind ein Teil der kollektiven Erinnerung in den Regionen.



Abbildung 1: Kolorierte Kupferstichkarte von Johann Baptist Homann, Nürnberg, mit einer Darstellung des Ausmaßes der Überschwemmungen längs der deutschen und niederländischen Nordseeküste während der 1717er Weihnachtsflut.

In Europa ist im Laufe der Jahrhunderte die Fähigkeit, mit diesem Risiko umzugehen, enorm gewachsen, mit dem Resultat, dass solche Ereignisse nicht mehr mit vielen Toten einhergehen. Im Gegenzug gehen Opferzahlen in Teilen Südasiens immer noch in die

Hunderttausende, wie die Flut des Sturms Nargis (Fritz et al., 2009) längs der Südküste von Myanmar in 2008 eindrucksvoll und erschreckend demonstriert hat. Noch in 1970 kamen 300-500,000 Menschen bei einem anderen („Bhola“) Sturm in Bangladesh zu Tode.

Wie der Name sagt, werden Sturmfluten durch Stürme generiert; wenn der Wind gegen die Küste schiebt (*Windstau*) steigt dort der Wasserstand; im Falle funktionierenden linienhaften Küstenschutzes wird das Wasser durch geeignete Bauwerke (Deiche) gestoppt, oder das zusätzliche Wasser ergießt sich über das Land; dies ist insbesondere dann mit erheblichen Verlusten an Menschenleben und Werten verbunden, wenn der Küstenschutz versagt, und es für die Menschen unerwartet zu einer Überschwemmung kommt. Die in Abbildung 1 gezeigte historische Karte von der „Weihnachts“-Sturmflut 1717 (vgl. Meier, 2008; Petersen und Rohde, 1977) demonstriert eine solche katastrophale Überschwemmung.

Sturmfluten treten an vielen Küsten der Welt auf; sie unterscheiden sich in ihrem Charakter danach, ob sie von tropischen Zyklonen ausgelöst werden oder durch extratropische Stürme (siehe unten; Gönnert et al., 2001). Die globale Verteilung des Risikos zeigt Abbildung 2.



Abbildung 2: Darstellung der Gefahr durch Sturmfluten, entsprechend einer Einschätzung der Münchner Rück.

*Tropische Stürme* führen zu Sturmfluten an der Ostküste von Nordamerika, am Golf von Mexiko, den Küsten von Hawaii, Mexiko, den Karibischen Inseln, im Golf von Bengalen, dem Arabischen Meer, an den südwestlichen als auch an den östlichen Küsten des Pazifiks, den westlichen tropischen Pazifik, den australischen Küstengebieten, in Japan, China, Korea, den Philippinen, Myanmar, Vietnam und Thailand.

Sturmfluten als Folge *extratropischer* Stürme werden häufig an Küsten der mittleren Breiten beobachtet. Dies sind vor allem die kanadischen Küsten – hier sind auch die Küsten der großen Seen betroffen –, die Küsten Argentiniens und in Europa Küsten der

Nordsee, der Ostsee, der Irischen See, des Mittelmeeres (vor allem an Adria und dem Ägäisches Meer) als auch des Schwarzen Meeres.

Ob es bei starkem Wind tatsächlich zu hohem Küstenwasserstand kommt, hängt in der Regel von weiteren Faktoren ab, im Einzelfall etwa die Tidephase oder die Vorgeschichte (etwa im Falle der Ostsee; etwa Rosenhagen und Bork, 2009).

Aber die Bedingungen, die aus einem starken Sturm eine bedrohliche Sturmflut werden lassen, können sich dauerhaft ändern – etwa der globale Meeresspiegel, der sich etwa im Bereich der Deutschen Bucht seit Jahrzehnten um ca. 1.7 mm/Jahr hebt (Albrecht et al., 2011), die regionale Absenkung des Landes aufgrund geologischer Ausgleichsprozesse im Nachklang der Eiszeiten, die Absenkung zahlreiche Ästuare mit darauf errichteten Millionenstädten aufgrund verminderter fluvialer Sedimentfrachten und verstärkter Nutzung von Wasser und anderer Rohstoffe (Syvitski et al., 2003) oder Baumaßnahmen (Fahrrinnenvertiefung; Flußbegradigung) vor allem in Ästuaren (von Storch et al., 2008).

Daher ändert sich regional das Risiko von Sturmfluten in verschiedener Weise; in allen Fällen aber tritt hinzu die Perspektive des beschleunigten Meeresspiegelanstieges infolge des Anwachsens der Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre durch den wirtschaftenden Menschen seit Einsetzen der flächenintensiven Landwirtschaft und darauf folgend der Industrialisierung. In einigen Fällen ist es auch plausibel, dass sich die Stärke und Häufigkeit der Sturmfluten auslösenden Stürme ändern könnte; gerade im Bereich der tropischen Zyklonen deutet einiges auf eine Verschärfung der zukünftigen Situation hin.

Im Folgenden werden wir zunächst auf die meteorologischen Ursachen von Sturmfluten eingehen. Vor allem auf die unterschiedlichen Bedingungen in den Tropen verglichen mit denen der Extratropischen Stürmen (Abschnitt 2). Zwei Beispiele von Sturmfluten, Nargis in Myanmar 2008, und die Weihnachtsflut 1717 in der Deutschen Bucht werden besprochen in Abschnitt 3. Danach werden wir uns konzentrieren auf den Bereich der Nordsee (Abschnitt 4) und auf die Frage, inwieweit im Zuge des menschengemachten Klimawandels sich derzeit und in der möglichen Zukunft die Sturmflutgefahr gerade in der Deutschen Bucht ändert und weiter ändern kann (Abschnitt 5). Abschließend diskutieren wir die Frage an, was aus hohem Wasserstand an der Küste eine Katastrophe machen kann (Abschnitt 6).

## **2. Wetter und Sturmfluten: Stürme**

Sturmfluten werden durch Stürme erzeugt – aber man hat zu unterscheiden vor allem zwischen tropischen Stürmen und „baroklinen“ Stürmen in mittleren Breiten, den extratropischen Stürmen. Daneben gibt es auch noch andere Sturmtypen, wie z.B. die Polarstürme oder Medicanes im Mittelmeerraum, die aber für Sturmfluten in der Regel nicht relevant sind. Wir werden uns hier auf die beiden erstgenannten Haupttypen beschränken; im späteren Teil des Artikels dann sogar nur auf den Bereich der Nordsee.

