

HOCHWASSERSTÄNDE AN NORD- UND OSTSEEKÜSTEN

***HIGH WATER-LEVELS AT NORTH SEA
AND BALTIC SEA COASTS***

von
Klaus HUBER

INHALT

1	OSTSEE	17
1.1	Lang- bis mittelfristige Wasserstandsänderungen	17
1.1.1	Säkularer Anstieg des Mittelwasserstandes (MW)	17
1.2	Kurzfristige Wasserstandsänderungen	18
1.3	Zusammenfassung, westliche Ostsee (Bereich der deutschen Küste)	20
2	NORDSEE	22
2.1	Lang- bis mittelfristige Wasserstandsänderungen	22
2.2	Kurzfristige Wasserstandsänderungen	23
2.3	Zusammenfassung, Deutsche Bucht	25

Vorbemerkung

Eine wichtige Aufgabe des Wasserstandsvorhersagedienstes des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ist, täglich zu festgesetzten Zeiten Vorhersagen für den Wasserstand an der deutschen Ost- und Nordseeküste zu erstellen. Für die Ostsee werden um 08 Uhr bzw. um 14 Uhr Vorhersagen der Abweichungen des Wasserstandes von der festgesetzten Höhenmarke „Normalnull“ (NN) für den Nachmittag bzw. den Vormittag des folgenden Tages gegeben.

Für die Nordsee werden täglich viermal (um 02, 08, 14 und 20 Uhr) die zu erwartenden Wasserstände für die Zeiten der kommenden zwei Hoch- bzw. Niedrigwasser (HW bzw. NW) vorhergesagt. Es werden die Abweichungen gegenüber dem mittleren Hochwasser (MHW) bzw. dem mittleren Niedrigwasser (MNW) gegeben. MHW bzw. MNW für das laufende Jahr werden vom BSH vorausberechnet (ein Ergebnis der Gezeitenvorausberechnungen) und sind somit festgelegt.

Es gehört aber auch zu den besonderen Aufgaben des Wasserstandsvorhersagedienstes die Öffentlichkeit im Falle einer bevorstehenden Sturmflut zu warnen sowie die Behörden, die für die Einleitung von Maßnahmen zur Abwendung von Schaden an Gütern und Menschen zuständig sind, über die Höhe des zu erwartenden Wasserstandes zu informieren. Es ist nicht Aufgabe des BSH, solche Maßnahmen einzuleiten, prophylaktische und operationelle Hochwasserabwehr fällt in die Kompetenz der Länder.

Mein Beitrag zu diesem Workshop wird sich deshalb nicht mit dem Risikomanagement im Küstenraum befassen. Er konzentriert sich auf die Hochwasserstände und soll – so ist es mit dem Veranstalter abgesprochen – einen Überblick über die wesentlichen ozeanographischen Prozesse geben, die die Höhe des Wasserstandes in Nord- und Ostsee bestimmen. Anhand von Beispielen und aufgrund der Erfahrungen des Wasserstandsvorhersagedienstes werden die Anteile abgeschätzt, die die einzelnen Prozesse zur Höhe bzw. zur Variabilität des Wasserstandes beitragen.

Zur Systematisierung der Beschreibung, aber auch aus inhaltlichen Gründen werden die Wasserstandsänderungen in zwei Gruppen unterteilt, in kurzfristige und in mittel- bis langfristige. Die kurzfristigen Wasserstandsänderungen betreffen den Zeitbereich von Stunden, Tagen bis maximal Monaten. Die Ursache dafür ist in erster Linie das tägliche Wettergeschehen und in der Nordsee die Gezeiten. Die mittel- bis langfristigen Wasserstandsänderungen betreffen den Zeitbereich von Jahrzehnten bis hin zu Jahrhunderten und mehr. Die Ursachen dafür sind periodische Änderungen im meteorologischen und ozeanographischen Umfeld, die Eingriffe des Menschen in die Natur, aber auch die langfristigen Klimaänderungen seit der letzten Eiszeit.

1 Ostsee

Die Ostsee kann im Hinblick auf ihr Wasserstandsverhalten kurz wie folgt charakterisiert werden. Sie ist ein abgeschlossenes Becken, das zu Eigenschwingungen neigt. Sie

hat über die Belte und den Sund einen „gebremsten“ Wasseraustausch mit der Nordsee, was Konsequenzen für das Wasserstandsverhalten vor und hinter der Übergangszone hat. Der mittlere Wasserstand in der Ostsee insgesamt wird (abgesehen von einer säkularen Variation) durch den Süßwasserzufluss und den Wasseraustausch über die Übergangszone bestimmt und zeigt eine saisonale Variation. Der an der Wasseroberfläche angreifende Wind bewirkt einen Wassermassentransport, der an der Küste auf der Lee-Seite ein Ansteigen (pos. Windstau) und auf der Luv-Seite ein Absenken (neg. Windstau) des Wasserstandes zur Folge hat. Gezeiten spielen im Vergleich zu den Eigenschwingungen praktisch keine Rolle.

Das Verhalten der Hochwasserstände in der westlichen Ostsee (hiermit wird der Bereich bezeichnet, in dem der gesamte deutsche Küstenbereich enthalten ist) wird beispielhaft an Messungen bei Wismar und Warnemünde erläutert.

