

Gabriele GÖNNERT, Hamburg

Sturmfluten und der Umgang mit ihrem Risiko im Elbeästuar

Summary

A storm surge is an abnormal rise of the sea along a shore resulting from, primarily, the high winds in a land falling storm. Storm surges present major natural hazards in Europe, especially along its westward oriented coastlines.

Risk Management in Hamburg is based the devise: maximum possible safety standard for the whole city of Hamburg. The safety standard will be given by the dimension level be used for dimensioning storm surge protection facilities. The catastrophe control contains storm surge alert, resistance and defence of coastal protection facilities as well as probable evacuation of people. Because of this system, Hamburg is protected against an extreme storm surge and against the climate change at the moment. Storm surge research includes the control of tidal protection facilities by means of continuous examination of gauges which themselves are based on analyses and evaluation of the development of storm surge and climate warming, as well as on their influence on storm surge and on the general means sea level development. Examples of each columns will be presented in the following text.

1 Einleitung

Küsten sind Übergangsräume vom Meer zum Land. Sie sind morphologisch, hydrologisch und ökologisch gekennzeichnet durch vielfältige physische Prozesse, die in enger Wechselwirkung mit anthropogenen Faktoren stehen: So leben derzeit ca. 20% der Weltbevölkerung in einem Küstenstreifen bis 25 km landeinwärts. Dementsprechend werden die Küsten intensiv wirtschaftlich genutzt.

Die intensive anthropogene Nutzung bewirkt, dass die Küsten ein hohes Gefahrenpotential gegenüber (extremen) Naturereignissen aufweisen. Diese manifestieren sich vor allem in einem stetig steigenden Meeresspiegel und in einem vermutlich sich wandelnden Sturmregime.

Die Gefahr des Menschen (bzw. der Gesellschaft), einen Schaden zu erleiden, wird häufig mit dem Begriff Risiko gleichgesetzt. Im wissenschaftlichen Kontext wird von vielen Autoren das Risiko unter den Aspekten Eintrittswahrscheinlichkeit und Größe des Schadens betrachtet. Dementsprechend ändert sich die Ausprägung des Risikos mit der Anzahl potenziell betroffener Menschenleben und (Sach-)Werte. Eine Minderung des Risikos kann durch Verringerung der Gefährdung, durch Änderung der Vulnerabilität oder durch verbesserte Verhaltensmaßnahmen im Gefahrenfall erfolgen.

Ziel des Sturmflutschutzes in Hamburg ist die Gewährleistung einer gleichen, größtmöglichen Sicherheit an allen überflutungsgefährdeten Bereichen der Stadt. Die Grundlage für diese Sicherheitsbetrachtung bildet der Bemessungswasserstand, abgeleitet aus einer definierten Bemessungsturmflut. Küstenschutz, orientiert am „abwehrenden“ Bemessungswasserstand, führt in der Regel zu einem linearen Küstenschutz (GISZAS 2004). Er berücksichtigt jedoch zumindest in einem Teilbereich die Klimaänderung über den prognostizierten Meeresspiegelanstieg.

Hamburg hat die Ergebnisse seiner Sturmflutforschung in die Festlegung der Bemessungsturmflut mit stromauf ansteigenden Bemessungswasserständen eingebracht, die am Pegel St. Pauli einen Wert von NN+7,30 m ausweisen. Auf der Grundlage mehrjähriger wissenschaftlicher Untersuchungen an verschiedenen Instituten ist ein neues Bemessungskonzept entwickelt worden, das auf der Grundlage des Bemessungswasserstandes die Wellenwirkung bei Sturmfluten differenziert berücksichtigt und anstelle von *Hochwasserschutz durch gleiche Höhe* als Schutzziel *Hochwasserschutz durch gleiche Sicherheit* definiert. Die Grundlagen wie Sollhöhenbestimmung, Berechnungsansätze, konstruktive Anforderungen und bauliche Möglichkeiten zur Reduzierung des Wellenauflaufes sind in technische Vorschriften eingeflossen.

Die Erfahrung von der Sturmflut 1962 führten dazu, dass nicht nur die baulichen Maßnahmen neu berechnet und erneuert wurden, sondern auch das Katastrophenmanagement reformiert und die Risikowahrnehmung der Bevölkerung durch neue Konzepte verbessert wurden.

Im Folgenden wird die Naturgefahr Sturmflut und seine Genese im Detail dargestellt. Da Sturmfluten ein Risiko für die dort lebende Bevölkerung darstellen, wird am Beispiel von Hamburg das Risikomanagement einer an einem Ästuar gelegenen Metropole vorgestellt.

2 Was sind Sturmfluten?

An den Küsten Europas werden die entscheidenden Naturkatastrophen durch Stürme und Sturmfluten verursacht. Diese beeinträchtigen an der Nordsee vor allem das Leben der Küstenbewohner in Großbritannien, Belgien, den Niederlanden, Deutschland und Dänemark (Abb. 1). Die betroffenen Küstenabschnitte sind gleichzeitig jene, die sehr stark urbanisiert und damit vulnerabel und risikobehaftet sind.

Sturmfluten werden in der Regel definiert als erhöhte Wasserstände über MThw, wobei diese Wasserstände eine bestimmte Häufigkeit nicht überschreiten dürfen. Für die Deutsche Bucht kann somit zurzeit als eine Sturmflut definiert werden, wenn der Wasserstand minst 1,50 m über MThw liegt. Nach der Charakterisierung der Sturmfluten durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrologie (BSH), beläuft sich der Wasserstand einer schweren Sturmflut auf 2,5 m bis 3,5 m über dem MThw. Ab 3,5 m über dem MThw wird von einer sehr schweren Sturmflut gesprochen.

Sturmfluten entstehen durch starken Wind. Sturm kann definiert werden als eine atmosphärische Störung (Tiefdruckzelle oder Zyklone), die sich in starken Winden darstellt, häufig begleitet durch Regen, Schnee oder gar Gewitter. Windgeschwin-

digkeiten werden klassifiziert nach der Beaufort Skala, die von 0 mit Windstille bis 12, dem Orkan mit Windgeschwindigkeiten von 118 km/h und mehr, reicht.

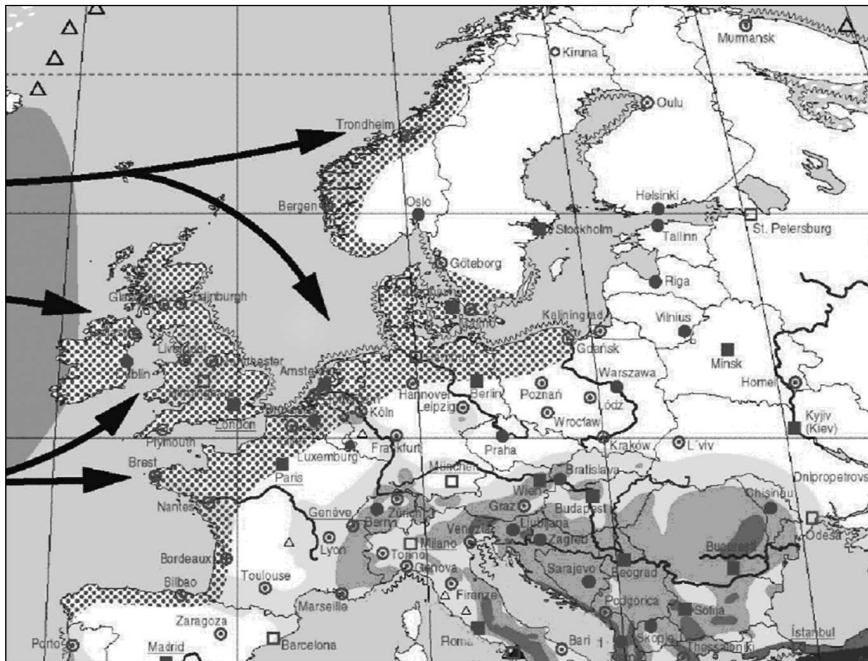


Abb. 1: Signifikante Naturkatastrophen in NW Europa. Signaturen sind übernommen von der Weltkarte der Naturkatastrophen (MUNICH RE GROUP 2006)

Pfeile: Hauptsächliche Sturmzyklonenzugrichtung,
 gepunktete Bereiche: Sturmgefährdete Gebiete,
 gezackte Linie: Sturmflutfährdete Küstenabschnitte.

Für jeden Ort an der Küste gilt eine spezifische Windrichtung, die eine schwere Sturmflut produzieren kann. Abbildung 2 zeigt am Beispiel Cuxhaven, dass hier die kritische Windrichtung bei 270° bis 300° liegt.

