

## Sturmfluten in der Elbe und deren Vorhersage im Wandel der Zeiten

*Sylvin H. Müller-Navarra*

### Zusammenfassung

In der Nordsee, wo die Gezeiten mit Ebbe und Flut den regelmäßigen Wechsel des Wasserstandes bestimmen, sind Sturmfluten zeitlich eng an den von Mond, Sonne und Erdrotation bestimmten Rhythmus gebunden. Im Gezeitenstrom Elbe ist es aber nicht der Sturm direkt über dem Elbestrom, sondern derjenige über der Deutschen Bucht, der die Sturmflutscheitelwasserstände in der Elbe maßgeblich beeinflusst. Im Elbestrom selbst wird die Sturmflutwelle nur noch wenig vom lokalen Wind verstärkt, aber bei ihrer Wanderung stromauf bis an die Tidegrenze durchaus noch deutlich erhöht. Das ist typisch für Tideflüsse, macht die Vorhersage von Sturmfluten für Tidehäfen wie Hamburg jedoch schwierig.

Vorhersagen der Wasserstände brauchten die Menschen an der Elbe schon immer. Nur waren die technischen Möglichkeiten früher sehr begrenzt. Ohne Datenfernübertragung konnte die schon im 17. Jahrhundert vorhandene Erkenntnis, dass vornehmlich nordwestliche Winde an der Nordseeküste für Sturmfluten in Hamburg verantwortlich sind, nicht für eine Vorhersage genutzt werden. Später war man bemüht, aus den Wasserständen in Cuxhaven, die man schon Mitte des 19. Jahrhunderts nach Hamburg telegraphieren konnte, auf Sturmflutscheitelwasserstände in Hamburg zu schließen. Damit war schon eine Vorwarnzeit von gut 4 Stunden möglich geworden. Die Vorwarnzeit konnte erst dann bedeutend ausgedehnt werden, als Meteorologen in der Lage waren, aus den telegraphierten Wettermeldungen und aus der synoptischen Betrachtung der daraus gezeichneten Wetterkarten Vorhersagen des Windes in der Deutschen Bucht abzuleiten. Ein wirksamer Sturmflutwarndienst existiert erst seit gut 80 Jahren, als an der Deutschen Seewarte Meteorologen und Ozeanographen begannen, die bereits vorhan-

denen wissenschaftlichen Erkenntnisse zu operationellen Verfahren zu verknüpfen.

Erste Sturmflutwarnungen über Rundfunk gab es bereits in den 1920er Jahren. Seit den 1970er Jahren haben insbesondere die operationellen hydrodynamisch-numerischen Modelle der Atmosphäre und des Meeres für weitere Innovationsschübe gesorgt. Heute ist das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) – die Nachfolgeinstitution der Seewarte und des Deutschen Hydrographischen Instituts (DHI) – als zentrale Meeresbehörde für Wasserstandsvorhersagen einschließlich Gezeiten und Sturmfluten an der gesamten deutschen Küste zuständig.

### Einleitung

Eine Sturmflut ist eine durch Sturm verstärkte Flut. Demnach können in der Elbe überall dort, wo die Gezeiten wahrnehmbar sind, auch Sturmfluten auftreten. Bei der hier angestellten geschichtlichen Betrachtung über die Verhältnisse in der Untere Elbe bei Sturmfluten und die Entwicklung von Wasserstandsvorhersageverfahren geht es hauptsächlich um Hamburg und Cuxhaven. Während Cuxhaven, im Mündungstrichter der Elbe liegend, mehr den Charakter eines Küstenortes der Nordsee hat, ist Hamburg, gut 100 km stromauf liegend, ein weit von der offenen Küste gelegener Tidehafen (Abb. 1).

Normalerweise sind die Gezeiten nur stromab der Staustufe bei Geesthacht wahrnehmbar, die 1957–1960 erbaut wurde. Das dort befindliche Wehr kann bei schweren Sturmfluten zur Entlastung gelegt werden, so dass genau genommen auch stromauf vom Wehr Sturmfluten auftreten können. So beeinflusste die bisher höchste Sturmflut in Hamburg am 3.1.1976 die Wasserstände oberhalb des Wehres bis Neu-Darchau, das 80 km stromauf von Hamburg liegt.

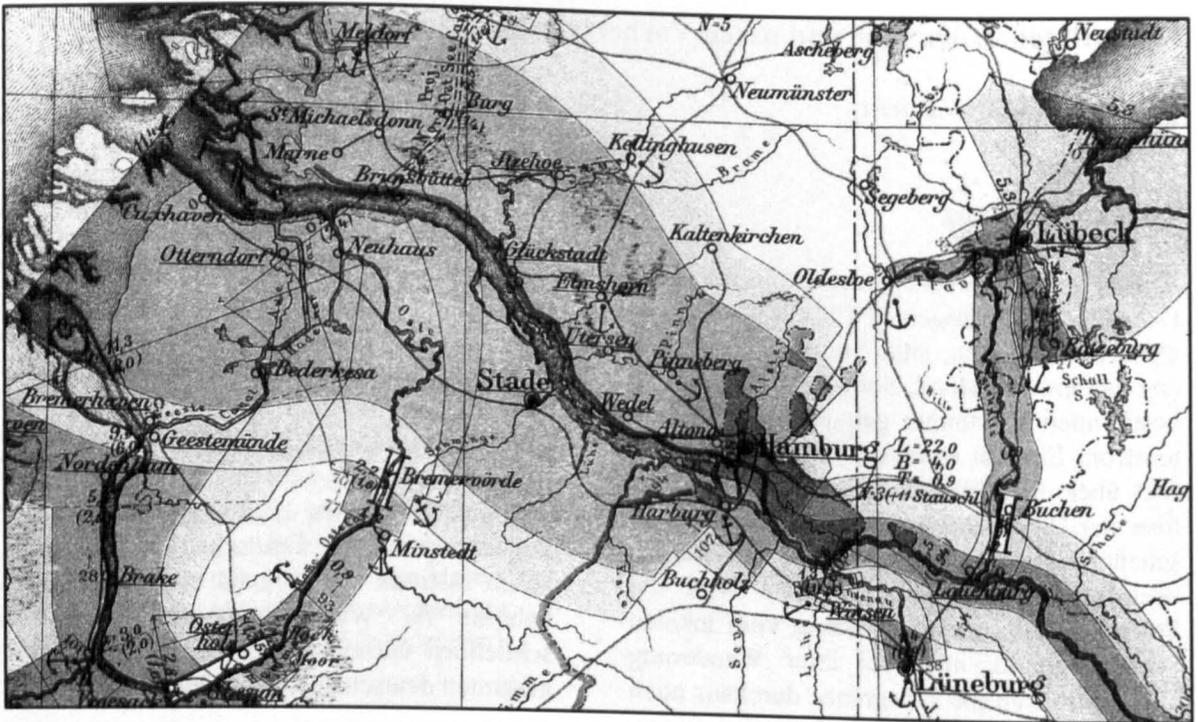


Abb. 1: Ausschnitt aus der Karte der deutschen Wasserstraßen (Sympher und Maschke, 1887).

Bei außergewöhnlich hohem Abfluss ( $>1200 \text{ m}^3/\text{s}$ ) nach Starkniederschlägen im Einzugsbereich der Oberelbe (Rudolph, 2005) wird das Wehr ebenfalls gelegt, und der Wasserstand kann im Gezeitenbereich der Elbe ebenfalls deutlich erhöht sein. Die Elbe ist aber stromab von Hamburg so gut ausgebaut, dass solche Fluten den Wasserstand dort nur um wenige Dezimeter bzw. weniger erhöhen, während bei schweren Sturmfluten der Wasserstand um mehr als 2,5 m erhöht sein kann.

Die Geschichte der Seeschifffahrt lehrt, dass es für Hamburg ein großer Vorteil war und ist, das Konzept eines offenen Hafens und nicht eines Dockhafens (Franzius und Bökemann, 1927) zu wählen, wengleich damit die Gefahr schwerer Sturmfluten zu allen Zeiten bestand und fortbesteht.

Als roter Faden für diesen Aufsatz dient ein Begriff aus der Mathematik, weil es zur Lösung geophysikalischer Probleme meist nützlich ist, auch die Betrachtungsweise eines Mathematikers anzunehmen. Das gilt sowohl für die Analyse eines zurückliegenden Zeit-

raumes und dessen Nachhersage als auch für die Vorhersage. Mathematisch betrachtet ist also die Berechnung des Wasserstandes eines Flusses die Lösung eines Anfangs-Randwertproblems (Marsal, 1976). Das Problem besteht in der Berechnung von Werten in einem berandeten Gebiet bei bekannten Anfangswerten. Auf das Sturmflutproblem der Elbe übertragen bedeutet dieses, dass bei Kenntnis der Geometrie der Unterelbe, einer anfänglichen Wasserspiegellage und randseitiger Informationen eine zeitlich spätere Wasserspiegellage berechnet werden soll.

Anfangswerte: Bewegungszustand des Elbewassers (Strömungen) und Wasserspiegellage zu Beginn des Zeitraums, sowie Temperatur und Salzgehalt.

Randwerte: Zustrom aus dem Oberlauf, Einlaufen der in der offenen Nordsee erzeugten Sturmflutwelle in den Mündungstrichter der Elbe, Impuls- und Wärmeflüsse (Wind und Wetter) an der Wasseroberfläche der Elbe, Temperatur und Salzgehalt in der inneren Deutschen Bucht.

Wenn die Anfangs- und Randwerte bekannt sind, lassen sich die Bewegungsgleichungen der Strömungsmechanik (partielles Differentialgleichungssystem, siehe z. B. bei Kleine, 1994) analytisch oder bei komplizierter Geometrie des Flussbettes mit numerischen Verfahren zeitlich vorwärts integrieren und damit ein zukünftiger Bewegungszustand und die Höhe des Wasserstandes an jedem Ort berechnen.

Damit ist schon klar, dass man im Wandel der Zeiten das Problem der Vorhersage von Sturmfluten in der Elbe desto besser lösen konnte, je schneller Messungen der Anfangs- und Randwerte verfügbar waren. Damit kommt zum mathematischen Problem ein technisches hinzu, das der Datenfernübertragung. Seit den 1950er Jahren macht man sich noch eine weitere Innovation zunutze, die Computertechnologie, welche zur numerischen Integration der Bewegungsgleichungen verwendet wird.

Diese Abhandlung ist hauptsächlich eine historische und auf die Elbe fokussiert. Hinsichtlich vertiefender ozeanographischer und hydrologischer Aspekte von Sturmfluten wird auf die umfangreiche Literatur verwiesen. In der Literaturliste finden sich auch einige naturwissenschaftshistorische Monographien.