1.1 Lang- bis mittelfristige Wasserstandsänderungen

1.1.1 Säkularer Anstieg des Mittelwasserstandes (MW)

In der Ostsee existieren eine Reihe von Wasserstandsreihen über hundert und mehr Jahre. Es ist mit viel Aufwand gelungen, die einzelnen Zeitabschnitte einer individuellen Reihe, aber auch die Zeitreihen untereinander auf ein gemeinsames Höhenniveau zu beziehen. Eine Darstellung des monatlichen Mittelwasserstandes für 17 Pegelorte rund um die Ostsee ist in Abb. 1 gezeigt. Danach sinkt der mittlere Wasserstand im Norden scheinbar (mit etwa 80 cm/Jahrhundert) und steigt geringfügig im Süden. Die Ursache dafür ist das Wechselspiel zwischen der Kippbewegung der Erdkrusten um eine Achse, die etwa auf einer Linie von Klagshamn über Swinemünde läuft, und dem Anstieg des Meeresspiegels seit der letzten Eiszeit. Seit dieser Zeit hebt sich der vom Eis entlastete skandinavische Schild, was mit einer scheinbaren Abnahme des MW verbunden ist, und gleichzeitig füllt das geschmolzene Gletscherwasser die ozeanischen Becken. Im Bereich der deutschen Küste, wo nur geringe Krustenabsenkung stattfindet, beobachtet man ein Ansteigen des MW. Deutlich wird dies in Abb. 2, in der die Zeitreihe des jährlichen Mittelwasserstandes - bezogen auf Normalnull (NN) - bei Warnemünde und Wismar dargestellt ist. Der heute beobachtete mittlere Wasserstand, der jedem aus Anschauung und Erfahrung geläufig ist, liegt nur wenige cm über der Normal-Null-Marke (NN). Aus den Zeitreihen lässt sich bei Warnemünde ein linearer Anstieg um etwa 13 cm und bei Wismar ein Anstieg um etwa 11 cm in 100 Jahren ablesen, d.h. der „mittlere Wasserstand“ in dieser Region lag um 1850 etwa 20 cm tiefer als heute.

Der Verlauf des jährlichen MW spiegelt nicht nur den säkularen Meeresspiegelanstieg wider, in ihm sind auch periodische und nicht-periodische Anteile enthalten, die auf Änderungen des Wettergeschehens und des ozeanographischen Umfeldes zurückzuführen sind (möglicherweise eine 11-jährige Periode, die mit dem Sonnenfleckenzyklus

verbunden ist). Er enthält aber auch die Auswirkungen von Eingriffen des Menschen in der Umgebung des Pegelortes. Aus den Darstellungen wird auch deutlich, dass die Variation des MW von Jahr zu Jahr sehr erheblich ist. Sie kann

in der gleichen Größenordnung wie der Anstieg innerhalb von 50 Jahren liegen. Dies hat ggf. Konsequenzen für die Bearbeitung von Extremwertereignissen (hierauf wird später noch kurz eingegangen).

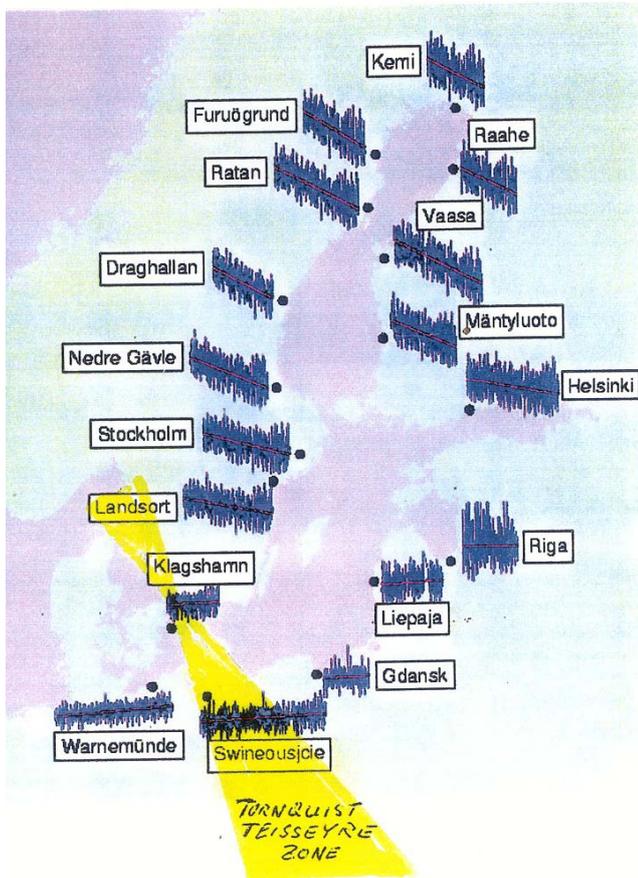


Abb. 1: Wasserstandszeitreihen des monatlichen Mittelwasserstandes (MW) an 17 Pegelstationen in der Ostsee (aus: Internetseite TU Dresden, Inst. für Planetarische Geodäsie)

1.2 Kurzfristige Wasserstandsänderungen

Wind / Windstau

Bestimmend für extreme Hochwasserstände an der deutschen Ostseeküste ist der Wind. Was den Einfluss des Windes betrifft, so ist zwischen dem Wind über der zentralen Ostsee und dem lokalen Wind zu unterscheiden. Windstärke und -richtung über der zentralen Ostsee hängen entscheidend von der Zugbahn eines Tiefs ab. Ein Beispiel für eine typische Zugbahn eines Tiefs über Skandinavien, dessen Kern relativ weit von der deutschen Ostseeküste entfernt ist, ist in Abb. 3 gegeben. Es zeigt die Lage des Zentrums eines Tiefs im Abstand von einem Tag. Zu Beginn herrscht über der zentralen Ostsee (auf der Vorderseite des Tiefs) ein Wind aus westlicher bis südwestlicher Richtung, woraus ein Absinken des Wasserstandes im