Der Wind überlagert die astronomische Tide, die in der Nordsee rechtsdrehend von der englischen Küste über die Niederlande nach Deutschland bis nach Dänemark und Deutschland fortschreitet (Abb. 2). In der Inneren Deutschen Bucht in Cuxhaven erreicht sie einen Tidehub von rund 3 m. Die astronomische Konstellation zum Zeitpunkt einer Sturmflut wirkt auf die Tidehöhe. So kann eine Tide zum Springzeitpunkt rund 50 cm höher auflaufen als eine mittlere Tide, was Einfluss auf den Sturmflutwasserstand hat. Die Differenz zwischen der vorausgerechneten astronomischen Tide und dem eingetretenen Wasserstand wird als Windstau bezeichnet (GÖNNERT et al. 2001) (Abb. 3).

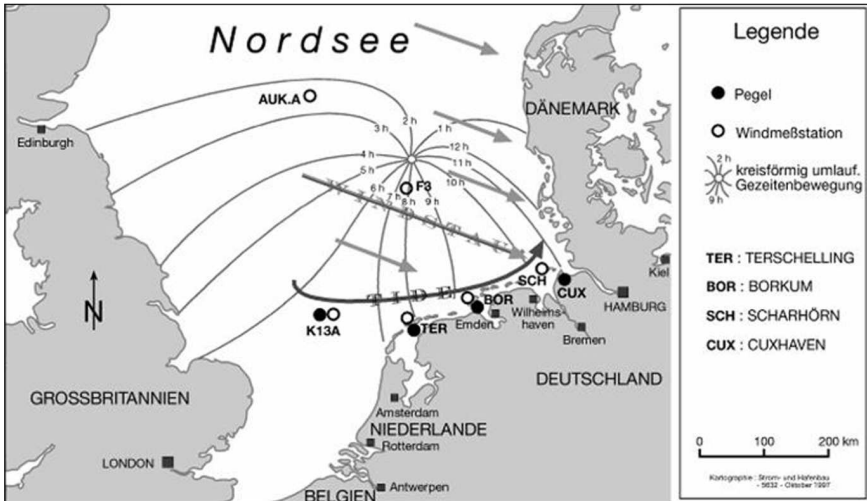


Abb.2: Die Entstehung von Sturmfluten (HAMBURG PORT AUTHORITY)

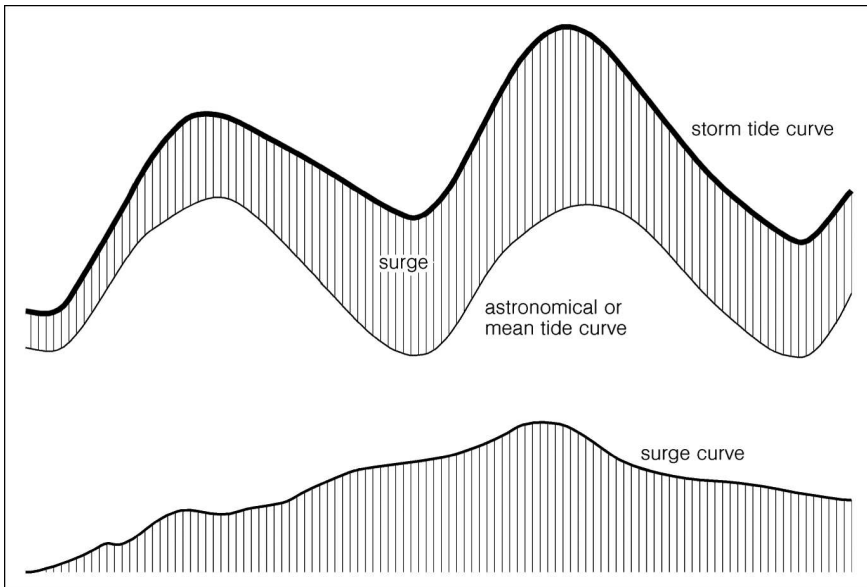


Abb. 3: Der Windstau (GÖNNERT 2004)

Je nach Lage des Windfeldes zur Tidephase hat der Wind unterschiedlichen Einfluss auf den Wasserstand. Bei Tideniedrigwasser kann der Wind eine größere Wirkung auf das Wasser ausüben, was zu höheren Windstaumaxima führt. Ursache ist die Rückströmung in der Tiefe. Bei höherem Wasserstand entsteht eine Rückströmung von der Küste in den Tiefwasserbereich (Abb. 4), so dass der Windstau

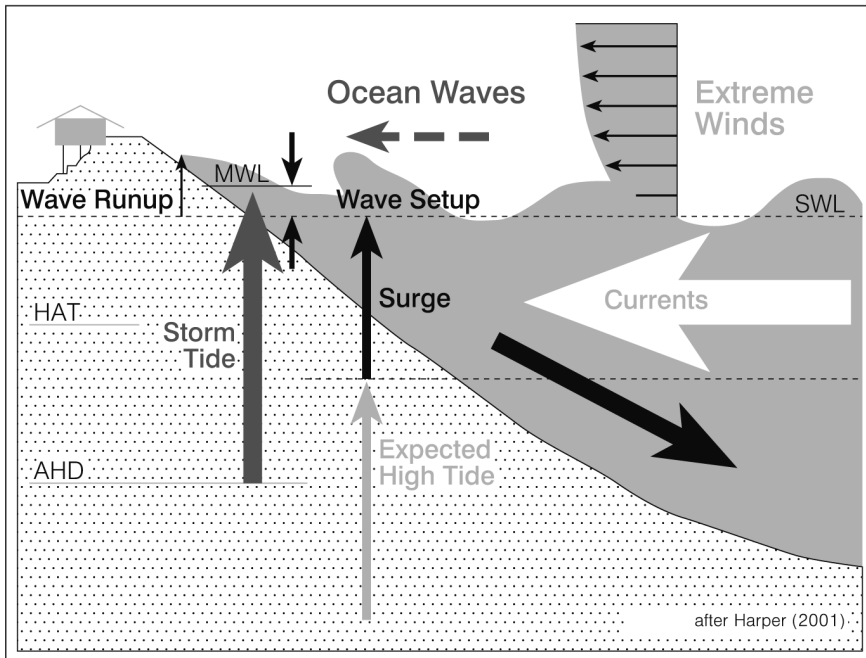


Abb. 4: Entstehung einer Sturmflut (HARPER 2001)

langsamer ansteigen kann. Zudem ist die Windwirkung auf tieferes Wasser geringer. So wird bei Tidehochwasser etwa 10% weniger Windstauhöhe als bei Tide-niedrigwasser erreicht.

Neben dem Wind können die Luftdruckunterschiede über der Nordsee, die Geschwindigkeit der Zugbahn, die Wassertemperatur und die Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser eine Auslenkung der Wassersäule verursachen. Zudem kann starker Regen oder Schneeschmelze in den tidebeeinflussten Oberläufen der Flüsse die Höhe der Sturmfluten beeinflussen. Im Bereich der Mündung in die Nordsee haben diese letztgenannten Faktoren nur noch sehr geringe Auswirkungen. Eine Sturmflut entsteht somit aus der Kombination aus astronomischer Tide, Windstau und Wellenauflauf (Abb. 4).

2.1 Sturmflutwetterlagen einer Sturmflut

Starkwinde in Mitteleuropa entstehen durch Außertropische Zyklone. In den Herbst- und Wintermonaten ziehen sie über den Nordatlantik in Richtung Nordwesteuropa. Wenn ein Tiefdruckgebiet von West oder Nordwest die Nordsee erreicht, entwickelt sich ein Luftstrom. Die Stärke dieses Luftstromes hängt ab von der Drucksituation in der Höhe, der Lage des Tiefdruckgebietes zu seinen benachbarten Hochdruckgebieten, der Lage der Fronten sowie Geschwindigkeit und Richtung des Tiefdruckgebietes. Wenn beispielsweise das Zentrum eines Tiefdruckgebietes nördlich der südlichen Nordseeküste zieht, wird in der südlichen Nordsee ein Wind aus westlicher und nordwestlicher Richtung entstehen, der eine

Sturmflut an diesen Küsten verursachen kann. Tiefdruckgebiete verlaufen in unterschiedlichen Zugbahnen. Dementsprechend entwickeln sie auch an verschiedenen Küstenabschnitten ihre größte Auswirkung. Die meteorologische Situation, die zu einer schweren oder sehr schweren Sturmflut führen kann, kann in drei Typen klassifiziert werden (PETERSEN u. ROHDE 1991) (Abb. 5), hier ergänzt durch einen vierten, den gemischten Typ (GÖNNERT et al. 2001).

