



Das Risiko von Extremsturmfluten in Ästuaren angesichts globalen Klimawandels

Gabriele Gönnert & Sigrid Thumm

Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg (LSBG), Germany

Abstract

Climate Change will cause a rise of the sea level and probably more frequent and more violent storm surges. This has serious consequences for the safety of people as well as for their values and assets behind the dikes. It is therefore inevitable to first assess how sea level rise and an extreme storm surge event designs. In a second step it is possible to determine the risk for specific locations and develop strategies.

The joint research project XtremRisk – Extreme storm surges at open coasts and estuarine areas: Risk assessment and mitigation under climate change aspects, funded by the German Federal Government will help answering these questions. The „Source-Pathway-Receptor“ concept will be used as a basis for risk analysis and development of new strategies.

The project offers methods to assess the development of extreme events under the conditions of today. Building on this foundation it tries to design extreme events under conditions reflecting the climate change.

1 Einleitung

Neben dem Anstieg des mittleren Meeresspiegels gehören häufigere und verstärkte Sturmfluten zu den unausweichlichen Folgen des Klimawandels in Küsten- und Ästuargebieten (IPCC 2007). Angesichts des langsamen Meeresspiegel-Anstiegs und der besseren Möglichkeiten zur Anpassung besteht die erste Aufgabe darin, die Folgen der Zunahme extremer Sturmfluten hinsichtlich der Häufigkeit, Intensität und Verweildauer für den Insel-, Küsten- und Hochwasserschutz abzuschätzen, um mögliche Katastrophen abzuwenden. Die Dringlichkeit, den lokalen Folgen des globalen Klimawandels in Form von veränderten Sturmflutverhältnissen vorausschauend und präventiv zu begegnen, ergibt sich unmittelbar daraus, dass Küsten- und Ästuargebiete weltweit bevorzugte Siedlungs- und Wirtschaftsräume sowie Räume wertvollster Ökosysteme unseres Planeten darstellen und daher als vorrangig gefährdet gelten.

Die Ausarbeitung verlässlicher Handlungsempfehlungen und konkreter Gegenmaßnahmen im Sinne einer nachhaltigen Anpassung stößt noch auf folgende Wissenslücken und Schwierigkeiten:

1. Zu große Unsicherheiten bei den langfristigen Prognosen der lokalen Auswirkungen des globalen Klimawandels, insbesondere hinsichtlich der meteorologisch bedingten Komponenten der Risikoquelle "Sturmflut" (Windstau und Seegang). Dies ist vor allem auf das Fehlen verlässlicher lokaler Klimamodelle mit der entsprechenden Auflösung sowie auf das Fehlen geeigneter Modelle zur Sturmflut- und Seegangsvorhersage unter langfristig veränderten küstenmorphologischen (Bathymetrie) und sozio-ökonomischen Bedingungen (Landnutzung) zurückzuführen.
2. Das Fehlen von prozessorientierten, wissenschaftlich fundierten Modellen für die Vorhersage langfristiger und großräumiger morphologischer Veränderungen im Küstenraum, die nicht nur alle Komponenten der Sturmflut - und somit die Bemessungswasserstände -, sondern auch den Bemessungsseegang maßgeblich beeinflussen. Insbesondere werden die Bemessungswellenhöhen im Küstenbereich vorwiegend durch die Wassertiefe und die Sohlneigung bestimmt

(Brechkriterien), so dass große Unsicherheiten auch bei der Vorhersage des Bemessungsseegangs unvermeidlich sind.

- Das Fehlen grundlegender Kenntnisse darüber, wie der Sturmflutverlauf und Seegang in einer bislang von der Natur noch nicht ausgespielten Kombination zu (Sturmflut-) Szenarien zusammengeführt werden können, bei denen es zu inakzeptablen gesamtwirtschaftlichen Schäden kommt ("Perfekte Sturmflut").

Das Schließen der o.g. Wissenslücken und die Schaffung der erforderlichen grundlegenden Kenntnisse und Methoden, die es ermöglichen, wissenschaftlich fundierte Vorhersagemodelle zu entwickeln und die damit verbundenen Unsicherheiten verlässlich abzuschätzen, werden wahrscheinlich mehr als zehn Jahre in Anspruch nehmen (Oumeraci 2004).

Seit dem 1. Oktober 2008 wird daher ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziertes Verbundprojekt durchgeführt, in dem Wissenschaftler der Universitäten Siegen, Braunschweig, Hamburg - Harburg sowie des Landesbetriebs für Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Hocine Oumeraci des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig das Auftreten und die Auswirkungen extremer Sturmfluten analysieren.

Aufgrund der hohen Variabilität der Einflussparameter, der Stochastik der verschiedenen Prozesse und deren Wechselwirkungen sowie der o.g. Modell-Unsicherheiten werden neben den Unsicherheitsanalysen (z.B. Monte-Carlo-Simulation, Latin-Hypercube-Sampling) auch systematische Sensitivitätsanalysen für die Untersuchung der relativen Bedeutung der Einflussparameter sowie der praktischen Implikationen für die abzuleitenden Handlungsempfehlungen durchgeführt.