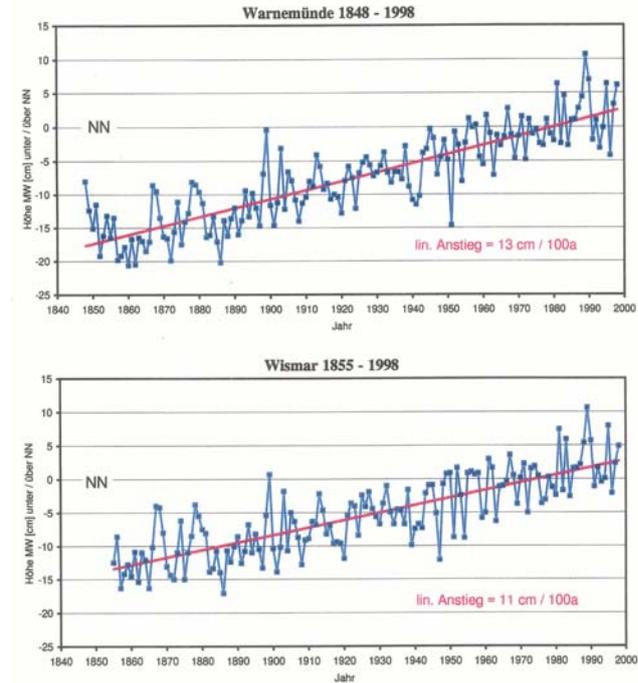


Abb. 2: Zeitreihe des jährlichen Mittelwasserstandes (MW, Kalenderjahr), bezogen auf Normalnull (NN = HN - 14 cm)

Süden und ein Anstieg (Windstau) im Norden resultiert. Etwa 24 Stunden später wechselt der Wind seine Richtung (Rückseite des Tiefs) mit einer umgekehrten Wirkung auf den Wasserstand. Bei dieser Zugbahn ist der Wind bzw. die Windentwicklung über der zentralen Ostsee verantwortlich für die Wasserstandsentwicklung in der westlichen und südlichen Ostsee. Sager und Miehleke haben durch statistische Auswertung von Messungen (veröffentlicht in den Analen der Hydrographie, Stralsund, 1956) eine Beziehung zwischen Windstärke, Windrichtung und resultierendem Stau bzw. Absenkung abgeleitet. Danach ergäbe sich bei Wind von 25 m/s (9 - 10 Bft.) aus Norden ein Stau von etwa drei Meter an der deutschen Ostseeküste. Mit dem hier beschriebenen Mechanismus kann die Stauentwicklung in der westlichen und südlichen Ostsee im Zeitbereich von Tagen erklärt werden.

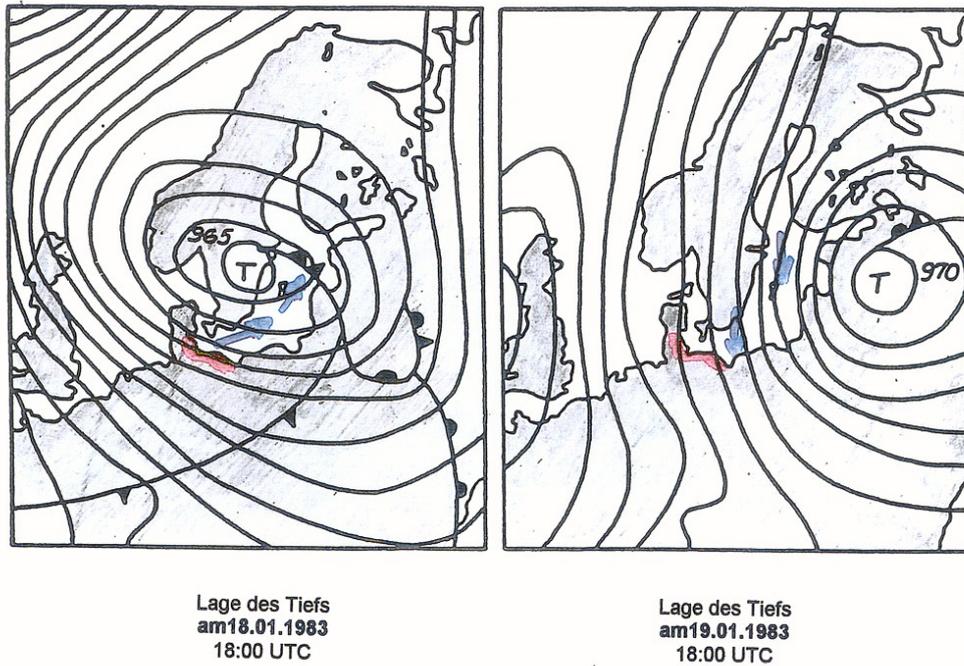


Abb. 3: Beispiel für eine typische Zugbahn eines Tiefs über Skandinavien

Der lokale Wind über der westlichen Ostsee ist für kurzfristige Erhöhungen des Wasserstandes bis zu 1,20 m innerhalb weniger Stunden verantwortlich, wie unzählige Beispiele aus der täglichen Arbeit des Wasserstandsvorhersagedienstes zeigen. Eine solche Situation ist dann gegeben, wenn ein kleinräumiges, kräftiges Tief über Dänemark/Südschweden liegt. In diesem Fall verursacht der kräftige Wind über der westlichen Ostsee dort eine Wasserstandserhöhung, der relativ schwache Wind über der zentralen Ostsee bewirkt keine Windstauwirkungen an der deutschen Ostseeküste.