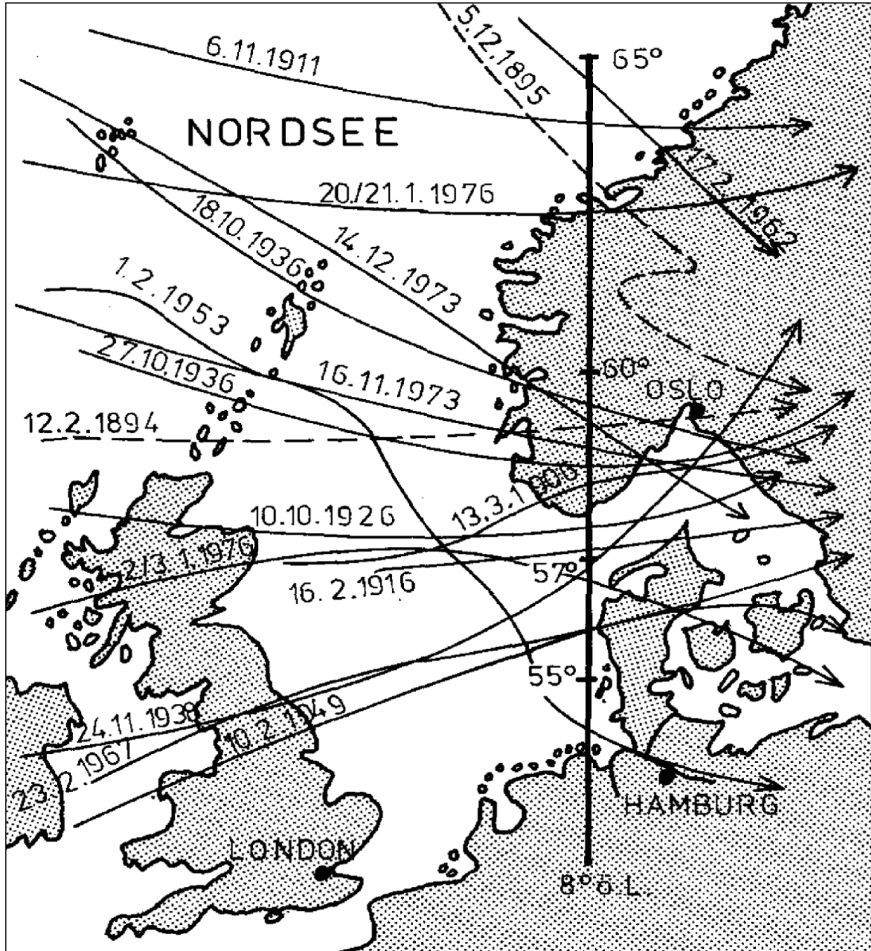


Abb. 5: Sturmtiefs, die eine Sturmflut an den Küsten der Nordsee verursachten (PETERSEN u. ROHDE 1991)

Jütland-Typ

Der Jütland Typ entsteht in der Regel an der nordamerikanischen Küste südlich des 60. Breitengrades, wo der Golfstrom auf den Labrador Strom trifft (PETERSEN u. ROHDE 1991). Tiefdruckgebiete dieses Typs ziehen meist sehr schnell und verursa-

chen für kurze Zeit sehr starke Stürme. Der Wind kommt zunächst aus Südwesten, um dann über Westen nach Nordwesten zu drehen. Die Sturmfluten vom 24.11.1938 (NN +3,50 m Cuxhaven; HH St. Pauli NN +3,53 m), 10.02.1949 (2,91 m NN /Cuxhaven/ 3,80 m NN HH ST. Pauli), 23./24.2.1967 (3,99m NN/Cuxhaven und 4,96m NN HH ST. Pauli) und 3.1.1976 (5,10m NN Cux./ 6,45m NN HH St. Pauli) sowie vom 3.12.1999 (4,56m NN Cux./ 5,95 m NN HH St. Pauli) entsprachen diesem Typ (Abb. 5). Die Windstaukurven sind besonders steil und wenig füllig. Eine solche Windstaukurve kann sehr schwere Sturmfluten hervorrufen, obwohl ihr zeitlicher Windverlauf relativ kurz ist (GÖNNERT et al. 2001).

Skandinavien Typ

Zyklonen dieses Typs entstehen über Grönland und Island. In ihrer Zugbahn ziehen sie dann nach Südosten und überqueren Skandinavien. Sind diese Tiefdruckgebiete kräftig ausgebildet, können sie lang anhaltende Stürme aus Nordwest generieren. Ist ihre Zugbahn sehr langsam oder verweilt das Tiefdruckgebiet eine Zeit lang, wird trotz nicht so hoher Windgeschwindigkeiten die Deutsche Bucht stark mit Wasser gefüllt, so dass auch schwere Sturmfluten verursacht werden können (16./17.2.1962 mit einem Wasserstand in Cuxhaven von 4,95 m NN und 5,70 m NN HH St. Pauli). Die Sturmfluten haben bauchigen/fülligen Windstaukurvenverlauf und können über mehrere Tiden andauern und somit Kettentiden verursachen. Beispiele solcher Sturmfluten sind jene vom 05.–08.12.1895, 05.–06.11.1911 (3,39m NN Cux./ 3,59m NN HH St. Pauli) (Abb. 5) oder aber vom 26.–28.2.1990 (3,28m Cux. und NN/ 5,30m NN HH St. Pauli). Sturmfluten dieses Typs sind relativ selten.

Skagerak Typ

Die Zugbahnen dieses Typs liegen zwischen beiden erstgenannten Typen. Ihre Zugbahn verläuft entlang des 8. Längengrades zwischen dem 57. und 60. Breitengrad. Die Form ihrer Windstaukurve liegt zwischen dem Jütland und Skandinavien Typ und ist somit nicht so füllig wie der Skandinavien Typ aber auch nicht so steil wie beim Typ Jütland. Die Sturmfluten betreffen meist die gesamte deutsche Nordseeküste, sind also nicht lokal eng begrenzt. Sturmfluten dieses Typs sind z.B. 12.02.1894, 13.03.1906 (4,37m NN Cux./ 4,34m NN HH St. Pauli), 13.1. (3,52m NN Cux./ 3,71m NN HH) und 16.02.1916 (4,11m NN Cux/ 4,47m NN HH), 10.10.1926, 18. und 27.10.1936 und vom 16.11.1973 (4,23m NN Cux./ 4,81m NN HH). In den 1990er Jahren kam es zu einer großen Häufung an Sturmfluten (25.01.–01.03.1990), deren Zugbahnen dem Skagerak Typ entsprachen.

Gemischter Typ

Die meisten Sturmfluten werden nicht von einem singulären Typ geprägt. Die Zugbahnen der gemischten Typen sind eine Kombination aus verschiedenen Typen. So ist die sehr schwere Hollandsturmflut vom 01.02.1953 (2,81 m NN Cux/ 3,05m NN HH) ein gemischter Typ. Ausgangslage war der Skagerak Typ. Die Zyklone drehte dann jedoch auf der Höhe zwischen Schottland und Südnorwegen scharf nach Süden ab. Infolgedessen wurde 1953 die deutsche Küste im Gegensatz zu den Niederlanden nicht von einer sehr schweren Sturmflut betroffen, sondern nur von einer schweren Sturmflut.

3 Die Forschung zu Sturmfluten in der Nordsee

3.1 Die Forschungsansätze

Die Sicherheit der Küstenbewohner hängt eng mit den Erkenntnissen über die Sturmflutverläufe und ihre zukünftige Höhe ab. Infolgedessen ist die neueste Sturmflutforschung der entscheidende Faktor für die Sturmflutsicherheit und ein überzeugendes Risikomanagement.

Die Sturmflutforschung lässt sich vom Grundsatz in zwei methodische Ansätze unterscheiden:

1. die empirische Forschung, die die beobachteten Sturmflutcharakteristika analysiert und
2. die dynamische Modellierung.

Die empirische Forschung analysiert die eingetretenen Wasserstände. Zukünftige Scheitelwasserstände werden prognostiziert, indem die beobachteten Wasserstände mit Hilfe von deterministischen Extrapolationsfunktionen über den Datensatz beobachteter Wasserstände hinaus berechnet werden (z.B. JENSEN 2005).

Die Veränderungen von Sturmfluten erfolgen jedoch nicht allein an den höchsten Scheitelwasserständen. Aufgrund von geänderten Windverhältnissen kann sich auch der gesamte Ablauf der Sturmflut verändern, was dann zu einer verstärkten Belastung für die Küstenschutzwerke führen kann. Ein Forschungszweig ist daher die Analyse des gesamten Sturmflutverlaufes über die Windstaukurve (Abb. 3).

Prognosen, die die zukünftige Klimaentwicklung berücksichtigen, können dagegen nur über die dynamische Modellierung erfolgen, da hier die Szenarien etwaiger Erwärmung des IPCC (HOUGHTON et al. 2001) berücksichtigt werden können (WOTH et al. 2006).

3.1.1 Sturmfluten im 20. Jahrhundert in der Nordsee

Veränderungen im gesamten Sturmflutverlauf aufgrund von Klimaerwärmung oder aber anthropogenen Eingriffen in den Naturhaushalt können zu höheren Scheitelwasserständen führen. Die Analysen der Sturmflutverläufe über lange Zeiträume lassen so Vergleiche eines mittleren Sturmflutverlaufes zu Beginn und am Ende des Untersuchungszeitraumes zu und die Berechnung eines sogenannten maximalen Sturmflutverlaufes (GÖNNERT 2003).