## Entstehung und Häufigkeit von Sturmfluten in der Elbe

### Gezeiten

Die Gezeiten der Ozeane werden durch Mond und Sonne angeregt. Diese verursachen auf der rotierenden Erde ständig kleine raumzeitliche Änderungen der Schwere, so dass die Wasservolumenelemente der Ozeane zueinander in Bewegung gesetzt werden. Nur durch die sehr großen Ausdehnungen der ozeanischen Wasserkörper geraten diese in wahrnehmbare Schwingungen, die Gezeiten genannt werden. Auch in größeren Seen treten Gezeiten auf; sie sind aber nur durch genaue Messungen längerer Dauer feststellbar. Die Gezeiten der Nordsee sind überwiegend durch die Gezeiten

des Nordatlantiks angeregt und nur zu einem sehr kleinen Teil auf die unmittelbare Einwirkung des Mondes und der Sonne auf den Wasserkörper der Nordsee zurückzuführen.

Hier ist kein Raum für eine ausführliche Beschreibung des Gezeitenphänomens. Eine wissenschaftlich einwandfreie und allgemeinverständliche Darstellung findet sich in der jüngeren Literatur nicht. Es muss daher auf eine ältere Monographie von Marmer (1926) verwiesen werden.

Wie die Gezeiten des Nordatlantiks besitzen auch die Gezeiten der Nordsee ausgeprägt halbtägige Form. Das bedeutet, dass dort meist zweimal am Tag Hochwasser und ebenso oft Niedrigwasser ist.

Man kann die von Gezeiten verursachten Strömungen und Wasserstandsschwankungen dynamisch als lange Wellen betrachten. Lange Wellen sind solche Wellen, deren Wellenlänge sehr viel größer als die Wassertiefe ist. Die Phasengeschwindigkeit, mit der sich diese Wellen ausbreiten, lässt sich recht genau mit einer einfachen Beziehung berechnen:

$v = \sqrt{gh}$ ,  $g$  ist dabei die Schwerebeschleunigung der Erde ( $\approx 9,81\text{m/s}^2$ ) und  $h$  ist die örtliche Wassertiefe. Auch wenn die Gezeitenwelle in die Elbe hineinläuft, gilt prinzipiell diese Beziehung für die Geschwindigkeit, mit der sich der Wellenkamm elbaufwärts bewegt. Die Welle erfährt jedoch eine Verformung. Die Flutdauer verkürzt sich stetig und die Ebbdauer verlängert sich entsprechend (Abb. 3). Eine anschauliche Erklärung hierfür hat z. B. der bekannte Göttinger Strömungsphysiker Ludwig Prandtl (1935) gegeben, allerdings betrachtet er die analoge Ausbreitung eines Schalles in einem Kanal.

Bevor die Elbe mit ausreichend bemessenen Hochwasserschutzanlagen (Deiche, Sperrwerke, etc.) ausgestattet war, krochen die Gezeiten bis in den letzten Winkel der landwirtschaftlich genutzten Marschen. Diese wasserwirtschaftliche Besonderheit ist treffend von Finder (1940) in seinem Buch über „Die Elbinsel Finkenwärder“ beschrieben worden:

„Die Felder erstrecken sich in langen rechteckigen, durch Wassergräben getrennten

Streifen bis an den Deich. Ein breiterer Graben, der ‚Sielgroben‘, ist durch das Siel, ein dickes Rohr aus ausgehöhlten Baumstämmen, das durch den Deich hindurchgeht, mit der Elbe verbunden. Da auch wiederum alle Gräben des Hofes untereinander durch ‚Piepen‘, Tonröhren oder ausgehöhlte Erlenstämme in Verbindung stehen, so ist das ganze Grabennetz an die Elbe und damit an das Steigen und Fallen des Wassers, an Ebbe und Flut, angeschlossen; so fühlen die Bauern, obgleich mitten im Lande wohnend, umhegt von hohen Deichen, täglich und stündlich den Atem und die Kraft des Stromes und des Meeres, sehen das Wasser steigen bei Hochfluten oder im Frühjahr, sehen es wegfallen bei Ostwind und im heißen Sommer und werden so immer erinnert an ihre Abhängigkeit vom Naturgeschehen und den Wettergewalten, bleiben wach und gespannt, rege und denkend und fühlen sich verbunden mit der ewigen Natur und ihrem Werden und Vergehen.“

Einleuchtend ist auch, dass durch die Wasserbewegung und den Wasseraustausch in den Gräben ein kleinklimatischer Effekt erzielt wurde, der die nächtliche Auskühlung abschwächte und damit Frostschäden während der Obstblüte zu verhindern half. Nach dem Abdämmen der Alten Süderelbe im April 1962 war der Tidenstrom, bei dem bei jeder mittleren Tide 3,4 Millionen Kubikmeter Wasser hinein- und dann wieder hinaus flossen, unterbrochen (Anonymus, 1964).

Mit der Entwicklung der Elbe als Schifffahrtsstraße haben sich über die Jahrhunderte auch Gezeitenphasen und -hübe drastisch verändert (Rohde, 1971). Bei heutigem, bereits sehr gut ausgebautem Zustand, werden zukünftige Ausbaumaßnahmen der Elbe wie z. B. Fahrrinnenanpassungen vergleichsweise geringe Auswirkungen haben (Dücker et al., 2006).

## Nordseestürme und Windstau

Die Ursache von Sturmfluten in der Elbe kennt man schon seit langer Zeit (Hessel, 1675). Auch über solche in der Deutschen Bucht und im Mündungstrichter der Elbe haben Chronisten berichtet (Weikinn, 1958). Über die qualitative Beschreibung der Abläufe kamen diese Berichte jedoch nicht hinaus. Erst Lentz (1879), ein Hamburger Wasserbauinspektor, nahm sich der Sache wissenschaftlich an und quantifizierte die Zusammenhänge zwischen Wind und Windstau. Insbesondere fand er heraus, dass nicht der Wind vor Ort entscheidend für den lokalen Windstau ist, sondern vielmehr ein gewisses Flächenmittel in der Deutschen Bucht berücksichtigt werden muss, wenn man den Anstau des Wassers an der Küste berechnen will.

Der Windstau ist die Differenz in Höhe zwischen einem eingetretenen Scheitelwasserstand und der zeitlich zugehörigen astronomisch vorausberechneten Hoch- bzw. Niedrigwasserhöhe. Bei stürmischem Wetter kann die Eintrittszeit des Scheitelwasserstandes deutlich von der vorausberechneten abweichen. Im Englischen trägt man dem Zeitproblem mit dem Begriff „Skew Surge“ Rechnung (Gerritsen et al., 1995).

Wenn man nur den Windstau zu den Hoch- und Niedrigwasserzeiten berechnet, lassen sich einfache empirische Windstautabellen aufstellen. Es ist zweckmäßig, deren vier zu benutzen, um den Einfluss des Windes in der südlichen Deutschen Bucht bei unterschiedlichen dynamischen Bedingungen im Mündungstrichter der Elbe bei Cuxhaven zu erfassen (Tomczak, 1960). Für jeweils Hoch- bzw. Niedrigwasser ist zwischen ablandigen (20° bis 200°) und auflandigen Winden (200° bis 20°) zu unterscheiden. Eine solche Tabelle für Hochwasser und auflandigen Wind ist in Abb. 2 graphisch dargestellt. Auf der Abszisse ist die Windrichtung aufgetragen, auf der Ordinate findet sich die Windgeschwindigkeit in Knoten. Die dicke Linie zeigt die bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit jeweils stauwirksamste Windrichtung an, bei Sturm ist es Westnordwest (~295°).

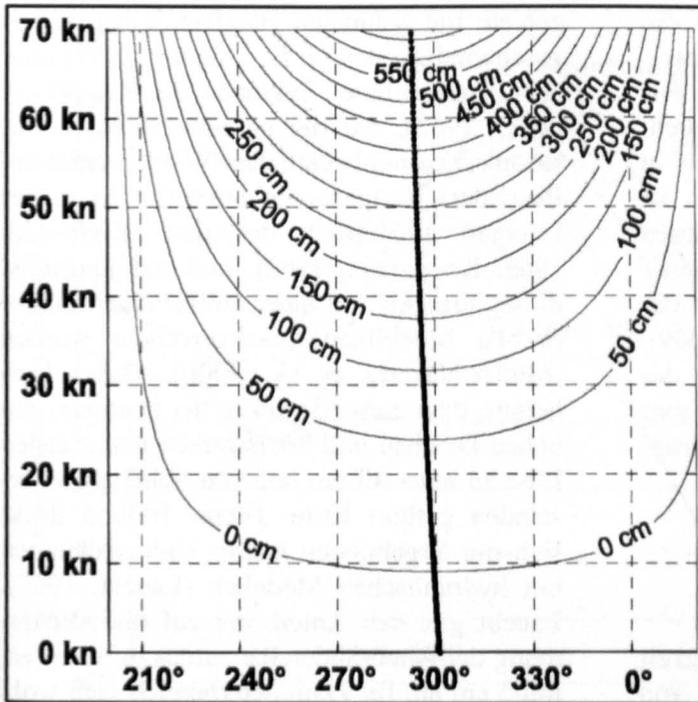


Abb. 2: Windstaudiogramm für Cuxhaven (nach: Müller-Navarra und Giese, 1999).

Welches Flächenmittel des Windes bei der Verwendung des Windstaudiogramms eingehen kann, richtet sich nach den vorhandenen Beobachtungsstationen. Wichtig ist, dass das Anemometer aus allen Richtungen frei angeströmt werden kann (Wagner, 1931). Optimal sind Daten von Feuerschiffen, deren Position auf See sich an den Erfordernissen der Schifffahrt orientiert. Diese Erfordernisse haben sich im Laufe der Jahre jedoch stetig gewandelt und somit auch die Messstationen. Heute sind für Windstauzwecke nutzbar die unbemannten Feuerschiffe „Ems“ und „Deutsche Bucht“ und eingeschränkt die Wetterstation „Helgoland“. Die Feuerschiffsbeobachtungen, die teilweise in langen Zeitreihen vorliegen, haben einen hohen wissenschaftlichen Wert für die maritime Meteorologie und die Küstenozeanographie. Umso mehr muss bedauert werden, dass nach Kenterung und Beschädigung des Feuerschiffes „Elbe“ im Orkan „Anatol“ am 3.12.1999 dieses nicht wieder zum Einsatz kam, und die einmalige, lange meteorologisch-ozeanographische Zeitreihe abbrach.

Der Wind über der Elbe selbst beeinflusst die Wasserstände bei Sturmfluten nur wenig (Rudolph, 2003). Zur Zeit wird in einem Forschungsprojekt dieser Einfluss näher untersucht (Projekt OPTEL, s. u.).

Alle wesentlichen Sturmfluten der Jahre 1901–2008 in Cuxhaven mit Angaben zum Wind und zum Windstau sind in der Sturmflutsammlung des „Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg“ (Gönert und Buß, 2009) verzeichnet. Die 10 höchsten Sturmfluten in Hamburg sind in Tab. 1 aufgeführt; auffallend ist, dass nach dem Jahr 2000 die aufgeführten Scheitelwasserstände nicht mehr übertroffen wurden. Legt man wie üblich die Stufen 1,5 m, 2,5 m und 3,5 m über MHW für die Einteilung in

Klassen „Sturmflut“, „schwere Sturmflut“ und „sehr schwere Sturmflut“ zugrunde, handelt es sich bei allen 10 Fällen der Tab. 1 um sehr schwere Sturmfluten.