Eigenschwingungen

Einen erheblichen Einfluss auf den Wasserstand haben die Eigenschwingungen (Seiches) einzelner Becken der Ostsee. Sie werden durch Luftdruckänderungen erzeugt, besonders dann, wenn die Periode der Druckschwankungen mit der Eigenperiode eines schwingungsfähigen Beckens übereinstimmt. Die häufigste Ursache für Eigenschwingungen ist jedoch ein durchziehendes Tief mit einem plötzlichen Nachlassen des Windes. Wie oben beschrieben wurde, erzeugt der Wind eine Schräglage der Wasseroberfläche, die, wenn der Wind zum richtigen Moment aussetzt, zu einer Schaukelbewegung der Wasseroberfläche führt. Auf diese Weise wird relativ häufig das System „westliche Ostsee - Finnischer Meerbusen“ (Eigenperiode etwa 27 Std.) und seltener das System „westliche Ostsee - Bottnischer Meerbusen“ (Eigenperiode etwa 39 Std.) angeregt. Die Abb. 4 zeigt als Lehrbuchbeispiel das Schwingungsverhalten bei einer einknotigen Eigenschwingung des Systems „westliche Ostsee - Finnischer Meerbusen“. Danach ist ein Hub von 100 cm im Finnischen Meerbusen mit einem Hub von 60 cm in der westlichen Ostsee verbunden. In Abb. 5 sind drei Wasserstandskurven aus verschiedenen Zeiträumen, die Eigenschwingungen zugeschrieben wer-

den, übereinander gezeichnet. Daraus lässt sich für die westliche Ostsee ein Hub von 100 bis 120 cm ablesen.

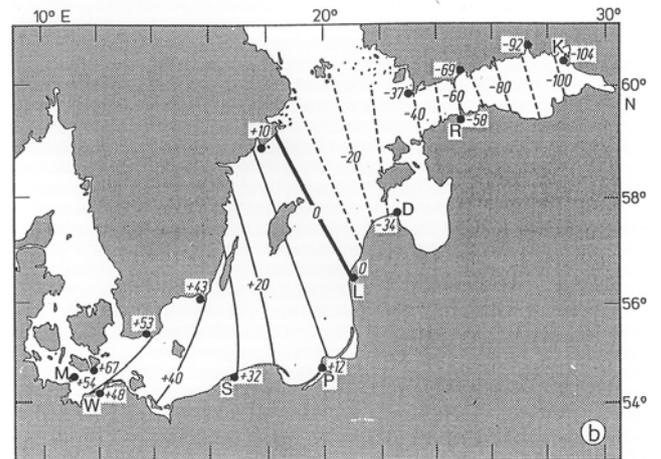


Abb. 4: Schwingungsverhalten bei einer einknotigen Eigenschwingung des Systems „westliche Ostsee – Finnischer Meerbusen“

Füllungsgrad der Ostsee

Bei der Abschätzung möglicher Hochwasserstände muss auch die aktuelle Erhöhung des mittleren Wasserstandes in der gesamten Ostsee (der Füllungsgrad) berücksichtigt werden. Bei einem langsam über Skandinavien ziehenden Tief herrscht, wie oben erläutert wurde, über dem Kattegat ein Nordwestwind und über der südlichen und zentralen Ostsee ein Südwestwind. Durch das im Kattegat angestaute und in der westlichen Ostsee absinkende Wasser entsteht ein Gefälle, das für einen Einstrom über Belte und Sund sorgt. Hält diese Wetterlage über Wochen (gelegentlich Monate) an, so hat dies eine langsame Erhöhung des

mittleren Wasserstandes in der gesamten Ostsee zur Folge, die bei einem Wechsel der Windrichtung nicht schnell genug abgebaut werden kann. Diese Erhöhung kann nach den Erfahrungen des Wasserstandsvorhersagedienstes des BSH bis zu 50 cm betragen.

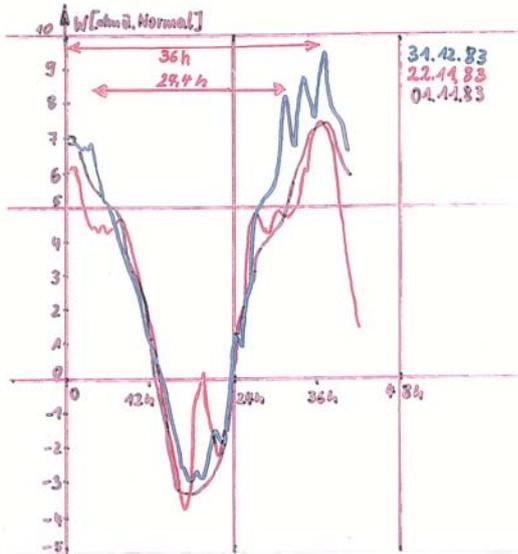


Abb. 5: Wasserstandskurven

In diesem Zusammenhang muss eine weitere Eigenschaft der Ostsee, die jedoch für Risikobetrachtungen an der deutschen Ostseeküste keine Bedeutung hat, der Vollständigkeit halber erwähnt werden. In der Ostsee ist im Mittel ein permanentes Gefälle des Meeresspiegel von Norden nach Süden vorhanden. In St. Petersburg liegt der Meeresspiegel etwa 15 cm höher als in der westlichen Ostsee. Die Ursachen dafür sind ein mittlerer Windstau infolge der vorherrschenden Winde aus westlicher bis südwestlicher Richtung, der Dichteunterschied zwischen dem Nord- und Südtteil der Ostsee und der Zufluss von Süßwasser im nördlichen Teil. Eine Folge dieses Gefälles ist der im Langzeitmittel beobachtete Ausstrom von Ostseewasser durch die Belte.