Eine vergleichende Übersicht der Eigenschaften beider Sturmtypen und den damit einhergehenden Sturmflutparametern bietet diese Tabelle (nach Gönnert et al. 2001):

Parameter	Tropische Zyklone	„barokline“ Zyklone
<b>Räumliche Ausdehnung des Sturms</b>	500 ± 200 km	1,000 ± 500 km
<b>Windstauhöhe</b>	mehrere Meter: Hurricane Camille verursachte einen Windstau von 7,5 m in 1969	Windstauhöhen > 5m sind seltene Ereignisse
<b>Andauer des Windstaus</b>	Einige Stunden, bis zu einem halben Tag	2-5 Tage
<b>Länge des betroffenen Küstenabschnittes</b>	meist < 200 km	Mehrere hundert Kilometer

„Barokline“ Zyklone, oft einfach als „Sturm“ oder „Tiefdruckgebiet“ bezeichnet, sind extratropische Systeme, die sich in den mittleren Breiten im Grenzbereich von Warm- und Kaltluft, der planetarischen Frontalzone, bilden und einen wichtigen Anteil am dortigen Wettergeschehen haben. In einer baroklinen Atmosphäre, d.h. in einer Atmosphäre, in der Flächen gleicher Temperatur und gleichen Luftdrucks gegeneinander geneigt sind, sind die horizontalen Strömungen instabil. Ist ein kritischer horizontaler Temperaturgradient erreicht, entstehen Tiefdruckgebiete, die durch Temperaturadvektion zu einem Ausgleich der Temperaturgegensätze führen (siehe z.B. Lilequist und Cehak 1979, S. 228 ff). Der energetische Antrieb der extratropischen Tiefdrucksysteme stammt hauptsächlich aus den Temperaturgegensätzen zwischen den kalten, polaren Luftmassen und der wärmeren, subtropischen Atmosphäre. Je stärker der horizontale (zumeist Nord-Süd) Temperaturgegensatz, umso stärker die Stürme; daher treten solche Stürme zumeist in der kalten Jahreszeit auf.

Stürme in den mittleren Breiten treten gehäuft in bestimmten Regionen auf, in den sog. „storm tracks“. Die wesentlichen storm tracks der Nordhemisphäre erstrecken sich über den Nordatlantik und über den Nordpazifik. Eine kleinere Zugbahn, die jedoch mit der Nordatlantischen Zugbahn verbunden ist, erstreckt sich über das Mittelmeergebiet. Hier ist der treibende Mechanismus das Feuchteangebot, das mit der warmen Wasseroberfläche des Mittelmeeres einhergeht – ähnlich wie bei den tropischen Zyklonen. Dieses Sturmband zeigt sich verantwortlich für extreme hydrometeorologische Ereignisse wie z.B. Starkregen in Südeuropa oder aber erhöhte Wasserstände durch Windstau im Mittelmeer und im Schwarzen Meer (Lowe et al, 2010, p.338).

Tropische Zyklone sind Tiefdruckgebiete, die in der Regel zwischen dem 5. und dem 25. Breitengrad nördlich und südlich des Äquators über den Ozeanen entstehen. Je nach Entstehungsgebiet bzw. ihrer Verlagerung erhalten die tropischen Zyklone unterschiedliche Bezeichnungen: Im Golf von Bengalen spricht man von Zyklonen, im Bereich des Karibischen Meeres von einem Hurrikan und von einem Taifun in den Gewässern Chinas und Japans. Nach ihrer Entstehung wandern die tropischen Zyklonen mit der tropischen

Ostströmung westwärts mit einer nördlichen Komponente infolge der Erdrotation auf der Nordhalbkugel und einer südlichen auf der Südhalbkugel.

Direkt am Äquator entstehen keine tropischen Zyklonen, da es für die Entstehung des rotierenden Systems einer gewissen Größe der Corioliskraft bedarf. Diese Kraft wirkt beschleunigend rechtwinklig zur Bewegungsrichtung eines Körpers, auf der Nordhalbkugel bewirkt sie also eine Ablenkung nach rechts, auf der Südhalbkugel eine Ablenkung nach links (siehe z.B. Heyer 1993, S. 94). Diese thermodynamischen Systeme wandeln latente Wärme ("latent" lat. für "verborgen"), die hauptsächlich als Verdunstungsenergie über den warmen Wasseroberflächen des Ozeans entsteht, in kinetische Energie, sprich Wind, um. Daher zeigt die Häufigkeit der tropischen Zyklonen einen Jahresgang auf, mit einem Maximum in den wärmsten Monaten, also in den Spätsommermonaten Juli, August und September auf der Nordhalbkugel und entsprechend den Monaten Januar bis März auf der Südhalbkugel (z.B. Heyer 1993, S. 109 ff).

Beide Sturmtypen sind mit erheblichen kurzfristigen Wasserstandserhöhungen an den Küsten verbunden, wenn sie auf Land treffen. Tropischen Zyklonen sind jedoch wesentlich kompaktere Systeme mit einer horizontalen Ausdehnung meist zwischen 200 und 500 km und tieferen Kernluftdrücken verglichen mit ihren extratropischen Verwandten, deren horizontale Ausdehnung in der Regel meist zwischen 500 km und 1500 km liegt. Beide Eigenschaften drücken sich in größeren horizontalen Luftdruckgradienten innerhalb des Sturms aus, die sich in der Folge in deutlich höheren Windgeschwindigkeiten äußern.

Infolge der relativ geringen Ausdehnung der tropischen Orkane und auch der geringeren Häufigkeitsdichte der Ereignisse sind die gefährdeten tropischen Küsten jedoch wesentlich seltener von Orkanen und entsprechenden Sturmfluten betroffen als die windeexponierten Küstenabschnitte der mittleren Breiten. Insofern sind solche Stürme zwar durchaus häufig, wenn man die Tropen als Ganzes betrachtet, am einzelnen Ort aber durchaus selten. Welche Wirkung dies auf die Risikowahrnehmung hat, ist eine interessante aber für uns bisher unbeantwortete Frage. Damit mag zusammenhängen, dass der Sturmflutschutz sich regional sehr unterschiedlich entwickelt hat.