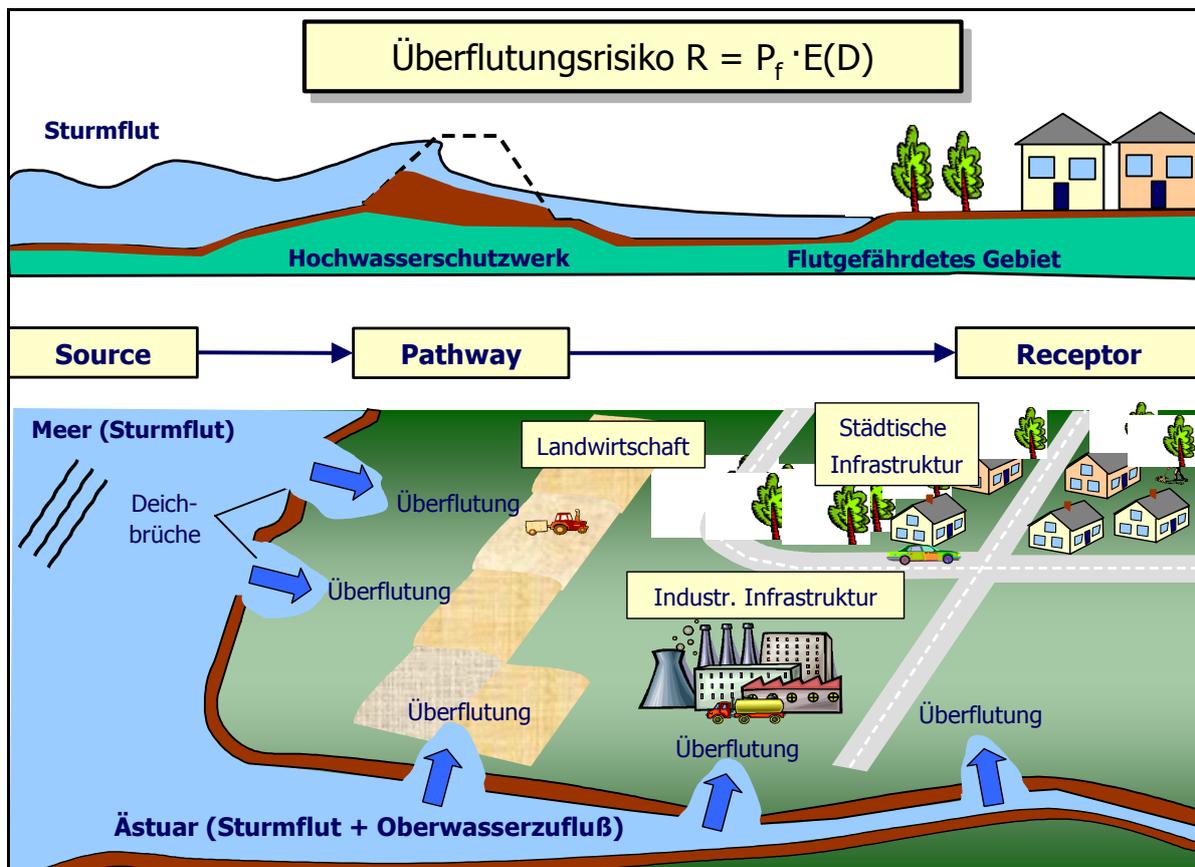


Abb. 1: "Source-Pathway-Receptor" Konzept (Oumeraci 2009)

Zu diesem Zweck wird das "Source-Pathway-Receptor"-Konzept (Abb. 1) als Grundlage für ein integriertes Vorgehen für die Risikoanalyse und das Risikomanagement offener Küsten und eines Ästuargebietes, die durch Extremsturmfluten im Klimawandel gefährdet sind, herangezogen. Das gesamtheitliche Vorgehen erfordert vier Teilprojekte, die sich jeweils mit der Risikoquelle, den Risikowegen, den Risikoempfängern sowie deren Integration befassen.

Für die Implementierung der vier Teilprojekte werden zwei Untersuchungsgebiete, die Insel Sylt und die Stadt Hamburg, ausgewählt.

Grundlage der Untersuchung ist die Risikoquelle, d.h. die Sturmflut in ihrer möglichen Höhe und ihrem möglichen Verlauf. Im Folgenden werden am Beispiel für Hamburg die Vorgehensweise zur Ermittlung eines extremen Sturmflutverlaufes und die hierzu wichtigen Faktoren aufgezeigt. Für die empirische Analyse muss für Hamburg der Pegel Cuxhaven verwendet werden. Für die Charakterisierung von Sturmfluten ist es essentiell wichtig eine lange, ungestörte Zeitreihe vorliegen zu haben. Durch anthropogene Eingriffe wie Eindeichungen und Fahrrinnenanpassungen wurde das Regime der Elbe verändert. Somit liegt für den Pegel Hamburg keine ungestörte Zeitreihe vor. Diese Maßnahmen haben deutlich geringeren Einfluss auf die Pegelstände am Pegel Cuxhaven, so dass hier von einer quasi ungestörten Zeitreihe gesprochen werden kann. Deshalb bildet dieser Pegel die Grundlage der Untersuchung. Für die Entwicklung der Sturmflut von Cuxhaven die Elbe hinauf nach Hamburg wird die dort berechnete Sturmflut über numerische Modellrechnungen elbaufwärts bis nach Hamburg berechnet.

2 Sturmflutdefinition

Zu Beginn einer jeden Untersuchung zum Thema Sturmfluten stellt sich stets die Frage: "Was ist eine Sturmflut?" Ein Sturm kennzeichnet sich durch starke Winde. Eine Flut ist ein hoher Wasserstand. Demnach ist eine Sturmflut ein durch starke Winde erzeugter hoher Wasserstand.