Tab. 1: Die 10 höchsten Sturmfluten in Hamburg, Scheitelwasserstände und vorausberechnete mittlere Hochwasser (MHW) des betreffenden Jahres.

Datum	Scheitelwasserstand [cm ü. NN]	MHW
03.01.1976	645	178
10.01.1995	602	203
28.01.1994	602	204
03.12.1999	595	206
24.11.1981	581	193
23.01.1993	576	204
28.02.1990	575	201
05.02.1999	574	206
16.02.1962	570	167
21.01.1976	558	178

Nach wie vor ist der am 9. Februar 1949 am Pegel Husum festgestellte Windstau von etwas mehr als 5 Metern der maximale Wert an der gesamten deutschen Nordseeküste (Tomczak, 1950; Petersen, 1986). Dieser Wert stellte sich jedoch nicht zur astronomischen

Niedrigwasserzeit ein, ist also nicht auf die Verhältnisse zur Hochwasserzeit übertragbar. Das Sturmklima in der Nordsee hat sich nur wenig verändert (Schmidt und v. Storch, 1993). An diesem Befund hat sich auch in jüngster Zeit nichts geändert. Allenfalls ist festzustellen, dass in den letzten 20 Jahren Sturmfluten häufiger in den Monaten Januar bis März auftraten, im gleichen Zeitraum davor tendenziell eher im Herbst (Löwe, 2009). Aussagen über die weitere Entwicklung des Sturmklimas im 21. Jahrhundert sind sehr unsicher und zeigen nur moderate Änderungen (Woth et al., 2005).

### **Einfluss der Strombaumaßnahmen**

Die Änderungen der Höhe und der Häufigkeit von Sturmfluten in der Elbe stromauf von Cuxhaven sind eng mit dem Ausbau der Elbe zu einer leistungsfähigen Schifffahrtsstraße verbunden. Auch die Anlage neuer Hafenbecken in Hamburg und das spätere Zuschütten derselben in späteren Jahren hat die Wasserstände im Hamburger Abschnitt der Elbe beeinflusst (Hensen, 1955). Deshalb hatten empirische Windstautabellen für Hamburg, wie sie z. B. Schultze (1935) aufgestellt hatte, nur so lange Gültigkeit, wie die Elbe unverändert blieb. Aber jeder Ausbaumaßnahme der Elbe folgte ein hydrologisch-morphologischer Nachlauf, der das Strombett und damit die Gezeiten in der Elbe veränderte.

Nach der verheerenden Sturmflut im Februar 1962 ist in der Unterelbe ein Schutzsystem aus Deichen und Sperrwerken geschaffen worden, welches ebenfalls die Scheitelwasserstände nachfolgender Sturmfluten beeinflusste (Siefert, 1998).

### **Ablauf von Sturmfluten**

Den Takt einer Sturmflut geben die Gezeiten und die Zuggeschwindigkeit der Sturmzyklonen mit ihren typischen Zugbahnen (Kruhl, 1978) über die Nordsee an. Entweder sind es kleine, rasch ziehende Tiefdruck-

gebiete mit schmalen Bändern hoher Windgeschwindigkeiten (z. B. „Anatol“ 1999) oder aber ausgedehnte Zyklonen (z. B. „Vincinette“ 1962), die die gesamte Nordsee mit stürmischen nordwestlichen Winden erfassen. Besonders letztgenannte Sturmflut ist in der Literatur ausführlich diskutiert (Rodewald, 1962; Koopmann, 1962), und erst jüngst ist dieses Ereignis mit einer aufwendigen numerischen Modellkette nachgerechnet worden (Müller-Navarra et al., 2006). Dabei kam heraus, dass dieser Sturm in der heutigen, mit hohen Deichen und Sperrwerken eingefassten Elbe zu etwa 40 cm höheren Scheitelwasserständen geführt hätte. Dieser Befund deckt sich mit Ergebnissen älterer Untersuchungen mit hydraulischen Modellen (Laucht, 1967). Laucht gibt den Anteil, der auf die Abdämmung der Alten Süderelbe zurückzuführen ist, mit 5 cm an. Im Zentimeterbereich läge wohl auch der Einfluss auf die bloßen Gezeitenanteile ohne Windstau, wenn man die Alte Süderelbe mit einem Sturmflutsperrwerk versieht. Dann würden die Gezeiten im Süden Finkenwerders wieder ein mit Prielen durchsetztes Süßwasserwatt schaffen (FINDER, 1940).

Da die Wassermassen am 16./17. Februar 1962 bis in die Hamburger Innenstadt eindringen und dort horrenden Schäden verursachen, ist diese heute durch Sturmflutschutzmauern, Sperrwerke, zu schließende Tore und andere Schutzwerke gegen eindringendes Wasser abgeriegelt. Bei der Flutkatastrophe 1962 ist z. B. über den Nikolaifleet Wasser in die Kellerräume der Commerzbank eingedrungen und hat dort die lagernden Aktienbestände in Mitleidenschaft gezogen, so dass diese ersetzt werden mussten.

Aber auch von unten droht Gefahr; die bei „normaler“ Ebbe und Flut offenen Regengewässersiele müssen bei Sturmfluten durch Schieber geschlossen werden.

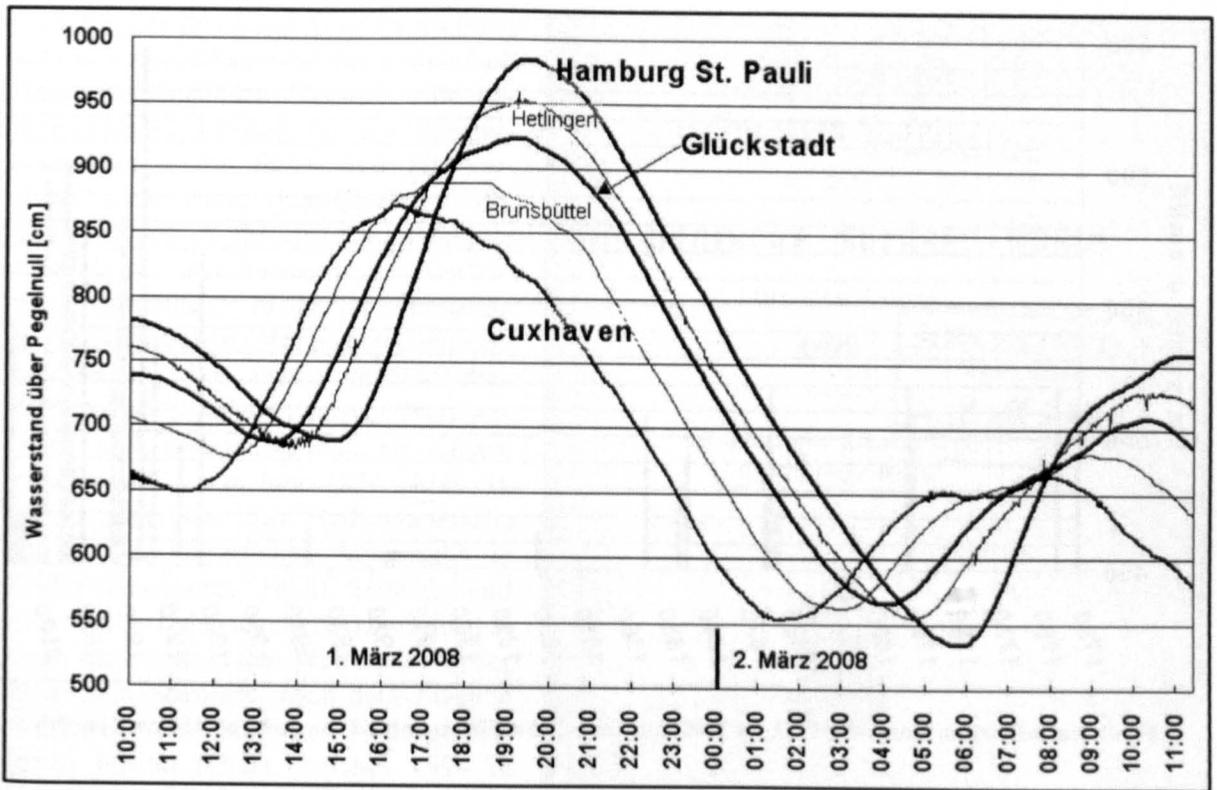


Abb. 3: Wasserstand [cm über PN] in der Elbe bei einer Sturmflut im März 2008.

Abb. 3 zeigt die zeitliche Veränderung des Wasserstandes während einer Sturmflut im März 2008. Die Ordinate gibt die Wasserpiegellage über Pegelnull in Zentimetern an, wobei an der deutschen Nordseeküste das Pegelnull etwa 5 m unter NN gewählt wird. Damit ist gewährleistet, dass keine negativen Messwerte auftreten können. An der sogenannten Wasserstandsganglinie von Hamburg ist die bereits erwähnte deutliche Verkürzung der Steigdauer gegenüber der Falldauer erkennbar. Ebenfalls erkennbar ist, dass der Scheitelwasserstand am 1. März 2008 in Hamburg sehr viel höher liegt als in Cuxhaven. Das ist nur zum Teil auf das mittlere Wasserspiegelgefälle von ca. 20 cm zwischen den beiden Orten zurückzuführen. Vielmehr zeichnet sich hier das dynamische Verhalten langer Wellen in einem sich verengenden Flussbett ab. Da dadurch die Vorhersage von Sturmflutscheitelwasserständen in Hamburg erschwert ist, ist jüngst das Forschungsprojekt OPTTEL initiiert worden (s. u.).

Übrigens liefen bereits im 19. Jahrhundert einige Sturmfluten in Hamburg höher als in Cuxhaven auf, was nicht allein durch die Unterschiede in den Gezeiten erklärbar war (Nehls, 1896).

### Häufigkeit von Sturmfluten in der Elbe

Die Sturmfluten seit Beginn des 20. Jahrhunderts sind gut dokumentiert (Leppik, 1950; Gönnert und Buß, 2009). Wegen der genannten Strombaumaßnahmen lassen sich aber keine gesicherten Aussagen über eine klimabedingte Ab- oder Zunahme der Häufigkeit von schweren Sturmfluten in Hamburg machen.