Gezeiten

Gezeiten spielen in der Ostsee praktisch keine Rolle. Es werden zwar Mitschwingungsgezeiten angeregt, die sich als 1/2-tägige und 1-tägige Gezeiten auswirken. Wegen der schwachen Anregung im Kattegat (der Gezeitenhub ist dort kleiner als 30 cm) und der engen Durchlässe ist die Gezeitenamplitude jedoch klein. An der deutschen Küste in der westlichen Ostsee beträgt der Hub der 1/2-tägigen Gezeit maximal 20 cm und sinkt auf etwa 6 cm im Finnischen Meerbusen und auf etwa 1 cm im Bottnischen Meerbusen ab.

1.3 Zusammenfassung, westliche Ostsee (Bereich der deutschen Küste)

Gegenstand dieses Workshop sind die Hochwasserstände, d.h. Wasserstände, die ein vorgegebenes Limit überschreiten. In der Regel sind Stürme über der See die Ursache für extreme Hochwasserstände, deshalb werden sie auch Sturmfluten genannt. In der Ostsee unterscheidet man in Abhängigkeit von der erreichten Wasserstandshöhe drei Typen von Sturmfluten:

- (normale) Sturmfluten ab 1 m bis 1 1/2 m über MW
- Schwere Sturmfluten ab 2 m über MW
- Sehr schwere Sturmfluten ab 2 m bis 2 1/2 m über MW.

Die nachfolgende Tabelle fasst noch einmal die Auswirkungen der oben beschriebenen ozeanographischen Prozesse auf den Wasserstand in der westlichen Ostsee zusammen.

Aus der Tabelle wird deutlich, dass sich große Wasserstandserhöhungen meist lange vorher ankündigen, man aber auch mit relativ kurzfristigen Erhöhungen rechnen muss. Schwere und insbesondere sehr schwere Sturmfluten entstehen meist durch das Zusammenspiel mehrerer Prozesse. Auf keinen Fall ist es erlaubt, extreme Wasserstände durch Summation der Anteile der einzelnen Prozesse abzuschätzen.

kurzfristige Änderungen	Wind über der zentralen Ostsee	Wasserstandserhöhung um bis zu 3,0 m innerhalb Tagen
	lokaler Wind	Wasserstandserhöhung um bis zu 1,0 m innerhalb Stunden
	Seiches	Wasserstandsänderungen bis zu 1,2 m innerhalb 12 bis 18 Stunden
	Füllungsgrad einschl. saisonale Schwankung	Mittelwassererhöhung um bis zu 0,5 m
	Gezeiten	Wasserstandsänderungen um max. 20 cm innerhalb 6 Stunden

Tab. 1: Abschätzung der relativen Beiträge einzelner Prozesse zum Wasserstand in der westlichen Ostsee

Im Rahmen dieses Workshop ist die Antwort auf zwei Fragen von Interesse:

- 1) „Mit welchen Hochwasserständen ist in der westlichen Ostsee zu rechnen?“ und
- 2) „Wie häufig werden vorgegebene Hochwasserstände überschritten?“

Zu 1)

Für die Beantwortung dieser Frage stehen zwei Methoden zur Verfügung:

- Man berechnet mit einem numerischen Modell die Wasserstände an der Küste, wobei das Modell unter extremen meteorologischen Bedingungen angetrieben wird. Dieses Modell muss die geographischen Gegebenheiten ausreichend gut, und die wichtigsten physikalischen Prozesse adäquat berücksichtigen. Solch ein Modell existiert beim BSH. Dieser Weg soll aber hier nicht diskutiert werden.
- Man analysiert gemessene Hochwasserwerte mit Methoden der Extremwertstatistik.

Zu 2)

Die Beantwortung dieser Frage ist m.E. nur durch Bearbeitung gemessener Hochwasserwerte mit statistischen Methoden (z.B. die Extremwertstatistik) möglich.

Eine entscheidende Voraussetzung für die Beantwortung der beiden Fragen ist die Verfügbarkeit möglichst vieler und ausreichend langer Pegelreihen. Aus der westlichen Ostsee existieren nach meiner Kenntnis vier Pegelreihen (Wismar, Warnemünde, Travemünde und Swinemünde) über 100 und mehr Jahre, die aber nicht immer vollständig und zuverlässig sind. Als ein Beispiel ist in Abb. 6 die Folge der Sturmflutscheitelhöhen für die beiden Pegelorte Warnemünde und Wismar dargestellt. In der Darstellung sind die Scheitelhöhen (sie lagen ursprünglich als Höhen über NN vor) auf Höhen über dem Jahresmittel des Mittelwasserstandes (MW) für das Kalenderjahr, in dem das Ereignis eingetreten ist, umgerechnet worden.

Diese Umrechnung ist als Vorbereitung für die Anwendung der Extremwertstatistik vorgenommen worden. Für diese Behandlung ist es notwendig, den Datensatz der Extremwerte zu homogenisieren, d.h. aus dem Datensatz müssen alle periodischen und systematischen Anteile (die mittel- und langfristigen Anteile) entfernt werden. Zu den systematischen Anteilen gehört der säkulare Anstieg, aber auch alle anderen systematischen Änderungen, wie z.B. Änderungen des Wettergeschehens und die Auswirkungen der Eingriffe des Menschen, zumindest die Auswirkungen, die den mittleren Wasserstand beeinflussen. Der für die Extremwertstatistik vorbereitete Datensatz darf nur noch zufällige und voneinander unabhängige Werte enthalten. Es ist also sehr wohl zu überlegen, ob man bei der Homogenisierung einen linearen Anstieg oder die individuellen

Jahresmittel (bzw. ein anderes Mittel) zugrunde legt. Wir haben uns für die individuellen Jahresmittel entschieden.