### **3. Beispiele**

Im Folgenden wollen wir zwei Beispiele für Sturmfluten und ihre verheerende Wirkung beschreiben – die Nargis-Flut in Myanmar im Mai 2008 (Fritz et al., 2009), und die Weihnachtsflut 1717 an der deutschen und niederländischen Nordseeküste (Meier, 2008, Petersen und Rohde, 1977)

#### **a) Nargis**

Im Mai 2008 wurden die Küste und die angrenzenden Gebiete von Myanmar vom Zyklon „Nargis“ überquert und stark verwüstet (Fritz et al., 2009). Mit über 138 000 Toten zählt dieses Naturereignis zu den bis dahin weltweit acht dokumentierten Wirbelstürmen mit der höchsten Anzahl an Todesopfern. Auf der in fünf Kategorien eingeteilten Saffir-

Simpson Hurrikan Skala erreichte Nargis Stufe 4. Dies entspricht Windgeschwindigkeiten von über 210 km/h und einem Anstieg des Wasserspiegels von 3,9 bis 5,5 m.

Der Zyklon Nargis und die von diesem Zyklon ausgelöste Sturmflut ist damit in der Wucht seiner Zerstörung vergleichbar mit dem im indischen Ozean ausgelösten Tsunami im Dezember 2004.

Im Falle des Zyklon Nargis wurde das zerstörerische Potential auf Myanmar zunächst dadurch vervielfältigt, daß die Zugbahn parallel zur Küste und damit geradewegs über das Ayeyarwady Delta hinweg zog. Das Ayeyarwady Delta ist ein ausgedehntes Flussdelta, das die Südküste Myanmars durchzieht, und so, wie über Adern, den Golf von Bengalen mit weiten Teilen des Landesinneren und den dort gelegenen Städten wie Labutta, Bogale oder Pyapon verbindet. Im Ayeyarwady Delta leben über 7 Millionen Menschen. In Yangon, der größten Stadt Myanmars leben mehr als 4 Millionen Menschen, im Großraum Yangon sind es ca. 6 Millionen Menschen. An den Küsten des Deltas wurden Wasserstände in Folge der Sturmflut von 5 Metern beobachtet, die mit zusätzlichen Wellenhöhen von 2 Metern bis auf 7 Meter anwuchsen. Diese Wassermassen konnten sich dann in der flachen Delta-Ebene über 50 km weit ins Landesinnere ausbreiten. Siedlungen nahe der Küste wurden fast vollständig zerstört. Felder und Brunnen für den Trinkwasserbedarf mit Salzwasser geflutet.

Durch den ungewöhnlichen Verlauf der Zugbahn von Nargis war ein Gebiet betroffen, das selten von solchen extremen Sturmfluten betroffen ist. Augenzeugen berichten, dass sie die Warnungen nicht ernst nahmen, scheinbar auch niemand solch ein Ereignis in Lebzeiten erlebt hatte und so nicht auf eigene Erfahrung zurückgreifen konnten (Fritz et al. 2009). Zusätzlich wurden die Mangroven an den Küsten und im Deltagebiet zu Gunsten von landwirtschaftlichen Flächen v.a. für den Reisanbau, verdrängt. Die Mangrovenwälder hätten einen natürlichen Schutz in Folge der Abschwächung von der Wellenenergie darstellen können und somit das Schadensausmaß zumindest reduzieren können.

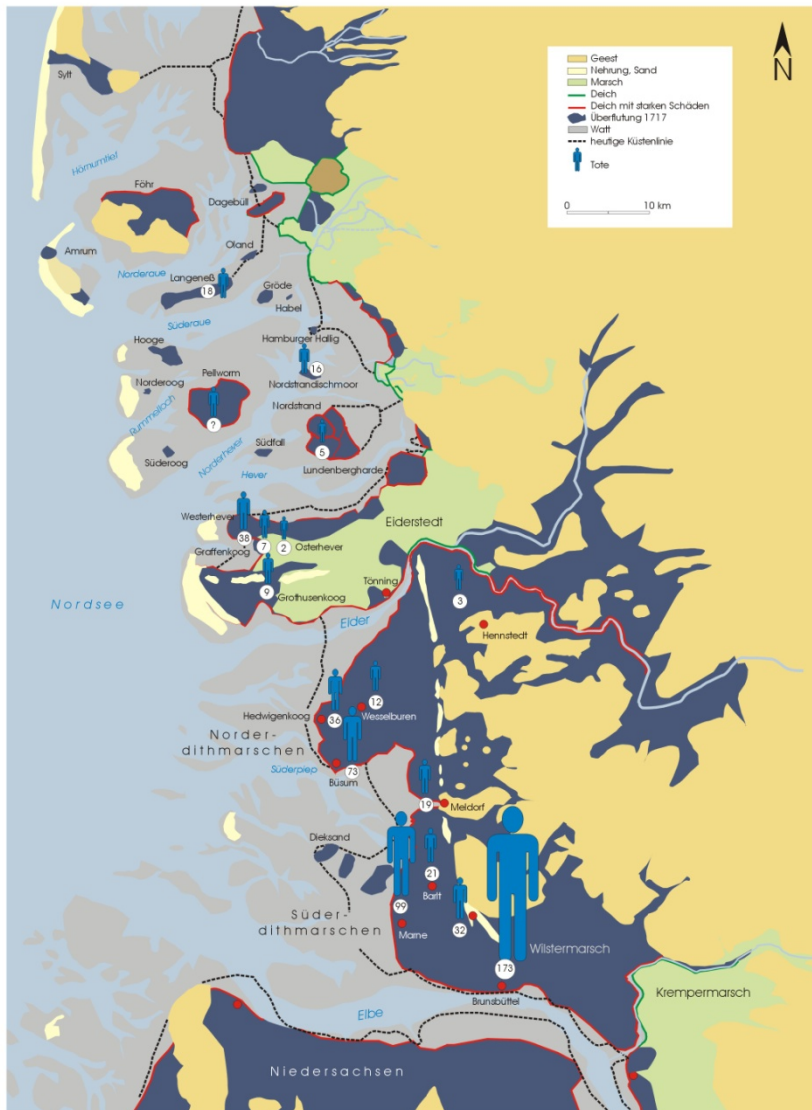
## **b) Weihnachtsflut 1717 an der Nordseeküste**

Sturmfluten stellen in den Küstenregionen Norddeutschlands die größten Umweltgefahren dar. Insbesondere längs der Nordseeküste ist es immer wieder zu katastrophalen Ereignissen gekommen mit hohen Verlusten an Menschenleben, Infrastruktur und Gütern. In historischen Zeiten sind auch gewaltige Verluste an nutzbarer Fläche eingetreten.