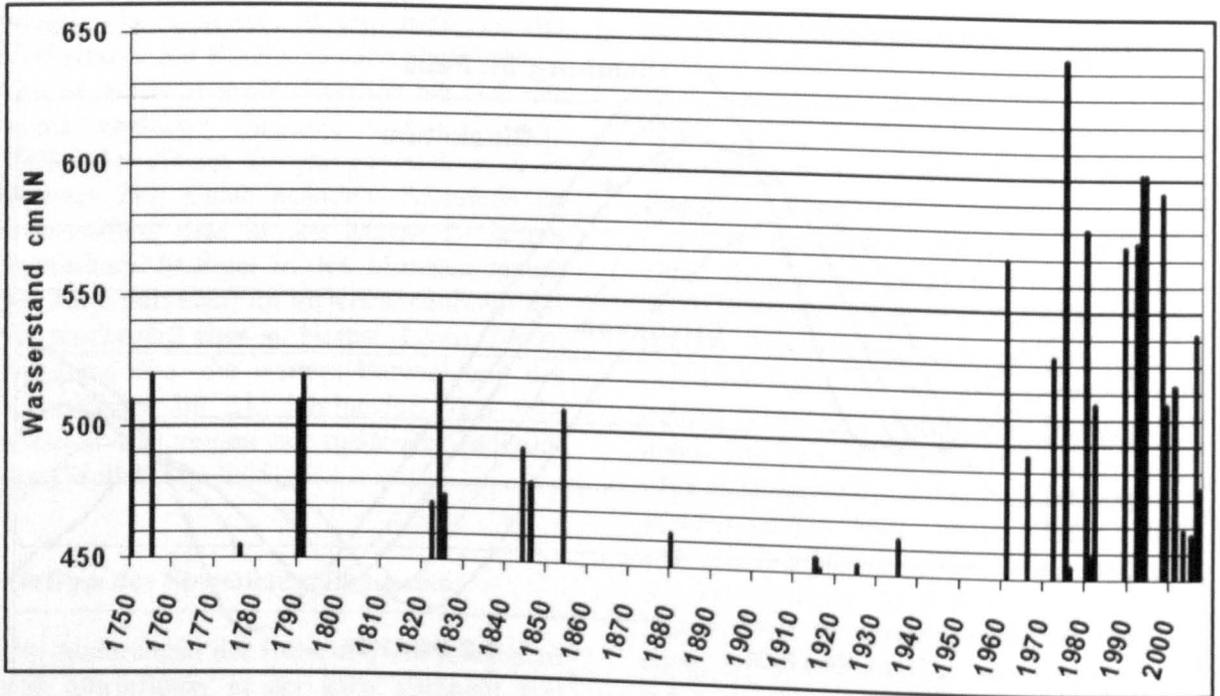


Abb. 4: Sturmfluten in Hamburg 1751 bis 2008 mit einem Scheitelwasserstand von mehr als 450 cm über NN.

Die Häufung nach 1970 ist ausbaubedingt, merkwürdig ist allerdings, dass es vor der katastrophalen Sturmflut 1962 mehr als 100 Jahre sehr ruhig war (Abb. 4). Dafür gibt es bisher keine Erklärung aus der Klimaforschung. Vielleicht zeichnet sich z. Zt. wieder eine solche ruhige Phase ab, denn die Häufigkeit der Sturmfluten ist seit Mitte der 1990er Jahre deutlich rückläufig. Die letzte hohe Sturmflut, ausgelöst durch das Orkantief Anatol, liegt gar 10 Jahre zurück (Müller-Navarra, 2002); im Winter 2008/2009 gab es überhaupt keine Sturmflut an der deutschen Nordseeküste.

### Historische Entwicklung der technisch-wissenschaftlichen Möglichkeiten der Sturmflutvorhersage

Um das in der Einleitung beschriebene Anfangs-Randwertproblem der Vorhersage von Elbe-Sturmfluten zu lösen, waren und sind Innovationen in den Bereichen Meteorologie, Ozeanographie und Technik erforderlich. Bisweilen war dieses auch erst nach der

Gründung spezieller Institutionen wie der Deutschen Seewarte möglich (Wege, 2002). Die Ozeanographie musste sich die Gezeitentheorie und die Erkenntnisse der Hydrodynamik zunutze machen, ohne Datenfernübertragung war keine Wettervorhersage möglich, und alles Erforschte und Entwickelte musste schließlich auch operationell etabliert werden.

### Hydrodynamik, Ozeanographie, Gezeitentheorie

Grundlage für das Verständnis der Strömungszustände in einem Flusse, aber auch der Atmosphäre, war die Formulierung der hydrodynamischen Gleichungen Mitte des 18. Jahrhunderts (Darrigol, 2005). Aber erst, als in diesem Gleichungssystem die Zähigkeit Eingang fand, konnten reale Strömungen beschrieben werden. Für großräumige Bewegungsvorgänge auf geophysikalischer Skala musste in diesen Gleichungssystemen noch die Erdrotation berücksichtigt werden. Damit war die Basis für den Ausbau der Gezeitentheorie geschaffen, wenngleich sich wegen

der komplizierten Land-Wasserverteilung auf der Erdoberfläche mit ihren mehrfach zusammenhängenden Ozeanen eine deterministische Lösung für die dynamische Theorie des Ebbe- und Flut-Problems nicht anbot (Cartwright, 1999). Zunächst war es für einzelne Hafentorte möglich, mit dem harmonischen Verfahren (Schureman, 1924) Gezeitentafeln mit ausführlichen Vorausberechnungen herzustellen. Die ersten ausführlichen Gezeitentafeln für die deutsche Nordseeküste und andere europäische Küsten erschienen für das Jahr 1879 (Abb. 5). Herausgeber war das Hydrographische Bureau der kaiserlichen Admiralität in Berlin (Anonymus, 1878). Seitdem wird diese Jahresreihe ununterbrochen fortgesetzt, nach dem Ersten Weltkrieg von der Deutschen Seewarte, nach dem Zweiten Weltkrieg vom Deutschen Hydrographischen Institut (DHI), welches 1990 in Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) umbenannt wurde.

Gezeitenvorausberechnungen sind die unerlässliche Basis für Wasserstandsvorhersagen und Sturmflutwarnungen für die deutschen Tidegewässer. Erwähnenswert ist, dass wegen der ausgedehnten Flachwassergebiete in der inneren Deutschen Bucht zur Berechnung der Gezeitentafeln deutscher Nordseehäfen (Anonymus, 2008) schon lange nicht mehr das weit verbreitete harmonische Verfahren angewendet wird, sondern die sogenannte „Harmonische Darstellung der Ungleichheiten“ (Horn, 1948). In Anlehnung an das nonharmonische Verfahren (Lubbock, 1831) werden dabei – ausgehend von den Kulminationszeiten des Mondes – die Abweichungen von mittleren Intervallen und Höhen harmonisch beschrieben.

Tideflüsse verändern sich auf natürliche Weise (Rohde, 1971), aber auch von Menschenhand (Hensen, 1955). So ist die Berechnung der deutschen Gezeitentafeln als kontinuierliche, jährlich wiederkehrende Aufgabe zu verstehen.

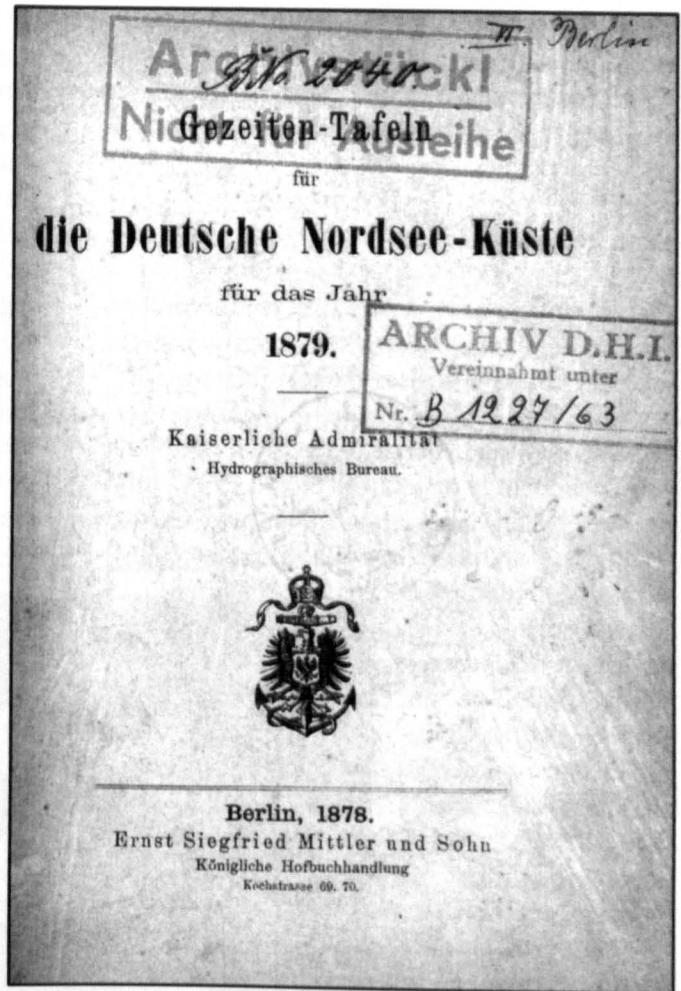


Abb. 5: Erste ausführliche deutsche Gezeitentafel (Anonymus, 1878; Archiv BSH).

Kennt man nun für die Elbehäfen die astronomischen Eintrittszeiten und Höhen der Hoch- und Niedrigwasser, so ist man bei der Wasserstandsvorhersage schon ein gehöriges Stück vorangekommen.

Zum mittleren Tidenhub von 3,6 m in Hamburg können durch meteorologische Vorgänge im Nordatlantik und in der Nordsee sowie dynamische Vorgänge im Elbestrom Wasserstandsänderungen von ebensolcher Größenordnung hinzutreten. Die Überlagerung von Gezeiten und Windstau ist ein nichtlinearer Vorgang. Für praktische Zwecke der Vorhersage kann aber in erster Näherung Linearität angenommen werden.

Was nun also noch fehlt, ist eine verlässliche Windvorhersage für die Deutsche Bucht, da-

mit für die Hoch- und Niedrigwassertermine der Windstau, berechnet z. B. anhand von Abb. 2, zum astronomisch bedingten Gezeitenwasserstand hinzuaddiert werden kann.

### Meteorologie

Wie heute war auch früher das Wettervorhersageproblem ein wesentlich bedeutenderes Problem als die Wasserstandsvorhersage. Es bildeten sich unterschiedliche Schulen der Wettervorhersage heraus, von denen die Norwegische Schule (Bjerknes et al. 1933), die Berliner Schule (Scherhag 1948) und Österreichische Schule (Exner 1925, Defant 1926) zu nennen sind. Als parallel dazu vereinzelt an den numerischen Methoden der thermo- und hydrodynamischen Modellierung gearbeitet wurde (Richardson, 1922), konnte noch nicht deren enormes Potential für Vorhersagezwecke erkannt werden. Die damit verbundenen umfangreichen numerischen Berechnungen mussten noch mit der Hand oder mechanischen Rechenautomaten ausgeführt werden und dauerten einfach zu lange.