Am Beispiel der Pegel Cuxhaven, Norderney, Wittdün und Helgoland werden Sturmfluten in der Nordsee seit 1900 über Parametrisierung in Anstieg, Scheitel und Abfall klassifiziert, und es wird eine maximale Windstaukurve berechnet. Zudem werden sie hinsichtlich Höhe, Häufigkeit und Dauer analysiert. Es wird die entscheidende Windrichtung definiert, die zur Entstehung schwerer und sehr schwerer Sturmfluten führt.

Seit 1901 weisen die Sturmfluten in der Nordsee keinen Anstieg der Scheitelhöhe auf. Dagegen steigt die Häufigkeit seit 1950. Die Dauer der Windstaukurven hat zugenommen. Dies ist zu erklären mit der Zunahme von Einzelereignissen besonders großer Dauer und mit der längeren Dauer einer fiktiven mittleren Sturmflut. Die maximale Windstaukurve gibt den Verlauf einer schweren Sturmflut und ihren maximalen Windstauwert unter bisher eingetretenen Sturmsituationen an (GÖNNERT et al. 2001).

Eine weitere Möglichkeit eine extreme Sturmflut zu kalkulieren, erfolgte von JENSEN (2005). Sie simulierten extreme Sturmflutereignisse für die Deutsche Bucht und berechneten die Eintrittswahrscheinlichkeit. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden vom Deutschen Wetterdienst Wettersituationen bisher eingetretener schwerer Sturmfluten nachgerechnet und erarbeitet, welche weiteren Wettersituationen aus der Ausgangslage dieser Sturmflut möglich gewesen wäre. Diese deutlich höheren aber dennoch physikalisch plausiblen Windverläufe wurden dann für die Modellierung der Wasserstände genutzt, die vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie mit Hilfe ihres Nordseemodells berechnet wurden. Zur Einordnung der Ergebnisse wurden dann Eintrittswahrscheinlichkeiten berechnet.

Ebenso wurden Veränderungen der Sturmflutcharaktere unter Nutzung detaillierter Wettersituationen seit 1958 über der Nordsee von LANGENBERG et al. (1999) und WEISSE u. PLÜB (2006) analysiert. Auf diesem Wege wurden Wasserstände (einschließlich der Tiden) rekonstruiert. Das Modell bildet die gesamte Nordseeküste mit einer hohen Auflösung ab. Sowohl für das mittlere Hochwasser als auch für die höchste jährliche Abweichung vom jährlichen Mittel, konnte eine Zunahme von einigen Zentimetern für die letzten vier Dekaden berechnet werden. Diese Zunahme steht im Zusammenhang mit der Zunahme der Stürme im Zeitraum 1960 bis 1995. Sie ist zu begründen mit der Intensivierung der Nordatlantik Oszillation. Seit 1995 nehmen jedoch die Sturmfluten wieder ab.

3.1.2 Perspektiven für das 21. Jahrhundert

Die numerische Modellierung bietet auch die Möglichkeit der Prognosenbildung über die Sturmflutentwicklung bei einer globalen Erwärmung. GROSSMANN et al. (2006) analysieren die Sturmflutwasserstände aufgrund ansteigender Treibhausgaskonzentrationen. Hierfür wurde ein barotropes Tidemodell genutzt. Grundlage der atmosphärischen Änderungen sind die Szenarien A2 und B2 des IPCC 2001.

Das A2 Szenario simuliert eine heterogene Welt. Es gibt eine Reihe ökonomischer Zentren. Die Mobilität ist eingeschränkt. Dies schlägt sich in unterschiedlichen Fortschrittsgeschwindigkeiten der Industrie- und Entwicklungsstaaten nieder. Globale Umweltprobleme spielen eine untergeordnete Rolle. Regional und lokal wird versucht, Umweltprobleme zu lösen, bzw. zu vermeiden. Regionen mit ausreichenden fossilen Energievorkommen entwickeln energieintensive Technologien. Gebiete, die selbst keine fossilen Energievorkommen haben, wenden sich einer energiearmen Technologie zu.

Das B2 Szenario berücksichtigt hauptsächlich die Parameter Gesundheit, Umweltschutz und Gleichberechtigung. Es gibt ausgedehnte Bildungs- und Gesundheitsprogramme, die zu einer Abnahme der Geburten- und Sterberate führen. Die Urbanisierung nimmt ab. In einigen Gebieten, werden Technologien mit geringem CO₂-Ausstoß entwickelt. Insgesamt wendet sich die Gesellschaft den erneuerbaren Energiequellen zu (HOUGHTON et al. 2001).

Das Ergebnis zeigt, dass die Sturmfluten bis Ende des 21. Jahrhunderts ohne Berücksichtigung des MSL Anstieges rund 30 cm an Höhe zunehmen werden. Dieser Anstieg zeigt sich an allen Küsten der westlichen Nordsee und wird als signifikant bezeichnet (WOTH 2005).

Zusätzlich wurde mit Hilfe einer statistischen Transferfunktion die Entwicklung der Höhendifferenz zwischen dem Gitternetzpunkt des Staumodells bei Cuxhaven und dem Tidepegel Hamburg St. Pauli untersucht. Ziel war es, die zukünftigen klimatischen Bedingungen auf St. Pauli zu übertragen. Die plausible Bandbreite der Höhenzunahme liegt zwischen 12 und 23 cm für den Zeithorizont 2035 und zwischen 48 und 82 cm für den späteren Zeitpunkt 2085. Zu berücksichtigen ist zudem ein prognostizierter Meeresspiegelanstieg von 9 cm (2035, SRES A2/B2) und 29/33 cm für die Szenarien 2085 (SRES A2/B2) (GROSSMANN et al. 2006).

4 Untersuchungen für die Hochwassersicherheit von Hamburg

Die Sturmflutforschung der Hamburg Port Authority unterliegt der eigenen Beobachtung der Sturmfluten und der Betreuung von Forschungsprojekten, um einen für die Weiterentwicklung des Vorhersageverfahrens und der Sicherstellung des Küstenschutzes abgestimmten Erkenntnisgewinn zu erhalten. In diesem Bereich sind Betrachtungen zur Klimaänderung enthalten.

Die HPA-eigene Sturmflutbeobachtung und -forschung impliziert vier große Themenblöcke:

1. Sicherstellung der ausreichenden Bemessung aller baulichen Schutzanlagen durch kontinuierliche Überprüfung der Bemessungswasserstände.
2. Beobachtung der Sturmflutentwicklung aufgrund von anthropogenen, natürlichen oder klimatologischen Veränderungen.
3. Laufende Überprüfung des Sturmflutvorhersageverfahrens.
4. Analyse, wie im Zusammenhang mit Küstenzonenmanagement die Sicherheit der Bevölkerung unter Berücksichtigung der begrenzten räumlichen Verhältnisse einer dicht besiedelten Großstadt wie Hamburg auch zukünftig gewährleistet werden kann.

Zur Darlegung der Absicherung der Hochwasserschutzanlagen in ihrer Höhe, wird zunächst die Berechnung des Bemessungswasserstandes vorgestellt. Im Weiteren wird dann die Sturmflutentwicklung mit Hilfe der Analyse des Sturmflutverlaufes dargelegt.

4.1 Der Bemessungswasserstand

Die Deichhöhe wird ermittelt über einen Bemessungswasserstand. Nach dem AUSSCHUSS FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE (1993, 2002) ist der Bemessungswasserstand „der für einen vorgegeben Zeitraum zu erwartende höchste Wasserstand, auf den eine Hochwasserschutzanlage unter Berücksichtigung des säkularen Meeresspiegelanstiegs ... und des Oberwasserzuflusses zu bemessen ist“. Neben dem Wasserstand ist der durch örtlichen Seegang hervorgerufene Wellenauflauf ein weiterer wichtiger Parameter.

Die Entwicklung des Verfahrens zur Berechnung des Bemessungswasserstandes wurde von einer Arbeitsgruppe der drei Elbanrainer Hamburg, Schleswig-Holstein und Niedersachsen begleitet und gilt für die Elbe von Cuxhaven bis Geesthacht. Die Stadt, die den Eintritt der Elbe in den Ästuartrichter markiert, ist Cuxhaven. Hamburg liegt rund 140 km flussaufwärts.

Das Verfahren basiert auf der Bestimmung einer maßgeblichen Sturmflutkurve für die Elbmündung (Pegel Cuxhaven), deren Höchstwert den Bemessungswasserstand darstellt (SIEFERT 1998). Diese Kurve bildet die Grundlage für die Modelluntersuchung, die für jeden Ort an der Elbe einen Bemessungswert berechnet. Hierdurch ist es möglich, die ungünstigsten Wechselwirkungen zwischen Tide und Windstau auf dem Weg von Cuxhaven bis Hamburg zu erfassen und zusätzliche Aussagen über Verweildauer hoher Zwischenstände und den zeitlichen Ablauf der Sturmflut zu bestimmen (SIEFERT 1998).