Neben dieser allgemeinen Umschreibung des Begriffes Sturmflut gibt es in der Praxis und in der Forschung verschiedene Ansätze zur Definition von Sturmfluten. Für die Deutsche Bucht mit dem Bezugspegel Cuxhaven sei hier zum einen die anwenderbezogene Definition des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie zu nennen. Ab einem Wasserstand von 150 cm über dem mittleren Tidehochwasser (MThw) wird öffentlich vor Sturmfluten gewarnt, da ab diesem Wasserstand die ersten Schutzmaßnahmen (z.B. Sielverschlüsse) ergriffen werden müssen (Müller-Navarra 2008). Nach DIN 4049 gilt ein Wasserstand mit einer jährlichen Häufigkeit von 10 bis 0,5 als Sturmflut. Dieser statistische Grenzwert ergibt sich für den Pegel Cuxhaven zu 150 cm über MThw (DIN 4049-3 1994).

Neben diesen beiden scheinwertbezogenen Definitionen wird hier eine physikalisch basierte Definition bevorzugt. Eine für den Pegel Cuxhaven erstellte Definition stammt von Siefert (1968): Das Ereignis Sturmflut wird über die Höhe des Windstaus definiert. Der Windstau ist die Differenz zwischen dem vorausberechneten und dem eingetretenen Wasserstand. Es liegt ein Sturmflutereignis vor, wenn der Windstau zu irgendeiner Tidephase 200 cm beträgt. Die Definition wurde von Gönnert (2003) um das Kriterium des BSHs (MThw + 150 cm) erweitert, „weil nur die Wasserstände ausgewählt werden sollen, auf die eine bestimmte minimale Energieeinwirkung Einfluss genommen hat“. Diese Definitionen berücksichtigen, dass die maximalen Windgeschwindigkeiten eines Sturmes unabhängig von der Tidephase auftreten.

Für die vorliegende Arbeit wurde eine physikalisch-phänomenologische Definition gewählt. Zunächst wurde der Frage nachgegangen „Was ist ein Sturm?“. Nach der Beaufort-Skala werden Windgeschwindigkeiten ab 17 m/s als Sturm bezeichnet. Für den Pegel Cuxhaven liegt die sturmflutrelevante Windrichtung zwischen 230° und 350° (Gönnert 2003). Ein Abgleich dieser meteorologischen Randbedingungen in der Deutschen Bucht mit den Ereignissen des Kollektivs „Windstau größer 200 cm zu irgendeiner Tidephase“ von 1901 bis 2008 zeigte, dass 70 % der erfassten Ereignisse zusammen mit einem Sturm auftraten. Bei den restlichen 30 % der registrierten Ereignisse

kann der erhöhte Wasserstand durch die Überlagerung von Fernwellen und Windstau aus starken jedoch nicht stürmischen Winden zustandekommen. Um für die kontinuierliche Fortschreibung des Kollektivs die Auswahl der Ereignisse mit geringem Datenaufwand digital zu ermöglichen, wurde überprüft, mittels welcher Grenzwerte bezogen auf die statistischen Scheitelwerten MThw und MTnw diese physikalisch definierten Ereignisse gefiltert werden können. Die Definition für Sturmfluten am Pegel Cuxhaven ergibt sich nach diesen Auswertungen zu:

Am Pegel Cuxhaven liegt eine Sturmflut vor, wenn der Wasserstand die Grenzwerte 150 cm über dem MThw oder 190 cm über dem MTnw überschreitet.

Das physikalisch-phänomenologisch hergeleitete Kriterium, dass der Wasserstand 150 cm über dem MThw eintreten muß, deckt sich mit den zuvor erläuterten Definitionen des BSHs, der DIN 4049 und von Gönnert (2003). Das Verhältnis der beiden ermittelten Überschreitungsgrenzen 150 cm / 190 cm, welche dem Windstau zum entsprechenden Zeitpunkt entsprechen, beträgt 79 %. Die Länderarbeitsgruppe (1988) ermittelte durch Abgleich der eingetretenen Windstauhöhen ein mittleres Verhältnis des Windstaus von MThw zu MTnw von 73 %. Somit wird dieses Verhältnis bestätigt.

Über die hier hergeleitete Definition treten nach wie vor rund 70 % der Ereignisse zusammen mit Stürmen auf. In den anschließenden Analysen werden die verbleibenden 30 % der Ereignisse mit betrachtet, da bei der Ermittlung der Extremereignisse jegliche wasserstandserhöhenden Faktoren untersucht werden müssen. Zudem wird an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass, obwohl die Definition scheinwertbasiert ist, im Folgenden die gesamte Windstaukurve analysiert wird, da eine Sturmflut nicht nur über ihren Scheitelwasserstand sondern auch über ihre gesamten Kurvenform charakterisiert werden muss.

3 Sturmflutkomponenten

Aus der Betrachtung der Sturmflutdefinitionen geht hervor, dass der Scheitelwasserstand einer Sturmflut nicht nur meteorologisch bedingt ist. Vielmehr setzt er sich aus den Komponenten vorausberechnete astronomische Tide, Fernwelle, Windstau und Seegang zusammen (Abb. 2).