Um Sturmflutwetterlagen mit der synoptischen Methode erfolgreich vorherzusagen, bedarf es großer Erfahrung, gerade auch, weil die erarbeiteten Regeln (Scherhag 1962), verbunden mit der Divergenztheorie (Loewe 1923), nicht leicht anzuwenden sind. Seit 1941 wurden an der Deutschen Seewarte und später am Seewetteramt täglich Vorhersagekarten auf der Basis synoptischer Wetterkarten (Abb. 6) erstellt (Anonymus, 1955). Ein Ausschnitt dieser Wetterkarten wurde für den Wasserstandsvorhersagedienst des DHI, spä-

ter des BSH, auf eine kleinere Karte durchgepaust und mit einer Vorhersage des diensthabenden Synoptikers versehen (Abb. 7). Die Vorhersage bezog sich auf die vom „Windstauer“ angegebenen Zeiten bzw. Zeiträume. Das abgebildete Blatt zeigt eine Sturmflutwetterlage am Silvesternachmittag 1994, und der diensthabende Synoptiker (Klaus Buhlmann) sagte für den Folgetag mittags stürmische Nordwestwinde für die Deutsche Bucht voraus, wobei er noch zwischen Ost- und Westteil unterschied. Tatsächlich gab es dann am Neujahrstag eine Sturmflut in Hamburg und der Windstau in Cuxhaven betrug 1,82 m (in Hamburg 2,09 m).

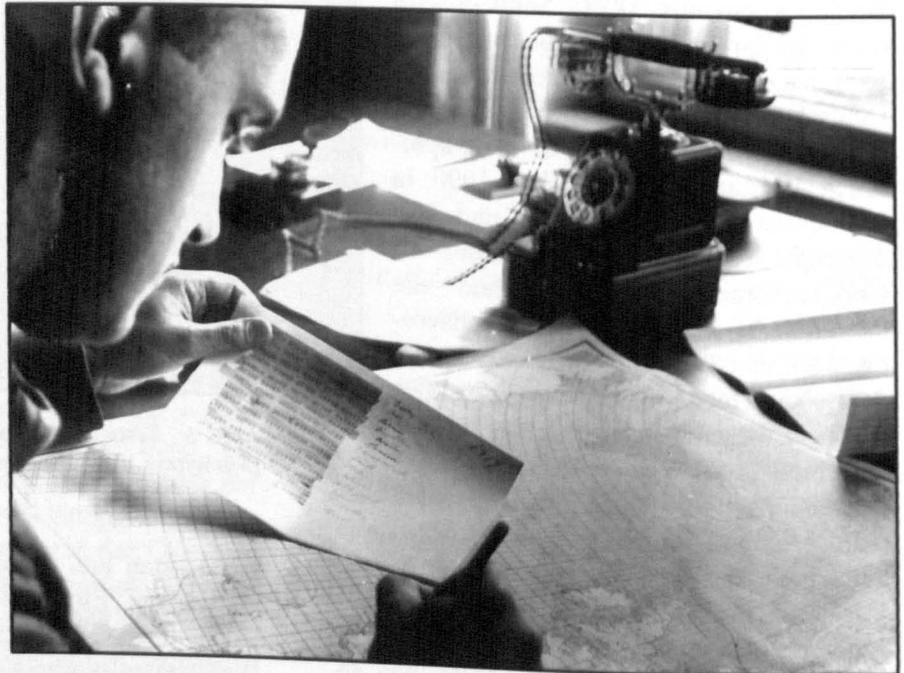


Abb. 6: Meteorologe der Deutschen Seewarte beim Übertragen der Stationsmeldungen in die Wetterkarte (ca. 1930er Jahre, Archiv BSH).

Bis ca. 1996 waren „Butterbrotpapier“ (Abb. 7) und Windstautabelle (Abb. 2) das Rückgrat der Sturmflutvorhersagen für die Elbe. Nur zögerlich fanden numerische Modelle Eingang in die Wasserstandsvorhersage (Müller-Navarra, 2003).

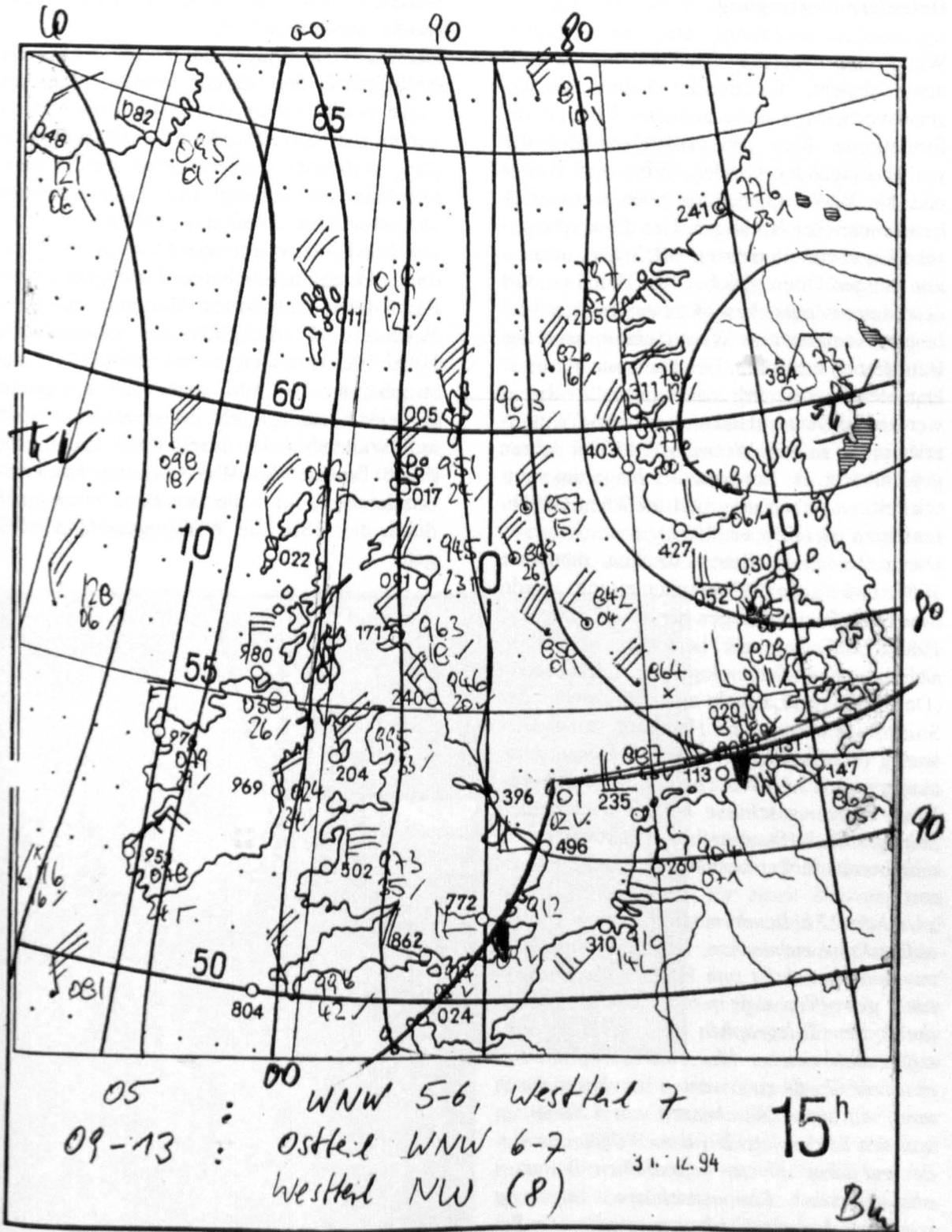


Abb. 7: Sogenanntes Butterbrotpapier, eine vom Seewetteramt Hamburg für den Windstudienst des BSH aus Stationsmeldungen erstellte Analysekarte, ergänzt um synoptische Windvorhersagen für die innere Deutsche Bucht für den 01.01.1995.

## Datenfernübertragung

Wenn man von der Gezeitenvorausberechnung absieht, funktioniert keine Wasserstandsvorhersage ohne zeitnahe flächige Informationen über den Anfangszustand der vorherzusagenden Größen. Wind und Wetter und die Wasserspiegellage müssen zu einer bestimmten Zeit vorliegen. Um diese synoptische Lagebeurteilung zu ermöglichen, müssen von einigen Orten gleichzeitige Daten am Ort des Meteorologen bzw. Ozeanographen vorliegen. Auch etwaige Warnungen müssen den Betroffenen erreichen. Das kann nur mit einer Datenfernübertragung technisch realisiert werden. In Deutschland war die frühe Wettertelegraphie in den 1860er und 1870er Jahren gegenüber z. B. Nordamerika lange unterentwickelt, was auch an grundsätzlichen Gebührenfragen lag (Köppen, 1932).

Die erste, praktischen Zwecken dienende, 3000 Fuß lange Telegraphenleitung wurde bereits 1833 in Göttingen hergestellt (Gresky, 1986/87). Es ist sehr bemerkenswert, dass sich diese neue Technologie rasch durchsetzte (Dub, 1863) und alsbald auch für Zwecke der Sturmflutwarnung in Hamburg eingesetzt wurde (Schaumann, 1857). Mit Bekanntmachung vom 12.3.1855 „*betr. Einführung früherer Warnungsschüsse bei zu erwartenden Sturmfluthen*“ (Staatsarchiv Hamburg) wurde eine bereits länger bestehende Praxis verbessert:

*„Um das Publicum möglichst früh darauf aufmerksam zu machen, daß eine Sturmfluth zu erwarten sei, ist zum Versuch die Einrichtung getroffen, daß sobald von Cuxhaven durch den Telegraphen eine Meldung eintrifft, nach welcher hier eine Sturmfluth von mittlerer Größe zu erwarten ist, dieses durch zwei, mit einer Zwischenzeit von 3 Secunden von den beiden jetzt bei dem Wilhelminenbade und Groß Ericus befindlichen Batterien abzufeuernde Kanonenschüsse angezeigt wird. Ist der aus Cuxhaven eingehende Bericht aber der Art, daß eine große Sturmfluth hier zu erwarten ist, so wird jenes Signal von zwei rasch auf einander folgenden Kanonen-*

*schüssen nach einer Zwischenzeit von 20 Secunden wiederholt.“*

Natürlich fehlte nicht der Hinweis über die Anfälligkeit der neuen Technik und die Eigenverantwortung der Beteiligten. Später konnte die Zuverlässigkeit der Datenübertragung verbessert werden, indem die Telegraphenleitungen entlang von Eisenbahnlinien verlegt wurden (Anonymus, 1899).

Die Praxis der Warnungsschüsse an verschiedenen Orten im Hamburger Hafengebiet wurde bis heute beibehalten. Man mag sich beim Warnen nicht lediglich auf elektronische Hilfsmittel verlassen; zu sehr wirkt die Katastrophe vom 16.2.1962 nach. Abb. 8 zeigt die Böllerschießanlage am Maakenwerder Höft auf Waltershof im Hamburger Hafen, wo durch Beamte des Wasserschutzpolizeikommissariats 1, im Falle der Benachrichtigung durch das BSH, die Warnungsschüsse erfolgen.



Abb. 8: Böllerschießanlage am Maakenwerder Höft auf Waltershof im Hamburger Hafen.

Dazu wird in das schräg in Beton verankerte Rohr (rechte Bildhälfte) eine Signalbombe gesteckt und die Lunte entzündet. Hinter der stählernen Schutzwand (linke Bildhälfte) kann der Beamte bei der Explosion der Ladung Schutz suchen.