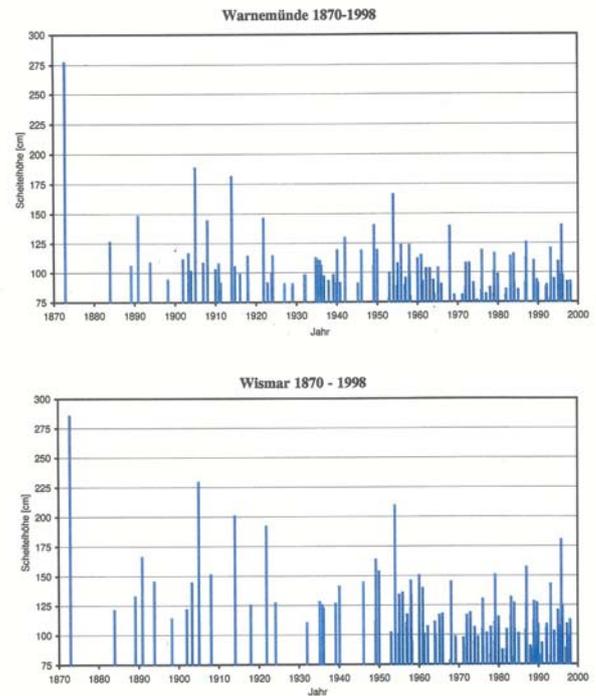


Abb. 6: Sturmflutscheitelhöhen für die Pegelorte Warnemünde und Wismar

Aus den beiden Abbildungen wird deutlich, dass Sturmfluten im Bereich Wismar in der Regel höher auflaufen. Der Wasserstand im Küstenabschnitt bei Wismar (hierzu gehört auch der bei Kiel) reagiert sehr empfindlich auf den lokalen Wind. Auffallend ist auch, dass - z.B. bei der Meßreihe von Wismar - am Anfang Ereignisse mit Scheitelhöhen bis 1,25 m seltener auftreten als am Ende des letzten Jahrhunderts. Dies muss nicht der Realität entsprechen. Anfänglich existierten nur Lattenpegel, die nur einmal am Tag abgelesen wurden. Gelegentliche Überschreitungen der Ein-Metermarke wurden möglicherweise nicht für erwähnenswert gehalten.

Anhand der Darstellung kann die erste der oben formulierten Frage: „Mit welchen Hochwasserständen ist in der westlichen Ostsee zu rechnen?“ wie folgt beantwortet werden: Die höchste, jemals gemessene Sturmflut – und mit einem solchen Ereignis muß nach menschlichem Ermessen auch wieder gerechnet werden - ereignete sich im Jahr 1872, mit einer Scheitelhöhe von mehr als 275 cm über dem MW des Jahres 1872.

Die zweite Frage: „Wie häufig werden vorgegebene Hochwasserstände überschritten?“ kann aus der Darstellung nicht oder nur vage beantwortet werden. Hierfür ist eine sorgfältige Analyse mit Hilfe der Extremwertstatistik notwendig.

2 Nordsee

Die Nordsee kann im Hinblick auf das Wasserstandsverhalten kurz wie folgt charakterisiert werden. Sie ist ein Randmeer, das durch den offenen Rand im Norden und über den Kanal an den Atlantik gekoppelt ist. Über diesen offenen Rand wird in der Nordsee eine Mitschwingungszeit angeregt. Ein aufländiger Wind erzeugt an der Küste einen pos. Windstau ohne Wasserstandsabnahme im Zentrum der Nordsee, da genügend Wasser nachfließen kann. Ein abländiger Wind erzeugt an der Küste einen neg. Windstau. Süßwasserzuflüsse und Eigenschwingungen spielen für den Wasserstand nur eine untergeordnete Rolle. Da der Windstau und der Gezeitenhub in der gleichen Größenordnung liegen, ist es im Hinblick auf Hochwasserstände ganz entscheidend, in welche Gezeitenphase der Windstau fällt.

Im Gegensatz zur Ostsee ist die deutsche Nordseeküste durch umfangreiche Bauwerke (Deiche, Sperrwerke, Landinselverbindungen) zum Schutz vor Gefahren durch die Hochwasser geprägt. Einige Inseln (z.B. Pellworm) und weite Landstriche an der Küste liegen unterhalb des mittleren Hochwassers. Die Küstenlinie zeigt viele trichterförmige Ästuar, die tief landeinwärts reichen. In diesen Ästuaren wird sowohl die einlaufende Gezeitenwelle als auch die Flutwelle erheblich deformiert.

Das Verhalten der Hochwasserstände in der Nordsee wird beispielhaft durch Messungen am Küstenort Cuxhaven und an Hamburg, als ein Beispiel für eine am Ende eines Ästuars liegende Hafenstadt, erläutert.

2.1 Lang- bis mittelfristige Wasserstandsänderungen

Säkularer Anstieg des mittleren Hochwassers (MHW)

In der Nordsee übernimmt das mittlere Hochwasser (MHW) die Rolle des Mittelwasserstandes (MW) in der Ostsee. In der Vorhersagepraxis werden Angaben zum Wasserstand immer als Abweichungen zu dem mittleren Hochwasser gegeben, da für die an der Küste lebenden Menschen die Höhenlage des MHW anschaulich erfassbar ist.

In der Nordsee und in den anschließenden Revieren existieren eine Reihe von Pegelaufzeichnungen über hundert und mehr Jahre (darunter für Emden, Wilhelmshaven, Bremerhaven, Cuxhaven, Büsum, Husum, Dagebüll und Hamburg). Sie sind im Rahmen verschiedener KFKI-Projekte (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen) in sich und untereinander auf ein einheitliches Niveau bezogen worden. Es sind erhebliche Anstrengungen unternommen worden, einen geprüften und konsistenten Datensatz aller verfügbaren Pegelreihen zu erstellen. Einzelheiten darüber sind z.B. von J. Jensen im Detail beschrieben worden.