Ein Beispiel ist die Weihnachtsflut, die mit großflächigen Überschwemmungen am 24. und 25. Dezember 1717 (Abbildungen 1 und 3) einherging (Meier, 2008). Es war die „größte Flutkatastrophe der Neuzeit“, die nicht nur durch eine kurz darauffolgende Flut am 25. und 26. Februar 1718 sondern auch durch den gleichzeitigen Nordischen Krieg noch verschärft wurde, Meier (2008; S. 142) vermerkt zu dem Ereignis: „An allen Küstenregionen von den Niederlanden bis nach Dänemark kam es zu zahlreichen Deichbrüchen und Überschwemmungen. Zwischen Emden und Tondern ertranken etwa 9000 Menschen, in den Niederlanden über 2500. Am schlimmsten betroffen waren war die

zwischen Jadebusen und Wesermündung exponiert liegende Halbinsel Butjadingen. Hier war ein Bevölkerungsverlust von nahezu dreißig Prozent zu verzeichnen. Groß waren auch die Verluste an Vieh: Unbeschreiblich waren die Schäden an Deichen und Sielen.“

Meier weist auf eine damals praktizierte Anpassungsmaßnahme hin, nämlich „Schwimdächer“ auf Häusern („Drift Huus“), die bei einer schweren Flut als „Rettungs-floß“ dienen konnten. Man musste dazu die Dachziegel und den Schornstein abwerfen und extra dafür angelegte Verankerungen lösen. Es soll ein Haus mit so einem Dach noch auf Spiekeroog geben (Meier, 2008).



**Abbildung 3:** Überflutung und Verluste an Menschenleben in Schleswig Holstein im Zuge der Weihnachtsflut 1717 (Meier, pers. Mitteilung) – vgl. die historische Darstellung durch J.B. Homan (Abbildung 1)

#### 4. Sturmfluten an den deutschen Nordseeküsten

An der Nordseeküste tritt infolge der astronomischen Tide in etwa alle 12 Stunden und 25 Minuten eine Erhöhung des Wasserspiegels ein: die Flut. Um von einer Sturmflut zu

sprechen, müssen zusätzlich spezielle meteorologische Bedingungen eintreten. Bei Wetterlagen mit über einige Stunden andauernden hohen Windgeschwindigkeiten aus nord/westlichen Richtungen werden infolge des Windstresses zusätzliche Wassermassen an die Küste getrieben und führen, als sog. *Windstau*, zu einer Wasserstandserhöhung. Der Windstau wächst mit verminderter Wassertiefe an, sodass insbesondere an flachen Küstenabschnitten Sturmfluten hoch auflaufen. Die eigentliche Sturmfluthöhe ergibt sich aus dem Zusammentreffen von Windstau und der Tide. So sind hohe Sturmfluten dann zu erwarten, wenn hoher Windstau über einige Stunden anhält und damit auch zum Zeitpunkt des eintretenden astronomischen Tidehochwassers bestand hat.

Daneben spielen an der Küste und den Ästuaren (also die tidebeeinflussten Mündungsbereiche der Flüsse, etwa die Elbe von Geesthacht bis Cuxhaven) auch Änderungen in den morphologischen Begebenheiten des Stroms eine Rolle. Abbildung 4 zeigt als Beispiel die Veränderung der Sturmfluthöhen an Orten stromauf in den Ästuaren von Elbe, Weser und Ems relativ zu einem Pegel an der Mündung. Ursache für die Zunahme sind Ausbaggerungen von Fahrrinnen für die Schifffahrt sowie Flussbegradigungen zur Verbesserung des Küstenschutzes.

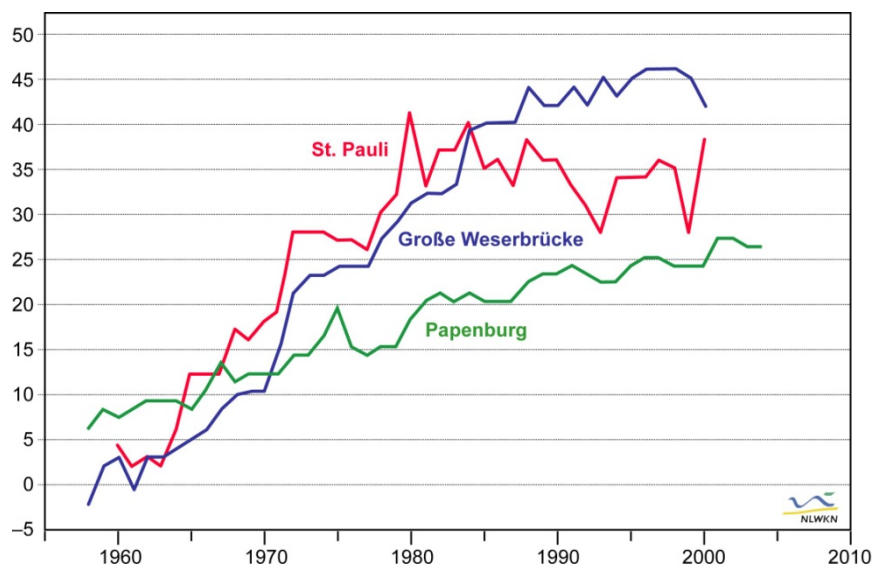


Abbildung 4: Differenz von Sturmhochwassern (jährliche 99.5%ile der Tidenhochwassers) an Pegeln in Elbe, Weser und Ems relativ zur Nordsee (19-jährige Mittel). Nach H. NieMeier (pers. Mitteilung)

Solche Eingriffe in die Küstenmorphologie haben daher den Effekt, dass an den meisten Küsten- und Flusspegeln nicht ausschließlich die natürlichen Schwankungen des Wasserstandes der Nordsee abzulesen sind, sondern dass die Pegelaufzeichnungen auch die Wirkung wasserbaulicher Maßnahmen beschreiben. Es gibt es kaum noch „homogene“ Pegelaufzeichnungen, die nur die Wirkung von geophysikalischen Veränderungen in Wasserstand und Sturmtätigkeit beschreiben.

Tektonische Hebungen bzw. Senkungen von Landmassen sind weitere Prozesse, die unabhängig vom anthropogenen Klimawandel die Höhe des (relativen) Meeresspiegels beeinflussen können. Im Bereich der Deutschen Bucht sinken die Landmassen - verbunden mit einem relativen Anstieg des Meeresspiegels - seit dem Ende der letzten Eiszeit in einer Größenordnung von ca. 10 -15 cm/100 Jahre.