Obwohl sich die Wettertelegraphie früh durchgesetzt hatte, vergingen noch viele Jahre, bis auch gemessene Pegelstände automatisch über Draht vom Pegel Hamburg-St.-Pauli zu einem Schreibautomaten auf dem Pegeltisch der Seewarte (Abb. 9) übertragen werden konnten (Anonymus, 1925). Heute laufen die Pegeldata von vielen Pegeln aus Nord- und Ostsee im Minutentakt (Abb. 3) in die Computeranlage im Sturmflutwarndienst des BSH ein und werden dort sofort für die Vorhersage automatisch weiterverarbeitet (Müller-Navarra, 2009).

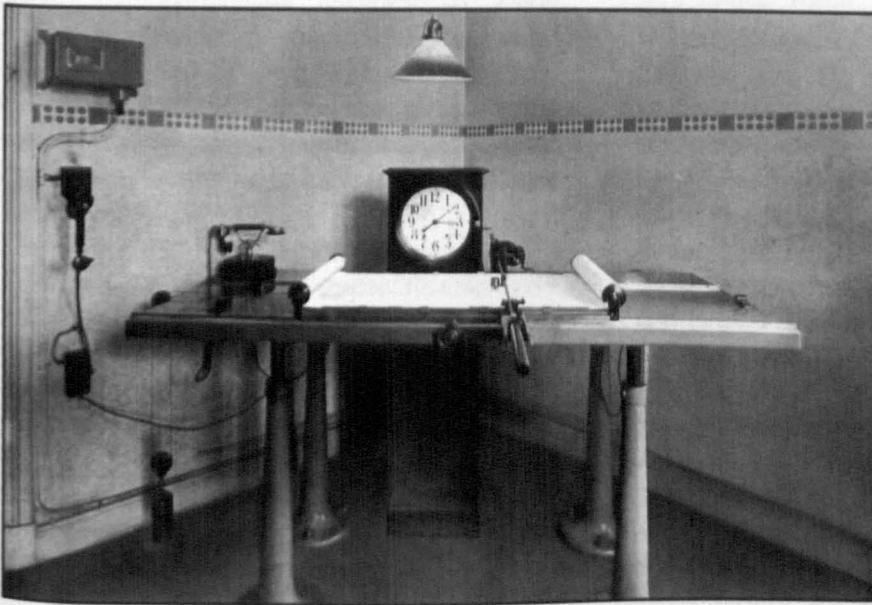


Abb. 9: Der Pegeltisch in der Deutschen Seewarte (Anonymus, 1925).

Überhaupt stellt die Datenfernübertragung heute kein wesentliches Problem der Vorhersage von Sturmfluten mehr dar. Für den außergewöhnlichen Katastrophenfall, wie auch immer dieser einmal aussehen mag, muss es aber eine Rückfallposition geben, die

Vorhersagen und Warnungen mit einfachsten Mitteln ohne jede Informationstechnologie erlaubt.

### Numerische Modelle

Die numerische Gezeiten- und Wasserstandsmodellierung markiert den Beginn der numerischen Sturmflutvorhersage. Es konnte bereits in den 1950er Jahren am Beispiel des Holland-Orkans gezeigt werden, dass derartige Extremereignisse in der Nordsee tatsächlich mit numerischen Verfahren berechenbar waren, allerdings zunächst im Nachhersagemodus (Hansen, 1956; Fischer, 1978).

Als in den 1950er Jahren mit den Computern und geeigneten Compilern wie FORTRAN (Backus, 1979) schließlich die numerische Wettervorhersage realisiert wurde, kommentierte das der erfahrene Synoptiker Scherhag (1962) folgendermaßen, wobei er sich auf labile Gleichgewichtszustände in großen Teilen der Atmosphäre bezog:

*„Wegen dieser grundsätzlichen Schwierigkeiten ist es noch immer nicht möglich, entscheidende Wetterumschläge für einen Zeitraum von mehr als 36 Stunden mit ausreichender Genauigkeit vorherzusagen, und in dieser Hinsicht teilen bis jetzt alle Verfahren der mathematischen*

*Wettervorhersage die Unzulänglichkeit des menschlichen Gehirns. Während sie eine normale Weiterentwicklung einer Wetterlage mindestens ebensogut wie besonders qualifizierte Meteorologen – die dabei übrigens eigener Verantwortung enthoben werden – vorhersagen, versagen sie dagegen bei den großen Umschlägen meistens noch mehr als die Experten auf dem Gebiet der Wettervorhersage, denen es – zur Beschämung unserer*

*so differenziert gewordenen Wissenschaft – zuweilen sogar mit eigentlich „primitiven“ Methoden gelingt, das Wetter am besten vorherzusagen.“*

Trotz alledem hat es aber in den zurückliegenden 50 Jahren einen Siegeszug der numerischen Wettervorhersage (NWV) gegeben (Reiser, 2000), der letztlich auch in der Verbesserung der Sturmflutvorhersage abzulesen ist (Jensen und Müller-Navarra, 2008). Bis jedoch Wettervorhersage- und Wasserstandsmodelle automatisch, ohne manuelle Eingriffe gekoppelt wurden, vergingen noch fast 30 Jahre. Das lag nicht nur an technischen Problemen, sondern auch daran, dass man den Aufwand einer solchen Modellkette scheute, weil man sich mit synoptischen Verfahren der Wettervorhersage und empirischen Methoden der Wasserstandsvorhersage (Annutsch, 1978) den Modellverfahren als mindestens ebenbürtig fühlte.

Zunächst machte man auf Meteorologenseite entscheidende Fortschritte. In der zweiten Hälfte der 1960er Jahre deutete sich schon beim Deutschen Wetterdienst an, dass die numerische Wettervorhersage (Oeckel, 1979) dem Scherhag'schen Ansatz zumindest ebenbürtig ist (Balzer, 2002), wobei noch nicht alle wesentlichen Wetterelemente numerisch vorhergesagt werden konnten. Als schließlich die vorhergesagten Bodenluftdruckfelder via Global Telecommunication System (GTS) verfügbar wurden, konnte man Anfang der 1980er Jahre auf seiten des BSH ein Wasserstandsmodell der Nordsee nachschalten (Soetje und Brockmann, 1983). Aber auch nach 27 Jahren wird aus guten Gründen nicht auf eine persönliche Beratung durch einen Meteorologen verzichtet, obschon letzterer natürlich auch die verschiedenen international verfügbaren Atmosphärenmodelle zu Rate zieht. Aktuell stützt sich die Sturmflutvorhersage für die Elbe auf eine Modellkette, bestehend aus den DWD-Modellen GME (global) und LME (Europa) (Steppeler et al., 2003) und dem nachgeschalteten Modell BSHcmf für Nord- und Ostsee (Dick et al., 2001). Das 2-dimensionale BSH-Modell läuft dabei täg-

lich viermal mit den Startterminen 0, 6, 12 und 18 Uhr UTC.

Man kann prächtig darüber philosophieren, ob heutzutage noch ein erfahrener Synoptiker klassischer Prägung in der Wettervorhersage benötigt wird (Balzer 2002). Zumindest bei Extremereignissen, wie es Sturmflutwetterlagen sind, geht es ohne den Menschen nicht. So hat z. B. das Orkantief „Kyrill“ im Jahre 2007 eindrücklich die Grenzen der numerischen Wettervorhersage aufgezeigt. Vermutlich wegen der mangelhaften Messdatendichte auf offener See berechneten die Modelle die Zuggeschwindigkeit des Orkantiefs über der Nordsee nicht genau genug (Müller-Navarra, 2008). Natürlich geht es heute nicht mehr darum, auf der Basis unterschiedlicher (Höhen-) Wetterkarten und Tendenzkarten mit Regeln der Synoptik Vorhersagekarten zu konstruieren, sondern vielmehr darum, die zahlreichen automatischen Produkte aus der NWV zu bewerten, gegebenenfalls einzelne (extreme) Wetterelemente anders vorherzusagen und entsprechende Warnungen abzuleiten. Dass dabei synoptische Fähigkeiten und intime Kenntnisse der Atmosphärenmodellierung nötig sind, ist offensichtlich.

### Organisatorisches

Bis Ende des ersten Weltkrieges war der Windstaudienst eine interne Angelegenheit der Kriegsmarine und beim Marineobservatorium in Wilhelmshaven angesiedelt. Für diesen Zweck war ein Verfahren entwickelt worden, welches ein homogenes Windfeld über der Nordsee voraussetzte und daher für Sturmfluten nur eingeschränkt benutzbar war (Leverkinck, 1915).

Vor dem 2. Weltkrieg bis 1937 waren die meteorologische Vorhersage und die Sturmflutvorhersage in der Deutschen Seewarte örtlich vereinigt. Schaut man die Jahresberichte der Seewarte der 1920er und 1930er Jahre durch und vergleicht darin die Abschnitte „Sturmflutwarnungsdienst“ untereinander und mit den Verhältnissen heute, so wird deutlich, dass sich organisatorisch-konzeptionell bis

heute sehr wenig geändert hat. Die Methoden der Vorhersage haben sich mit den technischen Möglichkeiten, wie oben geschildert, dramatisch verändert, nicht jedoch deren Weg zu den Betroffenen, wenn man einmal vom Internet ([www.bsh.de](http://www.bsh.de)) absieht.

Schon in den 1920er Jahren gab es z. B. Warnungen durch Fernsprecher:

*„Warnungen vor dem Eintreten höherer Wasserstände in Hamburg, Harburg-Wilhelmsburg, Neuenfelde, Altenwerder, etc. infolge der Einwirkung des Windes auf die Wasseroberfläche der Nordsee und Elbe wurden im Berichtsjahre an etwa 15 durch Fernsprecher erreichbare Behörden, Baustellen oder Privatfirmen erlassen.“* (Anonymus, 1929). In den folgenden Jahresberichten zeigt sich, wie die Anzahl der Warnungsempfänger sukzessive anstieg. Der Sturmflutwarnungsdienst wurde *„1925 auf die gesamte deutschen Nordseeküste einschließlich der zugehörigen Flußgebiete ausgedehnt“* (Anonymus, 1929).

Schon 1930 gab es bei den Bearbeitern im Windstaudienst einen wöchentlichen Wechsel, und bei unbeständigem Wetter wurde auch abends eine weitere Vorhersage erstellt. Sogar nachts war ein „Windstauer“ in seiner Wohnung erreichbar (Anonymus, 1931).

Die Leiter des Sturmflutwarndienstes für die Elbe und die gesamte deutsche Nordseeküste haben diese Verantwortung immer recht lange getragen. Deshalb nimmt deren Nennung für die Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg nur wenig Platz ein: Dr. Gerhard Tomczak, Dr. Georg Koopmann, Ralph Annutsch, Wolfgang Lange und ab 2005 der Verfasser.