In Abb. 7 sind die Zeitreihen der mittleren Hochwasser bezogen auf Normalnull bei Cuxhaven und Hamburg seit 1843 gezeigt. Das MHW ist als arithmetisches Mittel aus den täglichen HW-Werten für den Zeitraum Juli des Jahres bis Juni des folgenden Jahres berechnet worden. Diese

Zeitspanne ist gewählt worden, um ein mittleres HW für eine Sturmflutsaison zu erhalten.

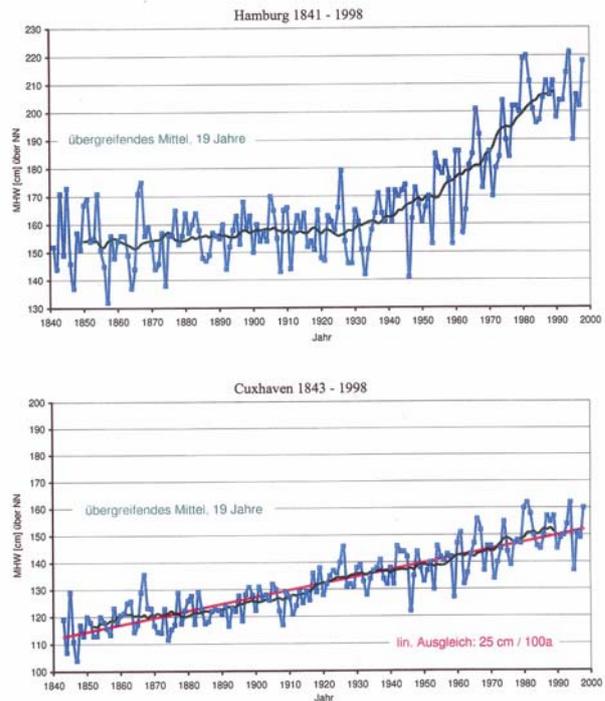


Abb. 7: Zeitreihen der mittleren Hochwasser bei Cuxhaven und Hamburg

In die Zeitreihe für Cuxhaven (Abb.7, unten) ist in rot die Gerade für einen linearen Ausgleich und in grün das übergreifende Mittel über 19 Jahre eingetragen. Der lineare Ausgleich ergibt einen Anstieg des MHW von etwa 25 cm/100a. Der Verlauf des übergreifenden Mittels legt nahe, dass man – wie von mehreren Autoren nachgewiesen – sehr wohl Zeitbereiche auswählen kann, in denen der Anstieg größer oder kleiner als der angegebene Wert ist. Beachtenswert ist die große Variabilität des MHW, d.h. die Änderungen des MHW von Jahr zu Jahr liegen in der gleichen Größenordnung wie der mittlere Anstieg in etwa 50 Jahren. Die Kurve von Cuxhaven repräsentiert im Mittel die Situation in der Deutschen Bucht. Für den linearen Anstieg werden in der Literatur Werte zwischen 17 bis 29 cm/100a angegeben. Der Verlauf des MHW spiegelt nicht nur den Meeresspiegelanstieg bzw. die Landsenkung in der Deutschen Bucht wider, in ihm sind auch periodische Anteile enthalten, die möglicherweise auf die 19-jährige Gezeitenperiode (mit einem Hub von etwa 6 cm) zurückzuführen sind. Er enthält auch Änderungen des Sturmflutgeschehens und des ozeanographischen Umfeldes und vor allem die Auswirkungen von Eingriffen des Menschen in der Umgebung des Pegelortes.

Ein grundsätzlich unterschiedliches Verhalten zeigen die MHW bei Hamburg (Abb.7, oben). Es macht keinen Sinn einen linearen Trend zu bestimmen, deshalb sind hier nur die übergreifenden Mittel über 19 Jahre eingezeichnet. Ganz offensichtlich blieben die MHW von 1840 bis 1930 etwa gleich hoch, sie stiegen dann bis 1985 rapide von einem Wert um 1,60 m bis etwa 2,05 m. Seit 1985 sind sie mehr oder weniger unverändert auf diesem Niveau stehen

geblieben. In dem letzten Teil des Kurvenverlaufes spiegeln sich eindeutig die Ausbaumaßnahmen in der Elbe wider.

2.2 Kurzfristige Wasserstandsänderungen

Gezeiten

Die extremen Hochwasserstände in der Nordsee werden primär von den Gezeiten zusammen mit einem Windstau bestimmt. Über die offenen Ränder werden in der Nordsee Mitschwingungsgezeiten angeregt. Die dominierende Peri-

ode ist die der halbtägigen M2-Gezeit. In einem einfachen, nicht ganz präzisen Bild läßt sich der Lauf der Gezeitenwelle wie folgt beschreiben: Die Gezeitenwelle dreht gegen den Uhrzeiger entlang der englischen Küste über die Deutsche Bucht und verschwindet durch Interferenz vor dem Skagerak und der südnorwegischen Küste. In der Nordsee existieren drei Amphidromien, an denen der Gezeitenhub verschwindet. Je weiter ein Küstenort von einer Amphidromie entfernt ist, desto größer ist der Gezeitenhub, wie in Abb. 8a gezeigt ist. An der deutschen Nordseeküste variiert der Gezeitenhub zwischen 1,8 m (List) und 3,5 m (Cuxhaven).