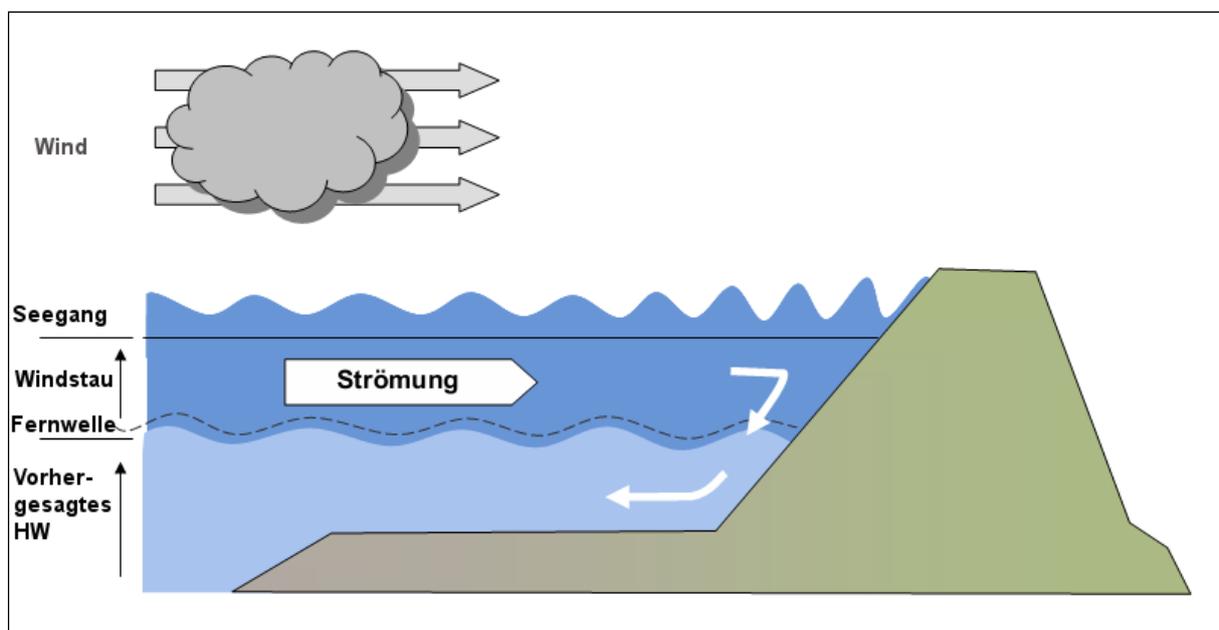


Abb. 2: Komponenten einer Sturmflut

Bei der Untersuchung von Sturmfluten liegt der vorhergesagte Wasserstand zugrunde. Dieser kann, muss aber nicht durch eine Fernwelle aus dem Atlantik überlagert werden. Durch ein Sturmtief über der Deutschen Bucht werden die Wassermassen an die Küste gedrängt. Aufgrund der behinderten Strömung staut sich das Wasser auf. Diese Wasserstandserhöhung über den vorhergesagten Wasserstand hinaus wird Windstau genannt. Der erhöhte Wasserstand wird am Betrachtungsort von dem durch lokale Winde erzeugten Seegang überlagert.

3.1 Astronomische Tidekurve

Die astronomische Tidekurve gibt die periodische Schwingung des Meeres wieder, die verursacht wird durch das Zusammenwirken von Schwer- und Fliehkräften, die bei der Bewegung des Mondes um die Erde und der Erde um die Sonne entstehen. Bei Neu- und bei Vollmond verstärken sich die Gezeiten bedingt durch die Überlagerung der Gezeitenkräfte von Mond und Sonne zur Springtide. Bei Halbmond werden die Gezeitenkräfte des Mondes zum Teil von der Sonne aufgehoben, es entsteht die flachere Kurve der Nipptide.

Die mittlere Tidekurve ist die Ganglinie der arithmetisch gemittelten, einander zur Tidephase entsprechenden Wasserstände mehrerer Tidekurven für einen bestimmten Ort über eine bestimmte Zeitspanne (DIN 4049-3 1994), zumeist der letzten fünf Jahre. Dabei werden Tidekurven unterschiedlicher Mondphasen gemittelt, so dass die Differenzen von Spring- und Nipptide nicht mehr erkennbar sind.

Bisher wurde für Untersuchungen zu Sturmfluten am Pegel Cuxhaven die mittlere Tidekurve verwendet. Diese Auswahl wurde aus rein pragmatischen Gründen getroffen: Die mittlere Tidekurve ist eine mit relativ geringem Rechenaufwand erzeugbare statistische Größe (Siefert 1968). Daneben bilden die mittleren Verhältnisse gut die mittlere physikalische Wechselwirkung Sturmflut – Tide ab, so dass sie einen guten Anhaltswert über die Stauentwicklung im jeweiligen Gebiet geben. (Siefert 1992)

Die astronomische Tidekurve für jeden beliebigen Tag zu berechnen stellte in der Vergangenheit eine große Herausforderung an mathematischem Können und Zeitaufwand dar. Inzwischen stehen Programme zur Verfügung, mit denen die Berechnung der astronomischen Tidekurve mit vergleichbarem Aufwand durchgeführt werden kann. Auf diese Weise wird es möglich, den astronomischen Einfluss von der Windwirkung formal zu trennen. Zudem erlaubt es empirische Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Tide und Sturmflut. Somit besteht nun die Möglichkeit die auf Basis der mittleren Tidekurve ermittelten Anhaltswerte zum Charakter von Sturmfluten hinsichtlich der physikalischen Wechselwirkungen detaillierter zu untersuchen.

Zur Berechnung der astronomischen Tidekurve gibt es zwei verschiedene Verfahren, die harmonische Synthese der Gezeiten und das nonharmonische Verfahren. Diese beiden Verfahren unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre räumlichen Anwendungsbereiche. Mittels der harmonischen Synthese kann der gesamte Verlauf der astronomischen Tidekurve berechnet werden. Dies ist jedoch nur für tiefes Wasser möglich, da die Flachwassereffekte nicht berücksichtigt werden können (Müller-Navarra 2008). Astronomische Kenngrößen, die diese Effekte beinhalten, können mit dem nonharmonischen Verfahren berechnet werden. Es können allerdings lediglich die Höhe und die Eintrittszeit der astronomischen Hoch- und Niedrigwasser bestimmt werden.