Die Sturmflutvorhersage und -warnung in Deutschland erfolgt zentral durch das BSH (Jensen und Müller-Navarra, 2008). Die Vorhersagen werden den zuständigen Landesdienststellen der Bundesländer zur Verfügung gestellt, die aus diesen Informationen für ihren Zuständigkeitsbereich Regionalisierungen vornehmen und Maßnahmen zur Gefahrenabwehr ableiten (Dibbern, 2008). Für Hamburg mit seinen vielfältigen Sturmflutschutzanlagen wurde 1976 der Hamburger Sturmflutwarndienst (WADI) eingerichtet (Anfang, 1983), der zusätzlich zu den Vorhersagen des

BSH ein empirisches Verfahren zur Vorhersage der Sturmflutwasserstände in Hamburg anwendet (Siefert und Christiansen, 1983). Der WADI wird nur aktiv bei schweren Sturmfluten, wenn ein Hochwasser von über 2,5 m über mittlerem Hochwasser zu erwarten ist. Die der Öffentlichkeit zu übermittelnden voraussichtlichen Sturmflutscheitelhöhen werden zwischen dem BSH und den Landesbehörden abgestimmt.

## Ausblick

Natürlich ist auch die heutige Wasserstandsvorhersage noch nicht perfekt, insbesondere mangelt es bei Sturmflutwetterlagen gelegentlich noch an der Vorhersage einer genauen zeitlichen Entwicklung des örtlichen Windfeldes in der Deutschen Bucht (Müller-Navarra, 2008).

Ein großes Problem der nahen Zukunft wird sein, dass die Automatisierung der Vorhersagen, sowohl der meteorologischen als auch der ozeanographischen, aus Kostengründen mehr und mehr um sich greift. Automatisierung meint hier, dass letztlich auf den Beitrag des Menschen, des Synoptikers und des Ozeanographen, bei der Ausarbeitung der Vorhersagen verzichtet werden soll. Das mag bei einer Vielzahl der vorherzusagenden Wetterelemente zu brauchbaren Resultaten führen (Balzer, 2002), bei Sturmfluten wird das aber wegen mangelhafter Datendichte über See nicht funktionieren, wie oben bereits ausgeführt.

Ein anderes, noch weitgehend ungelöstes Problem ist die Parametrisierung des Impulstransfers Atmosphäre/Meer bei extremen Sturmfluten. Während diese Parametrisierung bei Windgeschwindigkeiten bis ca. 25 m/s als durch Messergebnisse gut abgesichert gelten kann (Smith und Banke, 1975), ist das jenseits dieses Wertes nicht der Fall. Sowohl die Berechnung des Windprofil und damit des 10-m-Windes in Atmosphärenmodellen als auch die Berechnung des von der Windgeschwindigkeit abhängigen Windschubkoeffizienten in

solchen Fällen sind noch Gegenstand der Forschung (Jensen et al., 2006).

Systematische Fehler der numerischen Wettervorhersage an einzelnen Orten lassen sich manuell durch den Synoptiker oder auch automatisch korrigieren. In der Meteorologie existieren für letzteres seit gut 40 Jahren Vorhersageverfahren, die auf statistische Weise Modellvorhersagen und gemessene Größen miteinander verknüpfen und deutliche Verbesserungen der Wettervorhersagen ermöglichen haben (MOS, model output statistics, Glahn et al., 1972). Ein Beispiel für die Brauchbarkeit des MOS-Verfahrens ist die Flugwetterberatung. Ob sich dieses auf die Wasserstandsvorhersage übertragen lässt, wird zur Zeit durch das BSH in Zusammenarbeit mit einer auf solche Verfahren spezialisierten Berliner Firma untersucht. Es ist zunächst nicht zu erwarten, dass MOS die Sturmflutvorhersagen verbessern wird, es ist als Werkzeug zur Verbesserung der Wasserstandsvorhersagen bei geringeren Windgeschwindigkeiten und für die Schifffahrt anzusehen.

Ob Ensemble-Prediction-Systeme (EPS) die Qualität der Sturmflutvorhersagen nachhaltig verbessern werden, bleibt abzuwarten. Damit wird es zwar gelingen, den vorhergesagten Ereignissen eine Wahrscheinlichkeit zuzuordnen, erfahrungsgemäß kann der Empfänger der Vorhersagen und Warnungen mit derlei Informationen aber nichts anfangen. Für den Vorhersager ist es aber durchaus nützlich zu wissen, ob eine hohe Prozentzahl der einzelnen Modellläufe dieselben Zugbahnen und Zuggeschwindigkeiten aufweist. Dann wird er in der Lage sein, sich vielleicht etwas früher als bisher auf das Eintreten eines Extremereignisses festzulegen.

Für den Katastrophenschutz kann es je nach Küstenabschnitt sinnvoll sein, bei Sturmfluten neben den Scheitelwasserständen auch Informationen über den Seegang zu erhalten, denn die Deiche sind auch durch Wellenüberlauf gefährdet (Mai, 2004). Seegangsvorhersagen an Flachküsten bei Sturmfluten erfordern wegen des Brechens der Wellen und wegen der nichtlinearen Wechselwirkung mit der Strö-

mung eine hohe Auflösung. Wegen des enormen Rechenzeitbedarfs solcher Simulationen gibt es bis heute noch keine brauchbaren operationellen Vorhersagen des seegangsbedingten Anteil am Anstau des Wassers für die deutsche Küste. Es ist aber in den zurückliegenden Jahren am BSH eine theoretische Ausarbeitung erfolgt sowie ein erstes Nachhersagemodell mit einer horizontalen Auflösung von knapp 2 km entwickelt worden (Murawski, 2007), welches in naher Zukunft für die Vorhersage des Seegangs an der Küste eingesetzt werden kann. Nachhersagen extremer Sturmfluten mit diesem Modell zeigten, dass mit dem Brechen der Wellen im Küstenvorfeld ein „wave-set-up“ von wenigen Dezimetern zwischen und hinter den vorgelagerten Inseln auftritt.

Die noch bestehenden Unsicherheiten der Windstauentwicklung auf der Elbe zwischen Mündung und Bleckede sollen in den nächsten Jahren durch die Entwicklung eines operationellen Tideelbmodells auf der Basis bestehender Modelltechnologie beseitigt werden. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsprojekt OPTEL (Windstaudstudien und Entwicklung eines operationellen Elbmodells) ist im April 2008 als Verbundprojekt von Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Deutschem Wetterdienst (DWD), Hamburg Port Authority (HPA) und Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) gestartet. Dieses Modell wird die Modellfamilie des BSH erweitern mit der Option, später auch die anderen Ästuare an der deutschen Nordseeküste einzubeziehen. Die Daten stehen nach operationeller Inbetriebnahme des Elbmodells allen Verwaltungen von Bund und Ländern zur Verfügung.

## Literatur

- Annutsch, R.** 1978, Über das empirisch-statistische Sturmflutvorhersageverfahren des Deutschen Hydrographischen Instituts. *Promet* 8, 12–15.
- Anonymus** 1878, *Gezeiten-Tafeln für die Deutsche Nordsee-Küste für das Jahr 1879*. Kaiserliche Admiralität, Hydrographisches Bureau, Berlin: Mittler. 48 S.
- Anonymus** 1899, *50 Jahre elektrischer Telegraphie. 1849 – 1. Oktober – 1899*. Berlin, Reichsdruckerei. 99 S.
- Anonymus** 1925, Aus dem Arbeitsbereiche der Deutschen Seewarte in Hamburg. Die Förderung des Verkehrs. Hamburg, 48 S.
- Anonymus** 1929, *Vierundfünfzigster Jahresbericht über die Tätigkeit der Deutschen Seewarte 1928*. Hamburg, 55 S.
- Anonymus** 1931, *Dreiundfünfzigster Jahresbericht über die Tätigkeit der Deutschen Seewarte 1930*. Hamburg, 52 S.
- Anonymus** 1955, *Statistical investigations of some forecast rules by R. Scherhag, M. Rodewald and R. C. Sutcliffe carried out at the Institut für Meteorologie und Geophysik der Freien Universität Berlin*. Berlin, 90 S.
- Anonymus** 1964, *Hochwasserschutz in Hamburg*. Hamburger Schriften zum Bau- Wohnungs- und Siedlungswesen Nr. 39. Baubehörde Hamburg.
- Anonymus**, 2008: *Gezeitentafeln 2009 Europäische Gewässer*. Hamburg, 246 S.
- Antfang, H.** 1983, Aufbau und Organisation des hamburger Sturmflutwarndienstes, *Hamburger Küstenforschung* 42, 1–39.
- Backus, J.** 1979, The History of Fortran, *Annals of the History of Computing* 1, 21–37.
- Balzer, K.** 2002, Zum Mensch-Maschine-Konflikt in der Wettervorhersage, *Promet* 28, 46–54.
- Baur, F.** (Hg.) 1962, *Meteorologisches Taschenbuch* Bd. I, 2. Aufl., Leipzig, 806 S.
- Bjerknes, V., Bjerknes, J., Solberg, H., Bergeron, T.** 1933, *Physikalische Hydrodynamik mit Anwendung auf die dynamische Meteorologie*, Berlin, 797 S.
- Brünger, W.** (Hg.) 1955, *Hamburg – Groszstadt und Welthafen*. Festschr. 30. Dt. Geographentag, Kiel. 326 S.
- Cartwright, D. E.** 1999: *Tides: a scientific history*. Cambridge, 292 S.
- Darrigol, O.** 2005, *Worlds of Flow - A History of Hydrodynamics from the Bernoullis to Prandtl*. Oxford University Press, 300 S.
- Defant, A.** 1926, *Wetter und Wettervorhersage*, 2. Aufl., Leipzig u. Wien, 346 S.
- Dibbern, S.** 2008, *Regionalisierung von Sturmfluten an der Schleswig-Holsteinischen Westküste*. Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar. 77 S.
- Dick, S., Kleine, E., Müller-Navarra, S. H., Klein, H., Komo, H.** 2001, The Operational Circulation Model of BSH (BSHcmod) – Model description and validation. *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie* 29, 49 pp.
- Dub, J.** 1863, *Die Anwendung des Elektromagnetismus mit besonderer Berücksichtigung der Telegraphie*. Berlin, Springer. 645 S.
- Dücker, H. P., Glindemann, H., Thode, K., Witte, H.-H.** 2006, *Konzept für eine nachhaltige Entwicklung der Tidelbe als Lebensader der Metropolregion Hamburg. Ein Diskussionsbeitrag der Hamburg Port Authority und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes*. Hamburg, 18 S.
- Exner, F. M.** 1925, *Dynamische Meteorologie*, 2. Aufl., Wien, 421 S.
- Finder, E.** 1940, *Die Elbinsel Finkenwärder. Geschichte, Landes- u. Volkskunde Niedersachsens*. Hamburg, 346 S.
- Fischer, G.** 1978, Ergebnisse der Sturmflutvorhersage-Modellierung im SFB 94. *Promet* 8, 17–21.
- Franzius, F., Bökemann, K.** 1927, *See- und Hafenbau*. Berlin, de Gruyter, 152 S.
- Gerritsen, H., de Vries, H., Philippart, M.** 1995, The Dutch Continental Shelf Model, in *Quantitative Skill Assessment for Coastal Ocean Models, Coastal Estuarine Studies* 47, edited by D. R. Lynch and C. N. K. Mooers, pp. 425–467, AGU, Washington, D. C.
- Glahn, H. R., Lowry, D. A.** 1972: The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting, *J. Appl. Meteor.* 11, 1203–1211.
- Gönnert, G., Buß, T.** 2009, *Sturmfluten zur Bemessung von Hochwasserschutzanlagen*. Berichte des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer Nr.2.
- Gresky, W.** 1986/87, Die Gauß-Webersche Telegraphenleitung, erneutes Verlegen zum Universitätsjubiläum 1887. *Gauss-Gesellschaft e. V. Mitteilungen* 23/24, 31–83.
- Hansen, W.** 1956, Theorie zur Errechnung des Wasserstandes und der Strömungen in Randmeeren nebst Anwendungen. *Tellus* 8, 287–300.
- Hensen, W.** 1955, *Stromregelungen, Hafengebauten, Sturmfluten in der Elbe und ihr Einfluss auf den Tideablauf*, in: Brünger 1955, 60–94.