Über die Jahrhunderte hat sich die Strategie des Küstenschutzes längs der deutschen Nordseeküste stark verändert. War er zu Beginn der Siedlungsgeschichte eher passiv und individuell – man gab überflutete Flächen auf und zog sich auf höher gelegenes Gebiet zurück oder passte sich mit dem Bau von Wurten (Dithmarschen) und Warften (Nordfriesland) an – rückte im 2. Jahrtausend n. Chr. die Strategie der gemeinschaftlichen Verteidigung oder gar der Gewinnung von Landflächen immer mehr in den Mittelpunkt. Im 13. Jahrhundert entstand so allmählich eine lange zusammenhängende Deichlinie entlang der Nordseeküste, ab dem 16. Jahrhundert wurde Neuland in den sog. Kögen hinzugewonnen (Petzelberger, 2000).

Eine historische Übersicht der Entwicklung des Küstenschutzes und des Küsteningenieurwesens ist bei NieMeier et al. (1995) beschrieben wurden. In den letzten Jahrzehnten hat sich das Leitbild des Küstenschutzes erneut verändert. Unterschiedliche und untereinander konkurrierende Nutzungsansprüche sollen einer „nachhaltigen Nutzung“ des Naturraums Rechnung tragen. Oberste Priorität des modernen Küstenschutzes ist jedoch nach wie vor „der Schutz von Menschen und ihren Wohnungen durch Deiche und Sicherungswerke“ (Generalplan Küstenschutz, 2001).

Mit dem sog. Bemessungswasserstand, der für jeden Deichabschnitt separat ermittelt wird, wird versucht, ein Kompromiss zu finden zwischen vernünftiger Vorsorge und Schutz von Menschen, Siedlungen und Sachwerten auf der einen Seite und einem Restrisiko, der Versagenswahrscheinlichkeit, auf der anderen Seite. Eine absolute Sicherheit gegen Überflutung können Deiche jedoch nicht bieten. Dies wird zum einen der Tatsache geschuldet, dass es sich bei einem Deich um ein technisches Bauwerk handelt. Technische Bauwerke unterliegen ausnahmslos einer mit größer als Null zu bestimmenden Versagenswahrscheinlichkeit. Zum anderen sind die Ursachen, die eine schwere Sturmflut auslösen, ein zufälliges Zusammentreffen von mehreren Ereignissen: starke Stürme, die in Bezug auf Stärke, Zugbahn, Häufigkeit und Dauer Zufallereignisse sind. Eine schwerste denkbare Sturmflut lässt sich, so im „Generalplan Küstenschutz“ des Landes Schleswig-Holstein (S.24) nachzulesen, nicht ermitteln. Es handelt sich also um keine absolute Sicherheit, sondern „eine im Rahmen des Machbaren (wirtschaftlich und technisch) höchstmögliche Sicherheit“ (ebd.).

Die Ostsee bietet ein historisches Beispiel für die Existenz eines Restrisikos (Rosenhagen und Bork, 2009). Am 13. November 1872 gab es in der westlichen Ostsee eine Sturmflut, die mit etwa 3.30 m über NN in Travemünde weit höher auflief als alle anderen Sturmfluten seit dem Beginn der Aufzeichnungen (1826) – die zweithöchste Flut war etwa 2,20 m in Travemünde, mit vielen schweren Fluten zwischen 1,50 m und 2,00 m. Die 1872er Flut stellt einen markanten „Ausreisser“ dar, der auf das synchrone Auf-

treten mehrerer negativer Faktoren zurückzuführen ist (weitere Details, siehe Rosenhagen und Bork, 2009)

## **5. Küstenschutz und Klimawandel an der deutschen Nordseeküste**

In der Einleitung sind wir schon kurz darauf eingegangen, dass der menschengemachte Klimawandel die Bedrohung durch Sturmfluten verändern kann – genauer gesagt vergrößern kann. In diesem Abschnitt werden wir zunächst der Frage nachgehen, inwieweit sich die Verhältnisse derzeit ändern, und dann, wie sich die Zukunft in den kommenden 100 Jahren perspektivisch darstellt.

### **c) Gegenwärtiger Wandel**

Der 3. und der 4. Sachstandsbericht des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) beschreibt einen breiten Konsensus in der Klimawissenschaft, dass erstens die globale gemittelte Lufttemperatur seit vorindustriellen Zeiten (z.B. 1850) um ca.  $0.7^{\circ}\text{C}$  gestiegen ist, und dass ca.  $2/3$  der Erwärmung seit der vorindustriellen Zeit bis heute vom Menschen verursacht sei und nur ca.  $1/3$  natürlichen Ursprungs (Houghton et al., 2001; Solomon et al., 2007; vgl. auch Bray (2010)). Die stärksten Erwärmungen treten dabei in den vergangenen 3 Jahrzehnten auf – konsistent mit dem starken Anstieg der atmosphärischen Konzentration der Treibhausgase. Die „global gemittelte Temperatur“, abgeleitet aus Thermometermessungen, liegt seit 126 Jahren vor; in den letzten 17 Jahren (vor 2006) lagen dabei die 13 höchsten durch Thermometermessungen belegte Jahreswärmen. Die Wahrscheinlichkeit für ein solches Ereignis ist, wenn keine systematische Erwärmung vorliegt, kleiner als ein Promille (Zorita et al., 2010). Es ist also äußerst unwahrscheinlich, dass die jüngste Erwärmung Ausdruck normaler Klimaschwankungen ist. Auch Bereich der Nordsee sind die regionalen Temperaturen der Luft und des Wassers ähnlich wie die global gemittelte Lufttemperatur deutlich angestiegen (von Storch und Claussen, 2010).

Es ist aber keinesfalls so, dass deshalb auch Änderungen in allen anderen Größen ebenfalls zu  $2/3$  durch menschliche Tätigkeiten zu erklären sind bzw. in dieser Größenordnung auftreten müssten. Insbesondere im Falle unserer „heimischen“ Stürme ist bisher keine Änderung auszumachen, die über die historischen belegten Schwankungen, die unabhängig von menschlicher Aktivität sind, hinausgehen (von Storch und Claussen, 2010; BACC author team, 2008). Dies belegen u.a. Statistiken von Zeitserien täglicher Barometermessungen, die teilweise bis zu Napoleons Zeiten zurückgehen (Bärring und von Storch, 2004).