Die maßgebliche Sturmflutkurve (Abb. 6) setzt sich zusammen aus:

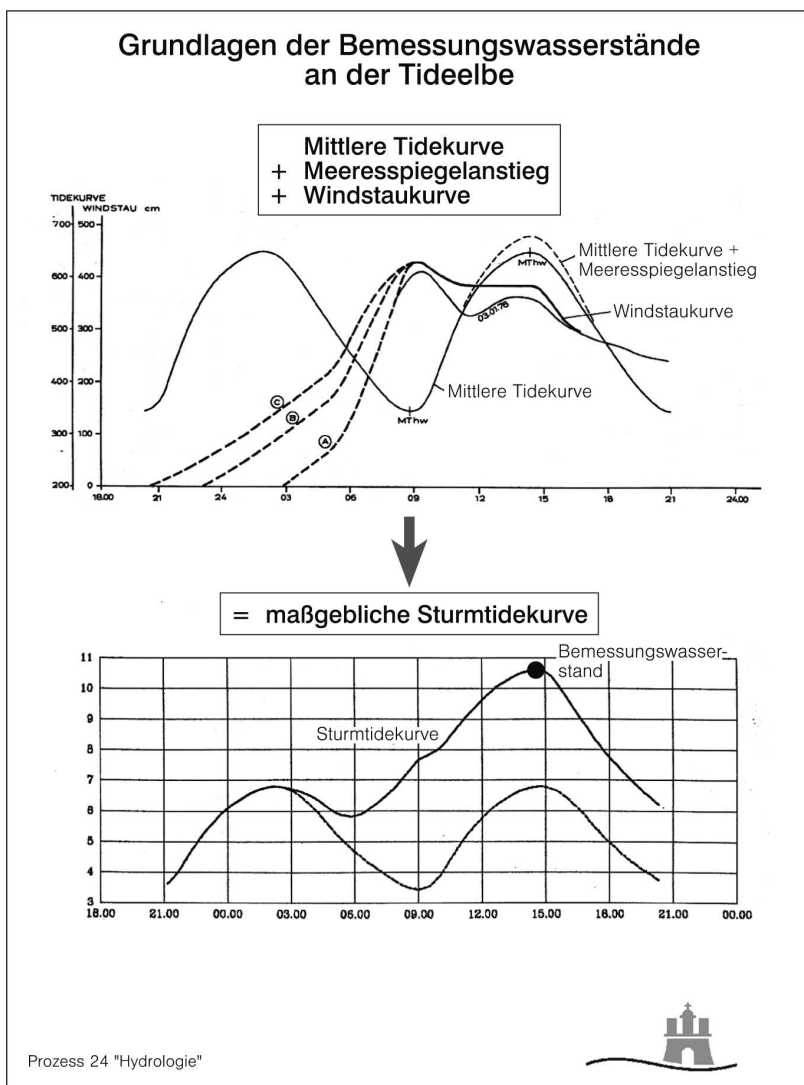


Abb. 6: Maßgebliche Sturmflutkurve für Cuxhaven (SIEFERT 1998)

- den aktuellen Tideverhältnissen (beschrieben durch die mittlere Tidekurve),
- den Säkularveränderungen, gekennzeichnet im Meeresspiegelanstieg,
- den meteorologischen Einflüssen, im wesentlichen dem Windstau,
- den Einflüssen der Schwingungen in der Nordsee, in erster Linie den Fernwellen,
- ergänzt durch zusätzliche astronomische Einflüsse.

Die letzten drei Punkte werden in der Windstaukurve (Abb. 3) zusammengefasst, die zu rund 90% ihrer Beträge aus dem Windeinfluss besteht. Die restlichen 10% bilden die ergänzenden astronomischen Einflüsse (vor allem Spring- und Nipptide) und die Schwingungen der Nordsee. Die mittlere Tide wird hier gewählt, da sie laut SIEFERT (1998) das aktuelle Tidegeschehen am besten repräsentiert. Die mittlere Tidekurve wird gebildet aus dem 10-jährigen Mittel.

Zur Bestimmung der extremen Windstaukurve werden die Sturmflutverläufe in Cuxhaven seit 1900 und die Windstaukurven aller hohen Sturmfluten des 19. Jahrhunderts ausgewertet. Der entscheidende Parameter ist das Windstaumaximum, das bei Thw bislang 375 cm am 16./17.02.1962 erreichte und 430 cm bei Tnw am 23.12.1894. Die Wechselwirkung zwischen Tide und Windstauentwicklung bewirkt, dass der Windstau bei Thw rund 90% der Höhe des Wertes bei Thw erreicht. Für die maßgebliche Windstaukurve wird deshalb der bisher höchste Windstau erfasst und übertragen auf die Bedingungen bei Thw. Wird der Stauwert von 430 cm bei Tnw auf die Situation bei Thw übertragen, ergibt sich eine Höhe von 385 cm. Der weitere Verlauf der Windstaukurve wird rekonstruiert aus einem sehr schweren Sturmflutverlauf in Annäherung an die Sturmflut vom 03.01.1976, deren Verlauf erhöht und verlängert wurde.

Die Säkularentwicklung wird anhand der Trendentwicklung in Cuxhaven festgelegt. In Cuxhaven liegt ein Trend von

1850 bis 1996	1900 bis 2003
22 cm/Jh. im MThw	23 cm/Jh. im MThw
12 cm/Jh. im Mtnw	6 cm/Jh. im MTnw
10 cm/Jh. im MThb	17 cm/Jh. im Mthb

Es wird deshalb ein Säkulartrend von 30 cm/Jh. im Hochwasser und 0 cm/Jh. im Niedrigwasser berücksichtigt. An dieser Stelle wird durch Berücksichtigung des Säkulartrends eine „long-term“ Betrachtung angestellt und in kleinem Umfang die Klimaentwicklung berücksichtigt.

Neben den genannten Faktoren ist der Oberwasserzufluss eine wichtige Einflussgröße. Er spielt vor allem im Bereich der schmalen Elbrinne oberhalb des Hamburger Stromspaltungsgebietes eine wichtige Rolle. So führt eine Erhöhung des Oberwasserzuflusses (gemessen am Pegel Neu Darchau) um 1000m³/s zu einer Erhöhung des Sturmflutscheitels um 25 cm. Es wurde deshalb ein sehr hoher Oberwasserabfluss von 2200m³/s festgelegt. Stromab von Hamburg spielt der Oberwassereinfluss nur noch eine geringe Rolle (GÖNNERT u. FERK 2000).

Die so ermittelten Werte, werden einem numerischen Modell als Eingangsgröße vorgegeben. Das numerische Modell ermittelt für jeden Ort entlang der Elbe einen eigenen Bemessungswert. Sie steigen von Cuxhaven mit 6,65 m NN bis Hamburg auf eine Bandbreite von 7,20 m NN bis 9,25 m NN an. Diese Werte sind jedoch noch nicht die endgültigen Höhen der Hochwasserschutzanlagen. Zusätzlich wird für jeden Ort die Wirkung des Seegangs (Auflauf/Reflexion etc.) berücksichtigt. Erst beide Werte zusammen bilden dann die Höhe der Hochwasserschutzanlagen.

4.2 Überprüfung der Sturmfluten im Hinblick auf Klimaveränderungen

Die Überprüfung der Sturmfluten in Hinblick auf Klimaänderungen erfolgt nach dem Verfahren von GÖNNERT (2003). Um das Sturmflutklima umfassend zu analysieren, ist es notwendig, Sturmfluten in ihrem gesamten Verlauf zu erfassen. Daher ist die Windstaukurve von zentraler Bedeutung. Sie bildet den Einfluss des Sturmflut verursachenden Faktors – des Windes – und dessen Änderungen direkt ab. Mögliche Änderungen der Windverhältnisse verändern somit den Verlauf – und damit den Charakter – einer Sturmflut. Veränderungen im Sturmflutklima sind auf diese Weise gut zu erfassen.

Hierfür wird die Windstaukurve in „Anstieg“, „Scheitel“ und „Abfall“ parametrisiert. Über Korrelation der einzelnen Parameter lässt sich erarbeiten, welche Wirkung ein spezifischer Windverlauf auf die Windstauhöhe hat (Abb.7).