Harmonische Synthese der Gezeiten

Die sichtbare Gezeitenbewegung setzt sich im Detail aus vielen einzelnen Tidekurven zusammen. Diese einzelnen Komponenten werden Partialtiden genannt. Dabei ist eine Partialtide „nichts weiteres, als eine Sinusfunktion, die über Frequenz f , Amplitude A und Phase φ beschrieben werden kann“ (Kastens 2007). Die Frequenzen f der Partialtiden sind aus der Lehre von den Bewegungen des Mondes und der Sonne bekannt und für jeden Ort gleich. Die Amplitude und die Phase hingegen sind ortsabhängig und können aus Zeitreihen der Wasserstände mittels der Harmonischen Analyse

abgeleitet werden. Die Harmonische Analyse der Gezeiten ist eine spezielle Form der Fourierzerlegung einer Zeitreihe (BAW 2008) und beruht auf der Zerlegung der Gezeiten in ihre streng periodischen harmonischen Partialtiden (BSH 2008).

Sind die Amplituden und Phasen der einzelnen Partialtiden an einem Ort bekannt, kann mittels der Harmonischen Synthese, d.h. Summation aller Partialtiden, eine Vorhersage des Wasserstandes für einen vorgegeben Zeitraum erfolgen (BAW 2008).

Nonharmonisches Verfahren

Mit dem Nonharmonischen Verfahren können für Orte mit halbtägiger Gezeit die Eintrittszeiten und Höhen der Hoch- und Niedrigwasser vorausberechnet werden. Hierbei werden die Meridiandurchgangszeiten des Mondes mit den mittleren Hoch- und Niedrigwasser-Intervallen sowie den Ungleichheiten in Höhe und Zeit verrechnet. Gegebenfalls können Verbesserungen zur Berücksichtigung von lokalen Besonderheiten mit einbezogen werden (BSH 2008).

Zur Abschätzung von Höhen und Zeiten zwischen den nonharmonisch ermittelten Hoch- und Niedrigwassern wird zu Zwecken der Schifffahrt vom BSH zum einen eine graphische und zum anderen eine rechnerische Einspannung der mittleren Spring- und Nipptidekurven zwischen dem Hoch- und Niedrigwasser empfohlen. Verfahrensbedingt können diese Werte bis zu 10 cm voneinander abweichen (BSH 2008).

Verknüpfung der Verfahren

Für die wissenschaftliche Analyse von Sturmflutereignissen ist eine Ungenauigkeit von 10 cm zu hoch, so dass für die hier dargestellten Ergebnisse das harmonische mit dem nonharmonischen Verfahren mathematisch verknüpft wird. Diese Verknüpfung erfolgt dadurch, dass die harmonisch berechnete astronomische Tidekurve zwischen die nonharmonisch ermittelten Hoch- und Niedrigwasserwerte linear eingehängt wird. Hierdurch erhalten sowohl die zum jeweiligen Zeitpunkt wirkenden gezeitenverursachenden Kräfte sowie die lokalen Reibungs- und Reflektionsanteile Berücksichtigung (Thumm & Gönnert 2009).

3.2 Fernwelle

Fernwellen entstehen durch Änderungen des Luftdrucks, die bei schnell ziehenden Tiefdruckgebieten über dem nördlichen Atlantik in Form von stark ausgeprägten Luftdruckgradienten auftreten. Dies führt zu einer Veränderung des Wasserspiegels in Form einer sowohl an der Oberfläche sichtbaren Welle, als auch einer internen Welle im Wasserkörper. Unabhängig zur Tidephase und ohne periodische Regelmäßigkeit laufen diese Wellen, ähnlich einer Tidewelle und in Abhängigkeit der Zugbahnen der Tiefdruckgebiete in die Nordsee ein (Gönnert 2003).

Das die Fernwelle auslösende Tief und das sturmflutverursachende Tief können ein und dasselbe Tief jedoch auch zwei meteorologisch von einander unabhängige Ereignisse sein. Das bedeutet, dass Fernwellen und Sturmfluten getrennt von einander aber auch zeitgleich auftreten können.

Anhand von Analysen von Aufzeichnungen des BSHs aus 20 Beobachtungsjahren (1971-1995, nicht 1974-1978) wurden 15 Fernwellen mit einer Höhe von 60 cm und mehr ermittelt. Die höchste Fernwelle erreichte ein Maximum von 109 cm. Jede fünfte bis sechste Sturmflut tritt zeitgleich mit einer Fernwelle größer 60 cm ein. Sie erreichen in Cuxhaven in etwa die Höhe der in Aberdeen einlaufenden Fernwellenhöhen mit Schwankungen von etwa +/- 20 % (Gönnert 2003).

3.3 Windstau

Für die Ermittlung extremer Sturmfluten ist es wichtig zu verstehen, wie sich eine Sturmflut zeitlich entwickelt. Dieses ist nur bedingt über den Scheitelwasserstand zu erfassen, da in diesem der windinduzierte Wasserstand von der zugrunde liegenden Tide überdeckt wird. Von Interesse ist also

die Betrachtung des Windstaus, der die Differenz zwischen dem eingetretenen und dem vorausgerechneten Wasserstand ist. Er spiegelt den zeitlichen Verlauf und die Höhe der in den Wasserkörper eingetragenen Energie und somit den physikalischen Wert einer Sturmflut wieder. Der Windstau am Pegel Cuxhaven wird maßgeblich durch die Windverhältnisse in der Deutschen Bucht geprägt. Desweiteren enthält er Einflüsse aus dem statischen Luftdruck, Änderungen des Luftdrucks, Wassertemperatur und Temperaturdifferenz Luft-Wasser. (Siefert 1968, Gönnert 2003)

Für die Charakterisierung einer Sturmflut sind drei Merkmale der Windstaukurve von Interesse: Die Höhe des Windstaumaximums, dessen Lage zur Tidephase und der Windstauverlauf. Durch die Höhe eines Windstaumaximums kann der Energieeintrag des Windes erfasst werden, durch die Eintrittszeit des Windstaumaximums und die Kurvenform die Auswirkungen auf den absoluten Wasserstand. (Gönnert 2003)

Bei bisherigen Untersuchungen für den Pegel Cuxhaven basiert die Windstauberechnung auf der mittleren Tidekurve. Diese Untersuchungen umfassen ein Kollektiv, das alle Sturmfluten seit 1901 beinhaltet, die 200 cm Windstau und einen Scheitelwasserstand größer MThw + 150 cm erreichten. Bis 2008 umfasst das Kollektiv 259 Sturmflutscheitel. Sie bilden die Grundlage für die Bemessung des Hochwasserschutzes entlang der Elbe.