Wie schon erwähnt, steigt der regionale Meeresspiegel in der Nordsee an – parallel zum globalen Meeresspiegel, aber eine Beschleunigung, wie sie eigentlich aufgrund der beschleunigten Erwärmung seit den 1970er Jahren zu erwarten wäre, ist für dieses Randmeer bisher nicht festzustellen (Albrecht et al., 2011). Die Situation wird zusammengefasst durch eine Statistik der Hochwasserbeobachtungen am Pegel Cuxhaven in Abbil-

Abbildung 5. Der lokale mittlere Meeresspiegel zeigt einen stetigen Anstieg, in den verschiedene Faktoren wie Landsenkung, Anstieg des globalen Meeresspiegels und Wirkungen von wasserbaulichen Maßnahmen eingehen, von 20 cm in den letzten 160 Jahren. Die hohen Abweichungen von dem jährlichen Mittel (in rot) sind im Wesentlichen Sturmfluten geschuldet; diese schwanken von Jahr zu Jahr und von Jahrzehnt zu Jahrzehnt, zeigen aber keine generellen Aufwärts- oder Abwärtstrend; in beiden Kurven findet man insbesondere am Ende der Zeitserien, wenn man erwarten könnte, dass der menschengemachte Klimawandel durchschlägt, keine systematischen Änderungen.

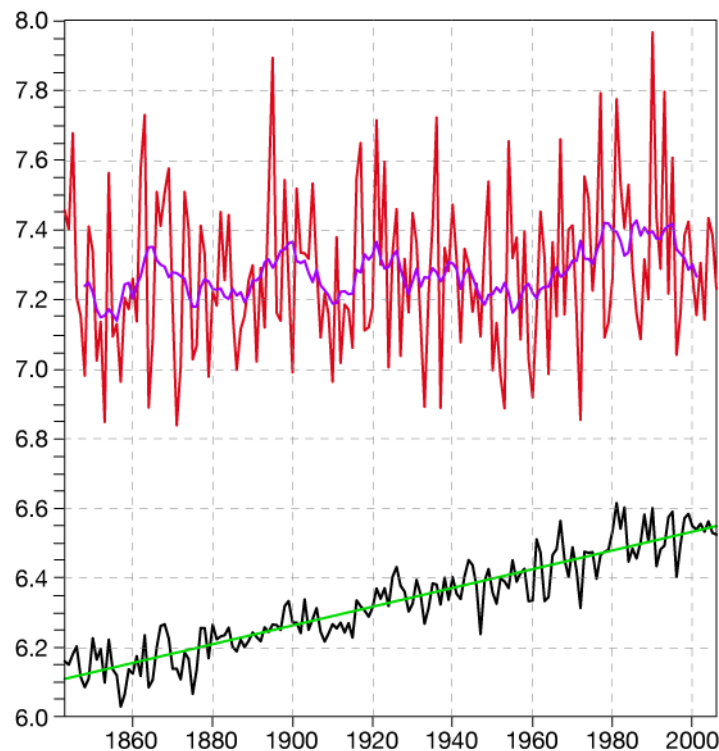


Abbildung 5: Entwicklung zweier jährlicher Maßzahlen am Pegel Cuxhaven: unten: jährlich mittleres Tidenhochwasser (schwarz; ein Maß für den mittleren Meeresspiegel am Ort Cuxhaven); oben: 99.5 Perzentil der Tidenhochwasser innerhalb eines Jahres nach Abzug des unten gezeigten mittleren Tidenhochwassers (rot; ein Maß für die Sturmfluttätigkeit am Ort Cuxhaven). (Weisse und von Storch, 2009)

#### d) Zukünftig möglicher Wandel

Die Klimazukunft kann nicht wirklich vorhergesagt werden, abgesehen von sehr generellen Angaben, wie das es wärmer wird und der Meeresspiegel steigen wird. Stattdessen wird die Szenarientechnik eingesetzt, mit der mögliche, plausible, dynamisch konsistente aber nicht notwendigerweise wahrscheinliche Zukünfte beschrieben werden. Die Methode wird im Allgemeinen beschrieben von von Storch und Meinke (2011); für den Fall der Sturmfluten sei auf Woth (2005) bzw. Woth und von Storch (2008) verwiesen.

Der vierte IPCC-Klimabericht aus dem Jahr 2007 beschreibt einen Meeresspiegelanstieg zwischen 0,2 und 0,8 Metern bis zum Jahr 2100 als plausibel (Houghton et al. 2001, Solomon et al., 2007). Besonders schwierig und problematisch sind in diesem Zusammen-

hang die Abschätzungen des Beitrages durch schwindendes Inlandseis auf Grönland und in der Antarktis. Hier werden in Zukunft – etwa im 5. Sachstandsbericht des IPCC in 2014 - zuverlässigere Angaben erwartet.

Regionale Abweichungen von diesen global berechneten Mittelwerten sind wahrscheinlich. Für die niederländische Küste haben Katsman et al. (2011) als höchsten plausiblen, dynamisch konsistenten Anstieg den Wert von 1.05 m bis zum Ende des 21. Jahrhundert abgeschätzt. Diesen Wert kann man plausiblerweise auch für die deutsche Nordseeküste ansetzen.

Einigen Sturmflutszenarien zufolge könnte bei extremen Sturmfluten am Ende dieses Jahrhunderts in der Deutschen Bucht das Wasser um 20 bis 40 cm höher auflaufen. Der Klimawandel würde also zu deutlich höheren und daneben auch länger anhaltenden hohen Wasserständen an einigen Küstenabschnitten, regional in unterschiedlicher Ausprägung, führen (Woth, 2005). Andere Abschätzungen gelangen zu kleineren Zahlen (Weidemann et al., 2011)

## 6. Sturmflutrisiko und der Umgang damit

Ob jedoch ein seltenes Naturereignis auch gleichzeitig zu einer Katastrophe für ein Land und deren Bewohner wird, ist nicht nur von der Stärke und des Verlaufs der physikalischen Ursachen abhängig. Ein Naturereignis wird vor allem durch gesellschaftsrelevante Aspekte zu einer Katastrophe. Die Risikokultur spielt eine Rolle, ebenso wie die narrative Verarbeitung von Ereignissen in der Vergangenheit.