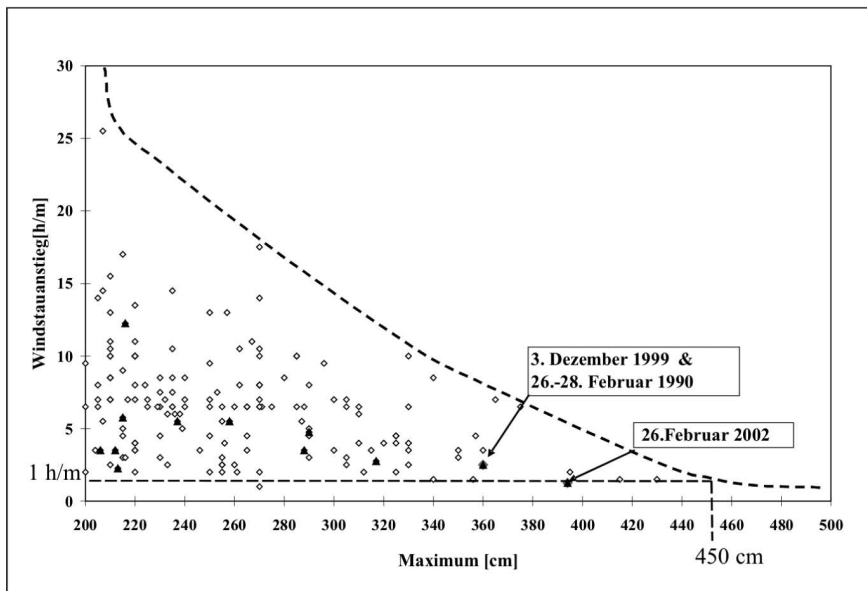


Abb. 7: Korrelation der Windstauparameter Windstauanstieg mit dem Windstau-maximum aller Sturmfluten in Cuxhaven seit 1900 (GÖNNERT 2003)

Es zeigt sich z.B. für die Korrelation „Windstauanstieg“ zu „Windstau-maximum“, dass in Cuxhaven gilt, dass bei großen, sehr schnellen Anstiegen der Windgeschwindigkeit sehr hohe Windstau-maxima gebildet werden. Die dargestellten

Sturmfluten entstammen aus einem Kollektiv seit 1900. In dieser Zeit lag eine Erhöhung der globalen Mitteltemperatur von $0,6^{\circ}\text{C}$ vor. Die gebildete Einhüllende stellt den Bereich dar, in dem sich Sturmfluten unter momentanen Klimabedingungen entwickeln können. Jede neue Sturmflut wird unter diesem Gesichtspunkt analysiert. Es wird davon ausgegangen, dass Sturmfluten, die unterhalb der dargestellten Einhüllenden in einem physikalisch sinnvollen Ablauf stattgefunden haben, im Rahmen der bisherigen Klimaänderungen liegen und keine Abweichungen zeigen. So war zwar die Sturmflut vom 03.12.1999 ein Extremereignis, dennoch fällt sie mit ihrem Verlauf in den Bereich einer normalen sehr schweren Sturmflut. Auf diese Weise gelingt es, die Bewertung von mehr als 200 Sturmfluten unterschiedlichster, individueller Abläufe in ein System zu bringen und Abweichungen auch bedingt durch Klimaänderung sehr schnell und kontinuierlich feststellen zu können.

5 Risikomanagement am Beispiel des Hamburger Sturmflutschutzkonzepts

Sturmfluten können für die Menschen und ihrer Werte an der Küste eine existentielle Bedrohung sein. Ein sorgsamer Küstenschutz ist daher von großer Bedeutung für die Menschen. Hamburg wurde 1962 von einer schweren Sturmflut zu weiten Teilen überflutet, bei der viele Menschen ums Leben kamen. Grund dieser nationalen Katastrophe war aber nicht allein das Versagen der Küstenschutzwerke. Lange Zeit war keine schwere und schon gar keine sehr schwere Sturmflut mehr aufgetreten und die Menschen nahmen das Risiko, in dem sie lebten, nicht mehr wahr.

Nach dieser Sturmflut wurden in Hamburg nicht nur die Küstenschutzwerke erneuert und erhöht. Es wurde auch die Organisation des zentralen Katastrophenstabes überarbeitet und ein umfassendes Evakuierungsprogramm entwickelt. Zudem wird seitdem die Bevölkerung in den potentiellen Überflutungsräumen mit Hilfe von Informationsbroschüren über ihr Gefahrengebiet und ihre Evakuierungsmöglichkeiten aufgeklärt.

Ziel des heutigen Sturmflutschutzes in Hamburg ist die Gewährleistung einer gleichen, größtmöglichen Sicherheit an allen überflutungsgefährdeten Bereichen der Stadt. Hierbei wird jedoch anstelle von „Hochwasserschutz durch gleiche Höhe“ als Schutzziel „Hochwasserschutz durch gleiche Sicherheit“ definiert.

Hamburg hat die Ergebnisse seiner Sturmflutforschung in die Festlegung der Bemessungsturmflut mit stromauf ansteigenden Bemessungswasserständen eingebracht, die am Pegel St. Pauli einen Wert von NN + 7,30 m ausweisen. Auf der Grundlage mehrjähriger wissenschaftlicher Untersuchungen an verschiedenen Instituten ist ein neues Bemessungskonzept entwickelt worden, das auf der Grundlage des Bemessungswasserstandes die Wellenwirkung bei Sturmfluten differenziert berücksichtigt. Die Grundlagen wie Sollhöhenbestimmung, Berechnungsansätze, konstruktiven Anforderungen und baulichen Möglichkeiten zur Reduzierung des Wellenauflaufes sind in technische Vorschriften eingeflossen.

Obwohl der Bemessungswasserstand eine sehr hohe Sicherheit gewährleistet, gibt es rechnerisch in extrem kleinen Wahrscheinlichkeiten die Möglichkeit, dass die aufgelaufene Sturmflut den Wert des Bemessungswasserstandes überschreiten

kann. Hier liefert der Katastrophenschutz mit Evakuierungsplänen für überflutungsgefährdete Gebiete hinter dem öffentlichen Hochwasserschutz einen wichtigen zusätzlichen Beitrag für die Sicherheit der Bevölkerung – auch im Hinblick auf die Klimaänderung. Ergänzend wird in der Sturmflutbeobachtung und Sturmflutforschung die Klimaveränderung einbezogen und berücksichtigt.

Die Anpassung des Sturmflutschutzes an die Sturmflutentwicklung ist ein besonderes Anliegen der hamburgischen Politik. So wurden nach 1962 in Hamburg neue leistungsfähige Deiche und Hochwasserschutzwände gebaut und die Hauptdeichlinie auf heute 100 km verkürzt. Die Überprüfung des Bemessungswasserstandes in den 1980er Jahren führte zu der Maßgabe der Erhöhung des öffentlichen Küstenschutzes, dessen Bauprogramm sich zurzeit in der Abschlussphase befindet.

Nach 1976 wurde der öffentliche Hochwasserschutz durch einen privaten Hochwasserschutz ergänzt, dessen Bau zu 75% staatlich gefördert wird. Auch die HafenCity, mit ihren Wohn- und Bürogebäuden vor dem öffentlichen Hochwasserschutz liegend, bedarf eines besonderen Schutzkonzeptes vor Sturmflutgefahren.

Das Sturmflutschutzkonzept in Hamburg basiert im Prinzip auf den zwei Säulen:

1. Bauliche Anlagen

Sie umfassen den öffentlichen Hochwasserschutz entlang der Elbe und den privaten Hochwasserschutz, überwiegend im Hafen gelegen, sowie die Flutschutzanlagen in der HafenCity und Gebäude mit Objektschutz, die meist vor der Hauptdeichlinie liegen.

2. Vorbeugender und abwehrender Sturmflutschutz

Der vorbeugende und abwehrende Sturmflutschutz umfasst die Sturmflutforschung, die Sturmflutwarnung sowie die Planung, Organisation und Durchführung von Abwehrmaßnahmen mit der Verteidigung der Hochwasserschutzanlagen als Teilaufgabe des Katastrophenschutzes.

5.1 *Bauliche Anlagen des Sturmflutschutzes*

5.1.1 *Der öffentliche Hochwasserschutz*

Der öffentliche Hochwasserschutz umfasst die Hauptdeichlinie in Hamburg. Sie schützt in erster Linie die Bevölkerung. Der Bau, die Instandhaltung und die Verteidigung des öffentlichen Hochwasserschutzes ist Aufgabe der öffentlichen Verwaltung.

Der öffentliche Hochwasserschutz besteht aus 77,5km Deichen und 22,5km Hochwasserschutzwänden. Zusammen mit 6 Sperrwerken, 6 Schleusen, 27 Schöpfwerken und Deichsielen sowie 30 Toren (Gatts) schützen sie die Stadt und schotten die Nebenarme der Elbe ab. Die Schutzhöhen liegen zwischen NN + 7,20 m und NN + 9,25 m (Abb. 7). Die Höhendifferenzen sind mit dem Konzept des Sturmflutschutzes zu erklären, das von gleicher Sicherheit, aber nicht von gleicher Höhe ausgeht. Infolgedessen wird die Höhe der Anlagen nach den örtlichen Gegebenheiten und Erfordernissen schwanken, was insbesondere im Zusammenhang mit der Wellenauflaufhöhe zu sehen ist.