Das diesem Projekt zugrunde liegende Kollektiv wird auf Basis der astronomischen Tidekurve berechnet, da es erklärtes Ziel des Projektes ist, nicht nur die Sturmflutkurve, die alle Einflüsse auf den Wasserstand umfasst, sondern auch die Einzelkomponenten und deren Wechselwirkungen physikalisch zu untersuchen.

Werden Untersuchungen, die die Grundlage für den Schutz eines großen Lebensraumes sind, auf veränderter Basis erstellt, muss eine Gegenüberstellung der Ergebnisse erfolgen, so dass erkennbar wird, inwieweit sich maßgebende Grenzwerte bzw. Schlüsselereignisse verändert darstellen.

Zum Erlangen eines ersten Überblickes über die Unterschiede zwischen den auf verschiedenen Tidekurven basierenden Windstaukurven wurden die Windstaumaxima der erfassten Sturmfluten mit einander verglichen. Es wurden für jede Sturmflut die Windstaukurve basierend auf der astronomischen und der mittleren Tidekurve berechnet und jeweils die Höhe und die Eintrittszeit des Windstaumaximums erfasst. Des Weiteren wurden die Höhenabweichungen der Windstaumaxima und die Unterschiede ihrer Eintrittszeiten ermittelt.

Im Durchschnitt liegt das Maximum der Windstaukurve basierend auf der astronomischen Tidekurve 6,5 cm niedriger als das Maximum der Windstaukurve basierend auf der mittleren Tidekurve. Die Abweichungen liegen insgesamt zwischen -59 cm und +51 cm. Die Hälfte der Windstaumaxima weisen eine Differenz von ± 15 cm auf. Die maximalen Abweichungen treten zum einen bei Sturmfluten auf, bei denen die Windstaumaxima zeitnah zu den vorausgerechneten Hoch- und Niedrigwasserzeiten eintreten, so dass die am Pegel Cuxhaven durch Spring- und Nipptide bedingten Unterschiede in den Tidekurven in den Windstaumaxima wiederzuerkennen sind. Zum anderen ergeben sich die maximalen Abweichungen im Bereich der Tideäste, da die astronomische Tidekurve bedingt durch die täglichen Ungleichheiten auch in diesen Bereichen von der mittleren Tidekurve abweicht.

Die zeitliche Differenz zwischen den Eintrittszeiten der Windstaumaxima beträgt zu 90 % ± 90 Minuten. Bei Windstaukurven mit langen Scheitelbereichen kann ein großer zeitlicher Versatz der Windstaumaxima von bis zu 3 Tidezyklen entstehen. Detaillierte Betrachtungen zeigen jedoch, dass es sich hier um in der Höhe variierende Spitzen der Scheitelbereiche handelt, die auch jeweils in der anderen Windstaukurve zu erkennen sind. Es handelt sich nicht um neu ausgeprägte Windstauscheitelbereiche.

Die beiden Sturmfluten, die bei Berücksichtigung der mittleren Tidekurve den höchsten Windstau um Tnw bzw. Thw aufwiesen, wurden aufgrund der neuen Untersuchungen nicht von anderen Ereignissen abgelöst. Das Windstaumaximum lag jedoch in beide Fällen höher als die bisher bekannten Werte, so

dass die für den derzeitigen Bemessungswasserstand relevante Windstauhöhe von 385 cm auf 400 cm angehoben werden müsste.

Ergänzende statistische Analysen der beiden so entstandenen Kollektive haben gezeigt, dass sich die statistischen Verteilungsfunktionen über die Jährlichkeit nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Dieses Ergebnis ist plausibel, da es erklärtes Ziel der Statistik ist, die mittleren Abweichungen auszugleichen, dies bedeutet, dass auch die Statistik auf Basis der astronomischen Tidekurve Auskunft über die mittleren Verhältnisse gibt. (Mudersbach & Jensen 2009)

Analysen von Gönnert (2003) haben ergeben, dass die Höhe des Windstaumaximums von der Anstiegsneigung der Windstaukurve abhängt. So können z.B. am Pegel Cuxhaven extrem hohe Windstaumaxima (> 390 cm) nur bei sehr steilem Windstauanstieg entstehen, am Pegel Helgoland sind hierfür flache, langsame Antiege nötig. Desweiteren ist bekannt, dass der maßgebende Einfluss auf die Form der Windstaukurve bei einer gewissen Windgeschwindigkeit von der Tidekurve auf den Wind übergeht (Bremer & Gönnert 2009). Zudem hat ein Vergleich der Windstaukurven auf Basis der astronomischen und der mittleren Tidekurve ergeben, dass die astronomisch basierte Windstaukurve die Windverhältnisse wesentlich besser widerspiegelt (Abb. 3) (Gerkenmeier 2009).