Eine bessere wirtschaftliche Ausgangslage des Staates hat in der Regel ein besseres Vorsorge- und Schutzsystem zur Folge. Aber auch kulturelle Aspekte spielen eine bedeutende Rolle. So wird den beigemessenen Werten von Immobilien, Industrien, Infrastruktur etc. in westlichen Industriestaaten eine stärkere Bedeutung zugesprochen und somit auch dem Erhalt dieser Werte, als in z.B. ohnehin ärmeren Staaten in Südasien.

Im Bereich der Deutschen Bucht ist das Bewusstsein um die Gefahren von Sturmfluten sehr ausgeprägt und wird durch den öffentlichen Diskurs aufrecht erhalten. Die Auslegung der Schutzbauwerke – vor allem Deiche – ist Gegenstand einer breiten gesellschaftlichen Debatte.

Bauwerke, die der Sicherung der Küste dienen, werden auf mehrere Jahrzehnte ausgelegt und geplant. Bei dieser auf große Unsicherheiten basierenden Planung bedingen die sich langfristig verändernden Wasserstände und der kurzfristig eintretenden extremen Wasserstände einer Sturmflut neue Bemessungsverfahren für die Landesschutzdeiche. Dies sei hier am Beispiel von Schleswig-Holsteinischen Landesregierung skizziert.

Basierend auf den oben genannten IPCC-Abschätzungen eines Anstiegs des mittleren Meeresspiegels um 0,2 – 0,8 Metern bis zum Jahr 2100 werden schon heute Deichverstärkungen mit einem „Klimazuschlag“ von 0.5 m durchgeführt. In einer Reihe von neueren Veröffentlichungen (z.B. Katsman et al., 2011) werden die Abschätzungen aus dem IPCC Bericht jedoch nach oben hin regional auf eine Bandbreite von bis 1.05 m bis zum

Jahr 2100 erweitert. Die Bandbreite der Unsicherheiten, welche sowohl den unterschiedlichen Modellierungsmethoden als auch den Annahmen über die Zukunft zugrunde liegen, werden nicht kleiner sondern größer und erschweren die Planung der Küstenschutzler zusätzlich. Nicht nur die Schleswig Holsteinische Landesregierung setzt in dieser Situation pragmatisch auf eine „no-Regret“ Lösung.

Um den Anforderungen einer Planung gerecht zu werden, die auch ohne den Klimawandel schon mit großer Unsicherheit behaftet ist, hat die Schleswig-Holsteinische Landesregierung ein neues Konzept der Deichverstärkung entwickelt. Dieses Konzept sieht neben der regelmäßigen Prüfung der Sicherheit der Landesschutzdeiche und der gegebenenfalls darauf folgenden Neubemessung des Deichabschnittes nun eine Verbreiterung der Deichkrone von 2,5 auf 5 Metern vor und eine einheitliche flache Neigung der Außenböschung (Abbildung 6). Dies hat nun zwei deutliche Vorteile: Zum einen wird die Wellenenergie bei dem Auftreffen von hohen Wasserständen durch die flache Böschung gebremst, was die Widerstandsfähigkeit der Deiche deutlich erhöhen wird. Zum anderen aber wird durch die Verbreiterung der Deichkrone eine potentielle Nachverstärkung des Deiches erleichtert. Ist erst einmal diese Basis geschaffen, kann mit relativ geringem Aufwand eine Erhöhung des Deiches erfolgen, sobald klarer zu erkennen ist, wie stark der Meeresspiegel tatsächlich in den kommenden Jahrzehnten ansteigen wird oder ob sich die Höhe und Andauer und Häufigkeit von Sturmfluten in der Deutschen Bucht deutlich ändern wird.

Eine andere Anpassungsmaßnahme, um mit zukünftig verschärften Risiken im Bereich der Unterelbe umzugehen, stellt das „Tideelbeprojekt“ dar, womit durch wasserbauliche Maßnahmen eine Dämpfung der Energie der in die Elbe eintretenden Gezeiten und auch Sturmfluten realisiert werden soll, um die früher induzierten Erhöhungen von Tiden und Sturmfluten teilweise rückgängig zu machen (vgl. Abbildung 4; von Storch et al., 2010).

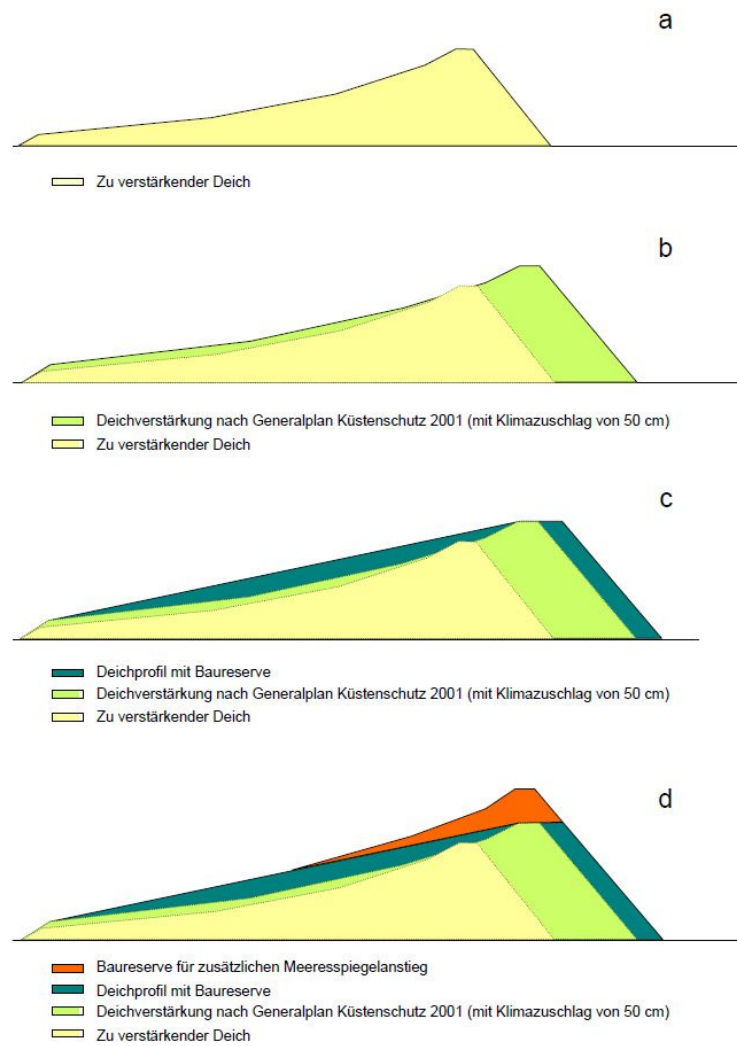


Abbildung 6: Anpassung vorhandener Deiche in Schleswig Holstein an die Perspektive eines signifikanten Meeresspiegelanstieges (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein, 2009). Mit freundlicher Genehmigung des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein.