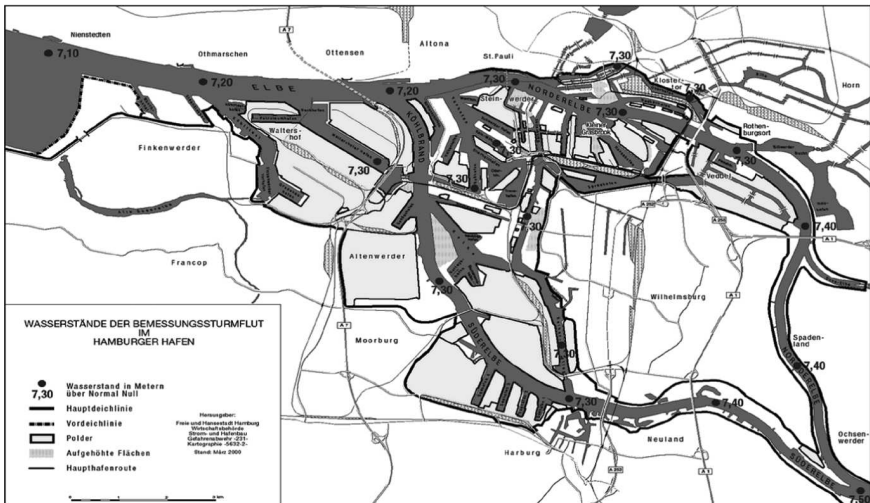


Abb. 8: Wasserstände der Bemessungssturmflut im Hamburger Hafen (HAMBURG PORT AUTHORITY 2004)

Der Hochwasserschutz in einem dicht besiedelten, urbanen Umfeld gestaltet sich zum Teil schwierig. Vielerorts müssen aufgrund der beengten Platzverhältnisse oder besonderen Nutzung angepasste technische Lösungen gefunden werden. Im Innenstadtbereich und in Finkenwerder sind Uferkonstruktionen gleichzeitig teilweise Hochwasserschutzanlage und Promenade. Gatts ermöglichen hier den Zugang zu den Landeanlagen und Hafenfähren.

5.1.2 Der private Hochwasserschutz

Der private Hochwasserschutz dient in der Regel dem Schutz von Industrie- bzw. Hafenanlagen, aber auch einzelnen Wohnanlagen (wie z.B. Neumühlen). Die privaten Anlagen werden von ihren Eigentümern instand gehalten und verteidigt.

Der private Hochwasserschutz besteht im Hafen aus 48 Einzel- und Gemeinschaftspoldern sowie drei Sperrwerken, die mit insgesamt 109 km Länge und rd. 2.300 ha Fläche etwa 70% des Hafengebietes vor Sturmfluten schützen. Die privaten Anlagen bestehen aufgrund des geringeren Flächenbedarfes überwiegend aus Spundwand- bzw. Stahlbetonkonstruktionen, die die Umschlags- und Lagereinrichtungen mit einer einheitlichen Höhe von NN + 7,50 m schützen. Eingeschlossen sind viele infrastrukturelle Bereiche wie Straßen und Hafenanlagen.

5.1.3 Flutschutzanlagen und Objektschutz

Die HafenCity, zwischen Norderelbe und öffentlichem Hochwasserschutz der Innenstadt gelegen, wird auf Entwicklungsflächen mit Geländehöhen zwischen NN + 4,40m und NN + 7,20m errichtet und liegt damit – wie bereits erwähnt – im Überflutungsbereich der Elbe. Das Schutzkonzept sieht eine weitgehend flächenhafte Aufhöhung der frei zugänglichen Bereiche in Form von Warften vor. Dies beinhaltet Geländeaufhöhungen wie auch bauliche Maßnahmen, die eine dauerhaf-

te, sturmflutgeschützte Wohn- und Büronutzung sicherstellen. Die Sollhöhen der Flutschutzanlagen in der HafenCity liegen zwischen NN + 7,50m und NN + 8,50m.

Bereits vor rund 20 Jahren wurde damit begonnen, den nördlichen Hafenrand unterhalb des Geesthanges einer neuen Nutzung zuzuführen. Der Schutz vor Sturmflutgefahren war von Anfang an sowohl aus städtebaulicher als auch aus wasserbaulicher Sicht ein wichtiges Thema. Für dieses Gebiet existiert kein übergreifendes Gesamtentwicklungskonzept wie für die HafenCity. Alternativ ist hier eine Reihe von Einzelkonzepten mit Umnutzung bestehender Gebäude und Neubauten der stadtplanerische Ansatz. Dies führt zu Sturmflutschutzmaßnahmen, die speziell auf die Gebäude abgestellt sind. Gebäude, die im Sturmflutfall der Belastung nicht oder nur bedingt standhalten und aufgrund ihrer Nutzung schnell zu räumen sind, werden durch kontrolliertes Fluten des Erdgeschosses vor Schäden geschützt. Am weitesten verbreitet ist der Sturmflutschutz direkt am Gebäude in Form von Stahlklappen bzw. verstärktem Glas vor den Fenstern oder Schiebetoren vor Garageneinfahrten. Auch eine Brücke zum Elbhang als Fluchtweg im Sturmflutfall gehört zum Konzept.

5.2 *Der vorbeugende und abwehrende Sturmflutschutz*

5.2.1 *Die Sturmflutwarnung*

Die Sturmflutwarnung an den Küsten in der Bundesrepublik Deutschland erfolgt durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Hier werden die täglichen Tiden und die Sturmfluten für die gesamte deutsche Nordseeküste vorhergesagt. Auch für Hamburg wird eine Prognose abgegeben. Die Vorhersage basiert auf einer numerischen Simulation, einem Nordseemodell, das die astronomische Tide, den Druck und die Windsituation über der Nordsee berücksichtigt. Es ist ein operationelles Modell, das täglich eine 72 Stunden Vorhersage für Sturmfluten, Temperatur, Salinität, Strömung und Eisbedeckung berechnet (MÜLLER-NAVARRA et al. 2003 u. MÜLLER-NAVARRA 2006).

Nach der Sturmflut 1976 wurde als Folge eines Senatsauftrages im gleichen Jahr der Hamburger Sturmflutwarndienst – WADI – eingerichtet, der die Vorhersagen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie für Hamburg präzisieren soll. Seine Aufgaben umfassen die Berechnung der Sturmflutvorhersagen für Hamburg nach Höhe und Eintrittszeit und die Warnung der Bevölkerung über die Behörde für Inneres sowie der Betriebe im Hafen, der Behörden, Betroffener und der Organisationen im Katastrophenschutz über einen eigenen Funkkreis und Telefonansagen. Die Warnungen werden halbstündlich wiederholt. Die Einsätze erfolgen, wenn ein Wasserstand von NN + 4,50 m und höher zu erwarten ist.

Das Vorhersageverfahren wurde von SIEFERT (1968) entwickelt. Es basiert auf gemessenen Daten entlang der Nordseeküste und in der Elbmündung, deren Abhängigkeiten im Fortschritt einer Sturmfluttide von Borkum über Cuxhaven bis Hamburg empirisch aus Sturmfluten abgeleitet und in Regeln umgesetzt wurden. Es wird mit der Sturmflutentwicklung laufend angepasst.

5.2.2 *Sturmflutschutz als Teilaufgabe des Katastrophenschutzes*

Die Koordination, Lenkung und Durchführung aller Maßnahmen im Sturmflutschutz ist in Hamburg eingebunden in den Katastrophenschutz. Dafür sind regional

zuständige Katastrophendienststäbe in den Bezirken und im Hafen eingerichtet worden, mit zentraler Lenkung durch den „Zentralen Katastrophendienststab“ ZKD der Behörde für Inneres. Sie werden unterstützt durch private Hilfsorganisationen, das Technische Hilfswerk (THW) und die Bundeswehr.

Für den Sturmflutfall wurden differenzierte Planungen geschaffen, die Alarmierungs-, Einsatz- und Abwehrmaßnahmen wie die Verkehrslenkung, die Verteidigung der Deiche bis hin zu Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vorsehen, die an Wasserstandsstufen gekoppelt sind. Bestandteil ist zum einen auch die vorbeugende Information, zum anderen einmal jährlich gemeinsam durchzuführende Sturmflutübungen und im Sturmflutfall die rechtzeitige telefonische Warnung der Betroffenen sowie die Information der Bevölkerung über die Massenmedien.

Bei Sturmfluten über NN + 6,50 m wird der gesamte Hafen gesperrt und auch die Polder geräumt, bei erwarteten Wasserständen über NN + 7,30 m alle überflutungsgefährdeten Bereiche der Stadt hinter öffentlichen Hochwasserschutzanlagen planmäßig evakuiert.

5.2.3 Verteidigung der Hochwasserschutzanlagen

Die Verteidigung des öffentlichen Hochwasserschutzes erfolgt durch die Deichverteidigungsorganisation der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt. Sie besteht aus rd. 300 Mitgliedern der Deichverbände und Bediensteten von Hamburger Behörden und wird durch Hilfskräfte der Feuerwehren, des THW und der Deichwacht unterstützt. Material wie Sandboden und Klei, Sandsäcke sowie Hilfsgeräte stehen zentral und dezentral zur Verfügung. Die Alarmierung und der Einsatz der Verteidigungskräfte wird vom ZKD mit koordiniert und mit gelenkt. Sie werden alarmiert, wenn Wasserstände über NN + 5,00 m erwartet werden.