Diese Ergebnisse zeigen, dass es relevante Unterschiede in der Kurvenform gibt. Diese Unterschiede liefern plausible Indizien dafür, dass die Betrachtung eines Sturmflutereignisses basierend auf der astronomischen Tidekurve physikalisch exakter ist.

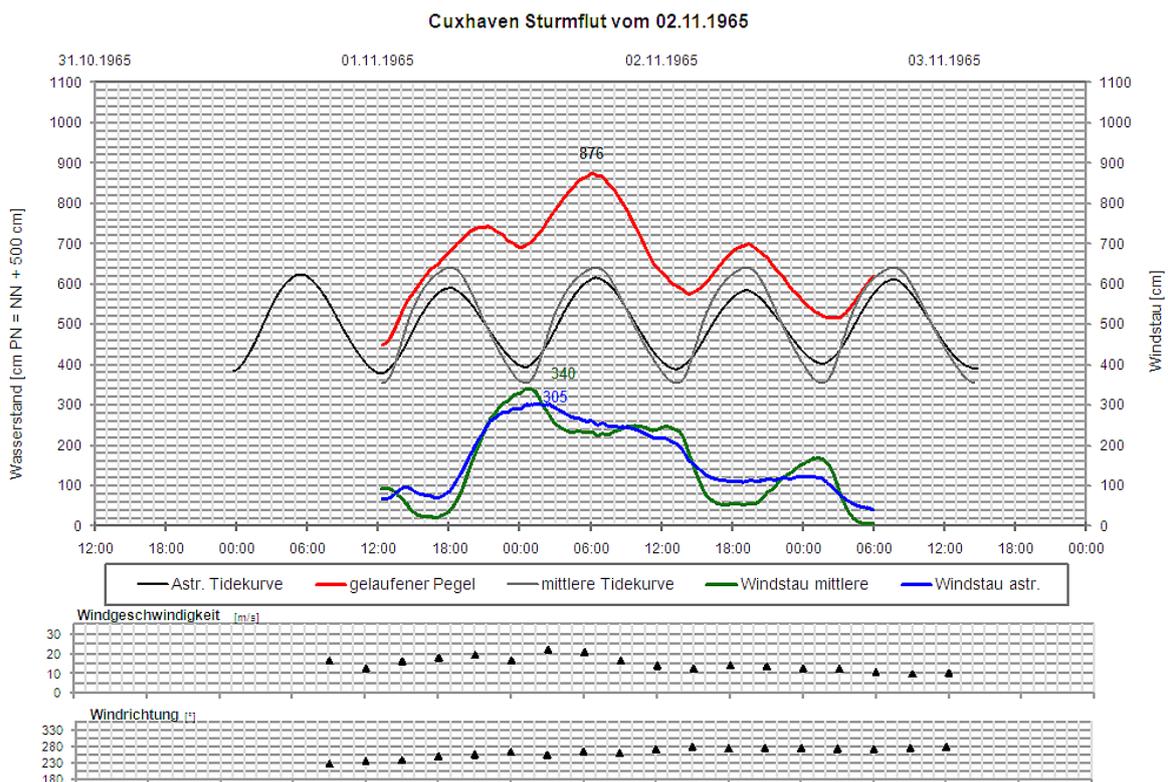


Abb. 3: Vergleich des Windstaus auf Basis der astronomischen und mittleren Tidekurve am Beispiel der Sturmflut vom 02.11.1965 (Gerkenmeier 2009)

3.4 Seegang

Der Seegang wird vom lokalen Wind verursacht. Da die vorliegenden Untersuchungen am Pegel Cuxhaven die Grundlage für die Sturmfluten im 130 km elbaufwärts liegenden Hamburg sind, werden diese lokalen Effekte momentan nicht mit untersucht. Für die letztendlichen Untersuchungen der extremen Sturmfluten in Hamburg werden die dortigen Seegangsbedingungen miteinbezogen.

4 Überlagerung der Sturmflutkomponenten

Eine Wasserstandserhöhung an der Küste entsteht durch die behinderte Rückströmung (Abb. 2). Das Ausmaß der Behinderung hängt von der über die Höhe des Wasserkörpers wirkenden Sohlreibung ab. Bei niedrigem Wasserstand hat die Sohlreibung eine größere aufstauende Wirkung als bei hohen Wasserständen. Aufgrund dieser grundlegenden physikalischen Prozesse bei der Entstehung einer Sturmflut ist davon auszugehen, dass sich die Einzelkomponenten einer Sturmflut nicht linear überlagern. Ziel dieser Untersuchungen ist es herauszufinden, wie sich diese Einzelkomponenten bei zeitgleichem Auftreten gegenseitig beeinflussen.

Untersuchungen zur Fragestellung, wie sich eine Fernwelle auf den Windstau auswirkt, ergaben, dass die zugrundeliegenden Datenauswertungen des BSHs keine ausreichende Grundlage für physikalisch plausible Untersuchungen bilden. Bei der Bestimmung der Fernwellenhöhen wurde mittels der Windbedingungen ein statistisch ermittelter Windstau von dem gemessenen Wasserstand abgezogen. Somit ist bei den zugrunde liegenden Daten unklar, inwieweit die Verläufe des berechneten Windstaus und der berechneten Fernwelle die vorliegenden Prozesse physikalisch korrekt widerspiegeln.

Da bekannt ist, dass der Windstau an der Küste durch die behinderte Rückströmung entsteht, also bei konstantem Wind bei niedrigem Wasserstand höher ist als bei hohem Wasserstand, kann davon ausgegangen werden, dass beim Zusammentreffen einer Sturmflut mit einer Fernwelle, die Komponenten des Windstaus kleiner und die der Fernwelle größer sind als vom BSH berechnet.