## 7. Literatur

BACC author team, 2008: *Assessment of Climate Change in the Baltic Sea Basin.*, Springer Verlag Berlin - Heidelberg; ISBN 978-3-540-72785, 473 pp

Bärring, L. und H. von Storch, 2004: Northern European Storminess since about 1800. *Geophys. Res. Letters* 31, L20202, doi:10.1029/2004GL020441, 1-4

Bray, D., 2010: The scientific consensus of climate change revisited. *Env. Sci. Pol.* 13: 340 – 350

Fritz, H.M., C.C. Blount, S. Thwin, M.K. Thu, und N. Chan, 2009: Cyclone Nargis storm surge in Myanmar, *Nature Geoscience* 2:448-449, doi:10.1038/ngeo558.

Gönnert, G., S.K. Dube, T.S. Murty und W. Siefert, 2001: Global Storm Surges: Theory, Observations and Applications. *Die Küste* 63.

Heyer, E. , 1993 : *Witterung und Klima.* - Teubner, Leipzig.

Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, X., K. Maskell, und C.A. Johnson, 2001: *The Scientific Basis.* Cambridge University Press, Cambridge, 944 pp.

Katsman, C.A., A. Sterl, J.J. Beersma, H.W. van den Brink, J.A. Church, W. Hazeleger , R.E. Kopp, D. Kroon J. Kwadijk, R. Lammersen, J. Lowe , M. Oppenheimer, H.-P. Plag, J. Ridley, H. von Storch, D.G. Vaughan, P. Vellinga, L.L.A. Vermeersen, R.S.W. van de Wal und R. Weisse, 2011: Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta - the Netherlands as an example. *Climatic Change*, DOI: 10.1007/s10584-011-0037-5

Liljequist, G.H., und K. Cihak, 1979: *Allgemeine Meteorologie.* 385 S., 2. verbesserte Aufl., Braunschweig, Vieweg

Lowe, J.A., Philip L. Woodworth, T. Knutson, R. E. McDonald, K. L. McInnes, K. Woth, H. von Storch, J. A. Wolf, V. Swail, N. B. Bernier, S. Gulev, K. J. Horsburgh, A. S. Unnikrishnan, J. R. Hunter, und R. Weisse, 2010: Past and Future Changes in Extreme Sea Levels and Waves. In: J.A. Church, P.L. Woodworth, T. Aarup und W.S. Wilson (eds): *Understanding Sea-level Rise and Variability*, Wiley-Blackwell, 326-375

Meier, D., 2008: *Schleswig-Holsteins Küsten im Wandel – von der Eiszeit zur globalen Klimaerwärmung.* Boyens, Heide.

Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holsteins (MLR) (Hrsg.) (2001): *Generalplan Küstenschutz – Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein.* Kiel.

NieMeier, H.D., H. Eiben, und H. Rohde, 1996: History and heritage of German Coastal Engineering. In: N. Kraus (ed.): *History and Heritage of Coastal Engineering.* ASCE, New York, 1996

Petersen, M. und H. Rohde (1977): *Sturmflut. Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe.* Wachholtz Verlag, Neumünster.

- Petzelberger, B.E.M., 2000: Coastal development and human activities in NW Germany. In Pye, K. and J.R.L. Allen (eds): *Coastal and Estuarine environments: sedimentology, geomorphology and geoarchaeology*, Geological Society, London., Special publication, 175, 365-376
- Rosenhagen, G., und I. Bork, 2009: Rekonstruktion der Sturmflutwetterlage vom 13. November 1872, *Die Küste* 75: 51-70
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M.M.B. Tignor, H. Le Roy Milller jr., und Z. Chen (eds), 2007: *Climate change 2007. The physical basis*. Cambridge University Press, 996 pp.
- von Storch, H., M. Claussen und KlimaCampus Autoren Team, 2010: *Klimabericht für die Metropolregion Hamburg*, Springer Verlag Heidelberg Dordrecht London New York, DOI 10.1007/978-3-642-16035-6, 321 pp
- von Storch, H., G. Gönnert, und M. Meine, 2008: Storm surges – an option for Hamburg, Germany, to mitigate expected future aggravation of risk. *Env. Sci. Pol.* 11: 735-742
- von Storch, H., und I. Meinke, 2011: Klimaszenarien und mögliche Entwicklungen in Deutschland. in: Gebhardt, H., R. Glaser, U. Radtke und P. Reuber (Hrsg.): *Geographie - Physische Geographie und Humangeographie*, 2 Aufl., Spektrum Verlag, Heidelberg, im Druck
- von Storch, H. und K. Woth, 2008: Storm surges, perspectives and options. *Sustainability Science* 3; 33-44; DOI 10.1007/s11625-008-0044-2
- Syvitski, J., A. J. Kettner, I. Overeem, E. W. H. Hutton, M. T. Hannon, G. R. Brakenridge, J. Day, C. Vörösmarty, Y. Saito, L. Giosan und R. J. Nicholls, 2003: Sinking deltas due to human activities. *nature geoscience* doi: 10.1038/ngeo629
- Weidemann, H., R. Weisse and I. Grabemann, 2011: Statistisch regionalisierte Sturmflut-szenarien für die deutsche Nordseeküste. eingereicht (*Die Küste*)
- Weisse, R., und H. von Storch, 2009: *Marine Climate & Climate Change. Storms, Wind Waves and Storm Surges*. Springer Praxis Books, 200 p., ISBN: 978-3-540-25316-7
- Woth K., 2005: Projections of North Sea storm surge extremes in a warmer climate: How important are the RCM driving GCM and the chosen scenario? *Geophys. Res. Lett.* 32, L22708, doi: 10.1029/2005GL023762
- Woth, K. und Hans von Storch, 2008: Klima im Wandel: Mögliche Zukünfte des Norddeutschen Küstenklimas, *Dithmarschen Landeskunde - Kultur - Natur*, 1/2008, 20-31
- Zorita, E., T. Stocker und H. von Storch, 2008: How unusual is the recent series of warm years? *Geophys. Res. Lett.* 35, L24706