Die Polder sind unter der Führung eines mit hoheitlichen Befugnissen ausgestatteten Einsatzleiters zu verteidigen. In der Polderverteidigung werden rund 1.500 Personen eingesetzt, die erforderlichen Maßnahmen sind in Alarm- und Einsatzplänen dokumentiert und orientieren sich an örtlichen Gefährdungen wie z.B. die Drempehhöhen der Sturmfluttore. Die Hafenspolder sind eingebunden in den regionalen Katastrophendienststab Hafen.

5.2.4 Die gesetzlichen Grundlagen

Der Sturmflutschutz ist in Hamburg rechtlich in erster Linie im Wasser- und im Katastrophenschutzrecht verankert. Das Hamburger Wassergesetz (HWaG) regelt u.a. das Wohnen vor der Hauptdeichlinie und in Verbindung mit Verordnungen über öffentliche und private Hochwasserschutzanlagen die Anforderungen an Bau, Unterhaltung und die Verteidigung dieser Anlagen. Ihr Bau erfordert ein Planfeststellungs- oder Plangenehmigungsverfahren, in dem alle Sturmflutschutzbelange abgehandelt werden.

Die privaten Eigentümer haben einen Hochwasserschutzbeauftragten einzusetzen, der für den technisch einwandfreien Zustand verantwortlich ist, zweimal jährlich eine interne Schau und einmal jährlich eine Sturmflutübung durchzuführen hat.

Die Flutschutzanlagen in der HafenCity und andere bauliche Anlagen in hochwassergefährdeten Gebieten werden im Zuge des Baugenehmigungsverfahrens

zugelassen und dabei einer gesonderten Prüfung (Bauprüfdienst) unterzogen. In der HafenCity auf der Grundlage einer speziellen Verordnung.

Das Katastrophenschutzgesetz regelt in Verbindung mit Verordnungen, Richtlinien und Dienstanweisungen die Einrichtung und Organisation der Katastrophenschutzbehörden so wie deren Stäbe mit den jeweiligen Aufgaben z.B. bei Sturmfluten.

6 Ausblick

Sturmfluten sind Naturereignisse, die erst dann zu einem Risiko werden, wenn Räume betroffen sind, die für den Menschen von Bedeutung sind. So zeigte die Sturmflut von 1962 in Hamburg deutlich auf, dass der technische Schutz des Menschen versagen kann. Wichtig ist deshalb ein Katastrophenschutz, der die differenzierte Aufgabe reibungslos im Einsatzfall bewerkstelligt. Zudem bedarf es in der Bevölkerung einer Risikowahrnehmung, die eine Eigenverantwortung in sich birgt und damit im Notfall auch auf die Angaben des Katastrophenschutzes reagieren kann.

Die Herausforderung der Zukunft liegt in der Klimaänderung und dem damit verbundenen Meeresspiegelanstieg und den etwaig höher werdenden Sturmfluten. Eine gute Klima- und Sturmflutforschung und ein sich entwickelndes Risikomanagement, das auch neue Wege zur Erhöhung der Sicherheit beschreiten lernt, sind die Aufgaben, die es zu bewältigen gilt.

Literatur

- AUSSCHUSS FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE 1993 = Ausschuß der „Küstenschutzwerke“ der deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. sowie der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V. 1993: Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken – EAK 1993. In: Die Küste 36 (ganz).
- AUSSCHUSS FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE 2002 = Ausschuß der „Küstenschutzwerke“ der deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. sowie der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V. 2002: Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken – EAK 2002. In: Die Küste 65 (ganz).
- CHRISTIANSEN, H., W. SIEFERT. 1983: Entwicklung und Stand der Sturmflutvorhersagen des Hamburger Sturmflutwarndienstes. (= Hamburger Küstenforschung, H. 42).
- GISZAS, H. 2004: Sturmflutschutz: Herausforderung und Sicherheitskonzepte. In: Hansa, H. 2, S. 47–52.
- GÖNNERT, G. 2003: Sturmfluten und Windstau in der Deutschen Bucht. Charakter, Veränderungen und Maximalwerte im 20. Jahrhundert. In: Die Küste 65, S. 189–301.
- GÖNNERT, G. 2004: Maximum storm surge curve due to the global warming during the 20th in the European North Sea Region (German Bight). In: RHAO, A. D., G. GÖNNERT (Hrsg.): Storm surges, sedimentation and coastal erosion, Special Issue. (Natural Hazards, 32, 2).
- GÖNNERT, G., S.K. DUBE, T.S. MURTY u. W. SIEFERT 2001: Global Storm Surges. Theory, Observations and Applications. In: Die Küste 63 (ganz).
- GÖNNERT, G., U. FERK 2000: Sturmflutschutz angesichts von globalem Klimawandel und anthropogenen Einflüssen dargestellt am Beispiel von Deutscher Bucht und Elbe. In: BLOTEVOGEL, H., J. OSSENBRÜGGE u. G. WOOD: Lokal verankert – weltweit vernetzt. Stuttgart, S. 163–170.
- GROSSMANN, G., K. WOTH, H. VON STORCH 2006: Localization of global climate change:

- Storm surge scenarios for Hamburg in 2030 and 2085. In: *Die Küste* 71, S. 169–182.
- HAMBURG PORT AUTHORITY (HPA) 2004: Grafik aus dem Bestand der Arbeiten der HPA. Hamburg.
- HAMBURG PORT AUTHORITY (HPA) 2006: Grafik aus dem Bestand der Arbeiten der HPA, Andreas Lehmann. Hamburg.
- HARPER, B.A. (Hrsg.) 2001: Queensland climate change and community vulnerability to tropical cyclones – ocean hazards assessment – stage 1. Report prepared by Systems Engineering Australia Pty Ltd in association with James Cook University Marine Modelling Unit, Queensland Government. <http://www.longpaddock.qld.gov.au/ClimateChanges/pub/OceanHazardsStage1.html> (20.10.2006).
- HOUGHTON J.T., Y. DING, D.J. GRIGGS et al. (Hrsg.) 2001: Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge.
- JENSEN, J. 2005: Abschlussbericht: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste (MUSE). Siegen.
- JENSEN, J., Ch. MUDERSBACH 2003: Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung an der deutschen Nord- und Ostseeküste bis 2001. Bericht im Auftrag des Bundesanstalt für Gewässerkunde. Siegen.
- LÄNDER-ARBEITSGRUPPE 1988: Bemessungswasserstände entlang der Elbe. In: *Die Küste* 47, S. 31–50.
- LANGENBERG, H., A. PFIZENMAYER, H. VON STORCH, H. u. J. SÜNDERMANN 1999: Storm related sea level variations along the North Sea coast: natural variability and anthropogenic change. In: *Continental Shelf Research* 19, S. 821–842.
- MÜLLER-NAVARRA, S.H. 2006: Sturmflutvorhersagen für die Nordsee. Sturmfluten sind durch meteorologische Einflüsse verstärkte Fluten. In: <http://www.dwd.de/de/Zusatzmues/Presse/Mitteilungen/20060215e.htm> (15.07.2006).
- MÜLLER-NAVARRA, S.H., W. LANGE, S. DICK, K.C. SOETJE 2003: Über die Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage. Hydrodynamisch-numerische Modelle der Nord- und Ostsee und ein empirisch-statistisches Verfahren für die Deutsche Bucht. Berlin.
- MUNICH RE GROUP 2006: Annual review. Natural catastrophes 2005. Knowledge Series, Topic Geo, Munich Re Group, Munich.
- PETERSEN, M., H. ROHDE 1991: Sturmflut: Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe. Neumünster.
- SIEFERT, W. 1968: Sturmflutvorhersage für den Tidebereich der Elbe aus dem Verlauf der Windstaukurve Cuxhaven. Hannover (= Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der TU Hannover, H. 30).
- SIEFERT, W. 1998: Bemessungswasserstände 2085A entlang der Elbe. Ergebnisse einer Überprüfung durch die Länderarbeitsgruppe nach 10 Jahren. In: *Die Küste* 60, S. 228–255.
- WEISSE, R. 2005: Marine Climate Change. Ocean Waves, Storms and Surges in the Perspective of Climate Change. Hamburg.
- WEISSE, R., A. PLÜß 2006: Storm related sea level variations along the North Sea Coast as simulated by a high-resolution model 1958–2002. In: *Ocean Dynamics* 56, S. 16–25.
- WEISSE, R., H. VON STORCH u. F. FESER 2005: Northeast Atlantic and North Sea storminess as simulated by a regional climate model 1958–2001 and comparison with observations. In: *Journal of Climate* 18, S. 465–479.
- 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? In: *Geophysical Research Letters* 32, S. 7–15.
- WOTH, K., R. WEISSE u. H. VON STORCH 2006: Dynamical modelling of North Sea storm surge extremes under climate change conditions. An ensemble study. In: *Ocean Dynamics* 56, S. 26–35.