- Hessel**, P. 1675, *Hertzfliessende Betrachtungen von dem Elbe-Strom: zur Danckbahrkeit gegen Gott geschöpffet, daneben allen Schiff-Leuten zu einer geistlichen Zeit-Vertreibung vermacht, auch einem jeden Christen in diesem Angst-See zu gut aufgesetzt*. Altona, Leeu. 204 S.
- Horn**, W. 1948, Über die Darstellung der Gezeiten als Funktion der Zeit. *Dtsch. Hydrogr. Z.* 1, 124–140.
- Jensen**, J., **Müller-Navarra**, S. H. 2008, Storm Surges on the German Coast, *Die Küste* 74, 92–124.
- Jensen**, J., **Mudersbach**, C., **Müller-Navarra**, S. H., **Bork**, I., **Koziar**, C., **Renner**, V. 2006, Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. *Die Küste* 71, 123–167.
- Kleine**, E. 1994, *Das operationelle Modell des BSH für Nordsee und Ostsee. Konzeption und Übersicht*. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg. 126 S.
- Köppen**, W. 1932, Die Anfänge der deutschen Wettertelegraphie in den Jahren 1862–1880. *Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre* 19, 27–33.
- Koopmann**, G. 1962, Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 in ozeanographischer Sicht. *Die Küste* 10/2, 55–68.
- Kruhl**, H. 1978, Sturmflut-Wetterlagen. *Promet* 8, 6–8.
- Laucht**, H. 1967, Über hohe Sturmfluten und ihre Häufigkeit in Hamburg. *Schriftenreihe der Behörde für Wirtschaft und Verkehr der Freien und Hansestadt Hamburg*, Heft Nr. 4, 38 S.
- Lentz**, H. 1879, *Fluth und Ebbe und die Wirkungen des Windes auf den Meeresspiegel*. Hamburg, Meissner. 230 S.
- Leppik**, E. 1950, *Die Sturmfluten in der Elbmündung in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts*. Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch Nr. 1. WSA Hamburg. 62 S.
- Leverkinck**, G. 1915, *Über den Einfluß des Windes auf die Gezeiten unter besonderer Berücksichtigung Wilhelmshavens und der Deutschen Bucht*. Veröff. d. Kaiserl. Observ. in Wilhelmshaven. Berlin, Mittler. 50 S.
- Loewe**, F. 1923, Report on the divergence theory of the formation of cyclones, Commonwealth of Australia, *Meteorol. Bureau, Bull.* 29.
- Löwe**, P. 2009, Atmosphärenphysik. In: Löwe 2009, 35–78.
- Löwe**, P. (Hg.) 2009, System Nordsee – Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen. *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie* 44, Hamburg.
- Lubbock**, J. W. 1832, On the Tides in the port of London. *London, Philos. Trans.* 595–599 S.
- Mai**, S. 2004, *Klimafolgenanalyse und Risiko für eine Küstenzone am Beispiel der Jade-Weser-Region*. Universität Hannover, Franzius-Institut f. Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Mitteilungen H. 91. 275 S.
- Marmer**, H. A. 1926, *The Tide*. Appleton & Co., New York, 282 S.
- Marsal**, D. 1976, *Die numerische Lösung partieller Differentialgleichungen in Wissenschaft und Technik*. Bibliogr. Inst. Zürich. 574 S.
- Müller-Navarra**, S. H., **Giese**, H. 1999, Improvements of an Empirical Model to Forecast Wind Surge in the German Bight. *Dt. hydrogr. Z.* 51, 385–405
- Müller-Navarra**, S. H. 2002, *Zur Vorhersage schwerer Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste*. In: G. Tetzlaff, T. Trautmann, S. Radtke: Zweites Forum Katastrophenvorsorge „Extreme Naturereignisse – Folgen, Vorsorge, Werkzeuge“, Bonn und Leipzig, 2002, 34–42.
- Müller-Navarra**, S. H., **Lange**, W., **Dick**, S., **Soetje**, K. C. 2003, Über die Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage: Hydrodynamisch-numerische Modelle der Nord- und Ostsee und empirisch-statistisches Verfahren für die Deutsche Bucht. *Promet* 29, 117–124.
- Müller-Navarra**, S. H., **Bork**, I., **Jensen**, J., **Koziar**, C., **Mudersbach**, C., **Rudolph**, E. 2006, Modellstudien zur Sturmflut und zum Hamburg-Orkan 1962. *Hansa* 143, 12/06, 72–88.
- Müller-Navarra**, S. H. 2008, Zur Vorhersagbarkeit schwerer Sturmfluten an deutschen Küsten. *Mitteilungen DMG* 02/2008, 9–10.
- Müller-Navarra**, S. H. 2009, Zur automatischen Scheitelpunktbestimmung gemessener Tidekurven in der Deutschen Bucht. *Z. Veröff. angen., Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* [53].
- Murawski**, J. 2007, *Die Wechselwirkung von Seegang und Strömung: Eine theoretische Grundlegung mit Modellanwendungen*. *Berichte der GKSS* 2007/12. 130 S.
- Nehls**, C. 1896, *Die Sturmfluthen in der Elbe, insbesondere die Sturmfluthen vom 12. Februar und vom 22./23. December 1894, sowie vom 5. und 8. December 1895*. Sonderabdruck aus dem Hydrologischen Jahresbericht von der Elbe für 1895. Magdeburg, 30 S.

- Oeckel, H.** 1979, Erfahrungen mit den Vorhersagemodellen, DMG Zweigverein Frankfurt, Fortbildungsveranstaltung über numerische Wettervorhersage, Offenbach, 135–165.
- Petersen, M.** 1986, Die Geschichte der Sturmfluthydrologie. *Veröff. Stadtarchiv Stade* 5, 14–21.
- Prandtl, L.** 1935, *Abriß der Strömungslehre*. 2. Aufl., 223 S.
- Reiser, H.** 2000, *Development of NWP in the Deutscher Wetterdienst*, in: Spekat 2000, 51–78.
- Richardson, L. F.** 1922, *Weather prediction by numerical process*. Cambridge, 236 S.
- Rodewald, M.** 1962, Zur Entstehungsgeschichte der Sturmflutwetterlagen in der Nordsee im Februar 1962. *Die Küste* 10/2, 1–54.
- Rohde, H.** 1971, Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Wasserstraße. *Mitt. Franzius-Inst.* 36, TU Hannover. 17–241.
- Rudolph, E.** 2003, Sturmfluten in den deutschen Ästuaren, *BAW Mitteilungsblatt* 86, 69–74.
- Rudolph, E.** 2005, Einfluss sehr hoher Abflüsse auf die Wasserstände in der Tideelbe. *Promet* 31, 186–190.
- Schaumann, P. C.** 1857, *Die Höhe der Hamburger Sturmfluthen, vorausbestimmt nach den betreffenden Cuxhavener Wasserständen*. Hamburg, Wilh. Jowien. 25 S.
- Scherhag, R.** 1948, *Neue Methoden der Wetteranalyse und Wetterprognose*. Springer Verlag, Berlin. 424 S.
- Scherhag, R.** 1962, *Grundlagen der Wettervorhersage*, Kap. 1–3, in: Baur 1962, 1–60.
- Schmidt, H., v. Storch, H.** 1993, German Bight storms analyzed. *Nature* 365, 791.
- Schultze, E.** 1935, Die nichtperiodischen Einflüsse auf die Gezeiten der Elbe bei Hamburg. *Archiv Dt. Seewarte* 53/5, 68 S.
- Schureman, P.** 1924, *A Manual of the harmonic analysis and prediction of tides*. Washington, 416 S.
- Siefert, W.** 1998, Tiden und Sturmfluten in der Elbe und ihren Nebenflüssen. *Die Küste* 60, 1–115.
- Siefert, W., Christiansen, H.** 1983, Entwicklung und Stand der Sturmflutvorhersagen des Hamburger Sturmflutwarndienstes. *Hamburger Küstenforschung* 42, 41–110.
- Smith, S. D., Banke, E. G.** 1975, Variation of sea surface drag coefficient with wind speed. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 101, 665–673.
- Soetje, K. C., Brockmann, C.** 1983, An operational numerical model of the North Sea and the German Bight. In: J. Sündermann/W. Lenz (Ed.) *North Sea Dynamics*. 95–107.
- Spekat, A.** (Hg.) 2000, *50th Anniversary of Numerical Weather Prediction*. Berlin, 255 S.
- Stappeler, J., Doms, G., Schättler, U., Bitzer, H. W., Gassmann, A., Damrath, U., Gregoric, G.** 2003, Meso-Gamma Scale Forecasts Using the Non-hydrostatic Model LM. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82, 75–90.
- Symphor, L. Maschke, R.** 1887, *Karte der deutschen Wasserstraßen unter besonderer Berücksichtigung der Tiefen- und Schleusenverhältnisse*. Maßstab 1:1.250.000, Berliner Lithogr. Inst.
- Tomczak, G.** 1950, Die Sturmfluten vom 9. und 10. Februar 1949 an der deutschen Nordseeküste. *Dtsch. Hydrogr. Z.* 3, 227–224.
- Tomczak, G.** 1960, Über die Genauigkeit der Sturmflutvorhersage für die deutsche Nordseeküste. *Dt. Hydrogr. Z.* 13, 1–13.
- Wagner, F.** 1931, Untersuchungen über den Geländeeinfluß auf die Windbeobachtungen im Bereich der Deutschen Bucht und des norddeutschen Flachlandes. *Aus dem Archiv der Deutschen Seewarte* 49/7. 35 S.
- Wege, K.** 2002, Die Entwicklung der meteorologischen Dienste in Deutschland. *Geschichte der Meteorologie in Deutschland* 5. Deutscher Wetterdienst, Offenbach. 366 S.
- Weikinn, C.** 1958, *Quellentexte zur Witterungsgeschichte Europas von der Zeitwende bis zum Jahre 1850*. Hydrographie. *Quellensammlung zur Hydrographie und Meteorologie, Band I*. Berlin, Akademie-Verlag. 531 S.
- Woth, K., Weisse, R., v. Storch, H.** 2005, Dynamical modelling of North Sea storm surge extremes under climate change conditions – an ensemble study. *Ocean Dyn.* 56/1: 3–15.