Aus verschiedenen numerischen Untersuchungen ist bekannt, dass eine Springtideerhöhung im Vergleich zu einer mittleren Tide bei schweren Sturmfluten nur eine geringe bis hin zu gar keine Auswirkung auf den Sturmflutscheitel hat (Dick 2000; Mayerle et al. 2009).

Erste Ergebnisse von zurzeit noch andauernden empirischen Untersuchungen im Rahmen des Projektes zeigen, dass bei der Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Wind und Windstau die zum betrachteten Zeitpunkt vorausberechnete Tide für die Höhe des Windstaus nicht relevant ist. Vielmehr ist analog zu den Erkenntnissen, dass für den Windstau der drei Stunden vor dem Betrachtungszeitpunkt vorherrschende Wind maßgebend ist (Siefert 1968), ein diesem Zeitfenster zugrundeliegender Wasserstand in die Betrachtung mit einzubeziehen. Es ist davon auszugehen, dass dieser zugrundeliegende Wasserstand nicht wie bisher angenommen die vorausberechnete Tidekurve sondern der tatsächlich eingetretene Wasserstand ist. Anhand dieser Ergebnisse ist es plausibel, dass eine Springtideerhöhung sich im Scheitelsbereich des Wasserstandes schwerer Sturmfluten nicht niederschlägt, da zu diesem Zeitpunkt und 3 Stunden vorher der vorausberechnete Wasserstand schon um mehr als 300 cm erhöht ist.

Aus diesen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass es für den Verlauf der Windstaukurve, d.h. ihre Anstiegsneigung, welche die Höhe des Windstauscheitels maßgeblich beeinflusst, relevant ist, ob eine Spring- oder eine Nipptide vorliegt. Der Höhenunterschied am Pegel Cuxhaven zwischen den Scheitelwerten von Spring- und Nipptide beträgt bis zu 120 cm, welche sich bei schwachen Winden und niedrigen Windstauwerten im eingetretenen Wasserstand niederschlagen.

Zusätzlich zu diesen Untersuchungen der Physik von Sturmfluten unter heutigen Klimabedingungen sollen im weiteren Verlauf des Projektes die Folgen eines möglichen Klimawandels in Form von Meeresspiegelanstieg und Zunahme der Sturmintensität auf die Entstehung von Sturmfluten betrachtet werden.

Literatur

BAW (2008): Bundesanstalt für Wasserbau: Gezeitenanalyse des Wasserstandes

(www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/kenn/frqw/frqw-de.html, Zugriff vom 16.06.2008).

BSH (2008): Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie: Gezeitentafeln Europäische Gewässer 2008.

- Bremer, J.-A. & G. Gönnert (2009): Das Zusammenwirken von Tide und Sturmflut im Ästuar. In: Vött, A. & H. Brückner (Hrsg.): Beiträge zur 26. Jahrestagung des Arbeitskreises „Geographie der Meere und Küsten“, Marburger Geographische Schriften (MGS), Band 145, Marburg.
- Dick, S. (2000): Die Sturmflut am 03. Dezember 1999, Fallstudien mit dem Windstaumodell des BSH, Vortrag BAW-Kolloquium November 2000, Hamburg.
- DIN 4049-3 (1994): Deutsche Norm: Hydrologie. Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie.
- Gerkenmeier, B. (2009): Zur Interaktion von Tide und Windstau bei Starkwindlagen – Eine erste Grundlagenanalyse über Windstauvergleiche. Universität Bremen, Bachelorarbeit (unveröffentlicht).
- Gönnert, G. (2003): Sturmfluten und Windstau in der Deutschen Bucht. In: Die Küste 67: 185–365.
- IPCC (2007): Climate change (2007): The physical science basis - Summary for policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Genf, Schweiz, 21 p.
- Kastens, M. (2007): Gutachten Tidewasserstandsanalysen in Ästuaren am Beispiel der Unter- und Außenelbe. Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, 72 S.
- Länder-Arbeitsgruppe (1988): Bemessungswasserstände entlang der Elbe. In: Die Küste 47: 31–50.
- Mayerle, R., G. Bruss & R. Osinski (2009): Zwischenbericht zur Untersuchung „Sturmflutsituationen Nordsee“ (unveröffentlicht).
- Mudersbach, C. & J. Jensen (2009): Statistische Analysen zum Windstau am Pegel Cuxhaven, Universität Siegen (unveröffentlicht).
- Müller-Navarra (2008): Sturmfluten und Verfahren zur Berechnung der astronomischen Tidekurve (mündliche Auskunft).
- Oumeraci, H. (2004): Sustainable coastal flood defences: scientific and modelling challenges towards an integrated risk-based design concept. Keynote lecture, Proceedings First IMA International Conference on Flood Risk Assessment, Session 1, Institute of Mathematics and its Applications, Bath, UK, pp. 9–24.
- Oumeraci, H. (2009): Vortrag beim XtremRisk-Workshop März 2009, Hamburg.
- Siefert, W. (1968): Sturmflutvorhersagen für den Tidebereich der Elbe aus dem Verlauf der Windstaukurven in Cuxhaven. In: Mitteilungen des Franzius-Institutes für Grund- und Wasserbau der TU Hannover 30: 1–142.
- Siefert, W. (1992): Zur Windstauentwicklung in der südöstlichen Nordsee. In: Die Küste 53: 1–28.
- Thumm, S. & G. Gönnert (2009): Windstauanalyse: Vergleich der Windstaumaxima basierend auf der astronomischen und der mittleren Tidekurve am Pegel Cuxhaven. Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (unveröffentlicht).

Adresse

Dr. habil. Gabriele Gönnert
Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer
Sachsenkamp 1-3
20007 Hamburg, Germany

gabriele.goennert@lsbg.hamburg.de