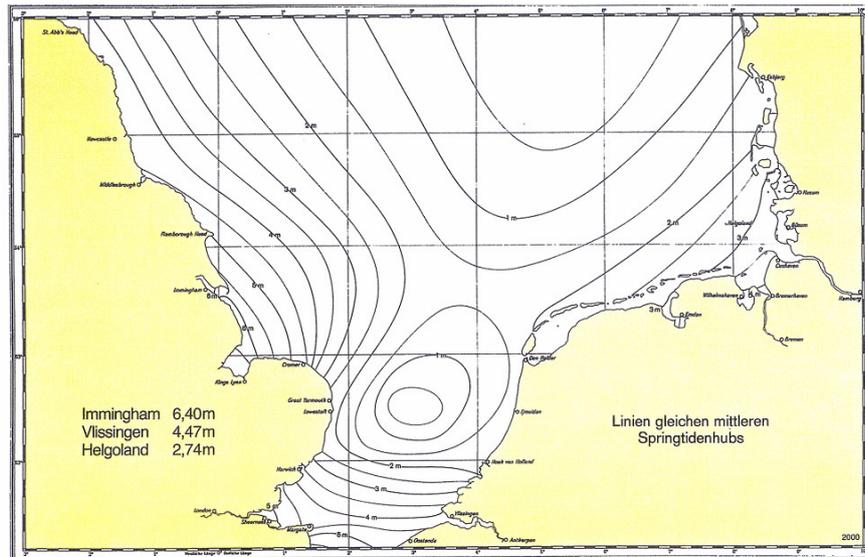


Abb. 8a: Verlauf der Gezeitenvorausberechnung für Cuxhaven

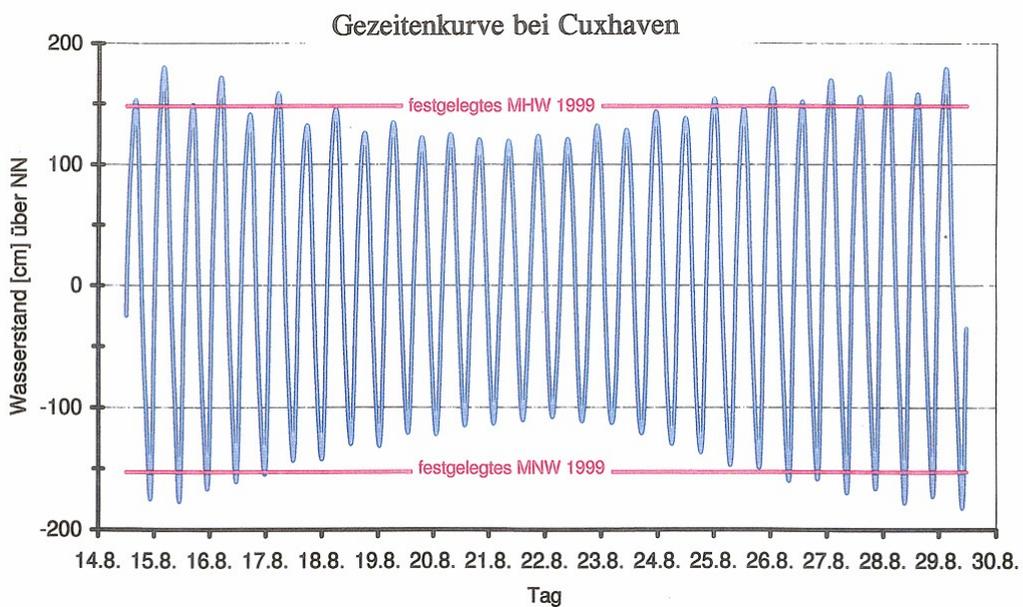


Abb. 8b: Gezeitenkurve bei Cuxhaven

Läuft eine Gezeitenwelle in den Trichter eines Ästuars, wie z.B. die Elbe, so wird sie dort erheblich deformiert, was sich in einer Erhöhung des MHW, Erniedrigung des MNW und damit in einer Vergrößerung des Hubs auswirkt. So

wird in Hamburg gegenwärtig ein mittlerer Springtidenhub von 3,8 m erreicht. In Abb. 8a ist zur Veranschaulichung der Verlauf der Gezeitenvorausberechnung für Cuxhaven dargestellt. Man erkennt daraus die unterschiedliche Höhe

der Hochwasser (HW) zu Spring- und Nippzeit. Der Unterschied beträgt knapp 50 cm. Die Höhe des mittleren Hochwassers (MHW) über Normalnull beträgt (wie bereits in Abb. 7 unten gezeigt) z.Z. etwa 1,5 m.

Wind / Windstau

Wie bereits vermerkt, bestimmt der Windstau insbesondere dann, wenn er auf ein Gezeitenhochwasser fällt, entscheidend die Höhe des Scheitelwasserstandes bei einer Sturmflut. Der Windstau ist aus pragmatischen Gründen als Erhöhung oder Erniedrigung gegenüber der vorausgerechneten Gezeit festgelegt worden. Er hängt ganz entscheidend von der Windrichtung bzw. der Windgeschwindigkeit in dem Seegebiet vor der Küste, aber auch von der Dauer der Windeinwirkung und dem aktuellen Wasserstand ab. Für einen Küstenort wie z.B. Cuxhaven findet man eine Windrichtung mit maximaler Stauwirkung. Die Abhängigkeit des Windstaus bei Cuxhaven von der Richtung und Geschwindigkeit des Windes in der Deutschen Bucht ist im BSH mehrfach untersucht worden, zuletzt 1998 an einem Datensatz von 1988 bis 1993. In Abb. 9 ist der Windstau in Cuxhaven für die Windrichtung maximalen Staus dargestellt. Deutlich wird hieraus die Abhängigkeit von der aktuellen Wassertiefe, die bei einer NW-Situation etwa 3 m geringer ist als bei einer HW-Situation. Aus den Kurven lässt sich für die bislang beobachteten Windgeschwindigkeiten in der Deutschen Bucht ein maximaler Windstau von 3,5 m bis max. knapp 5 m ablesen.

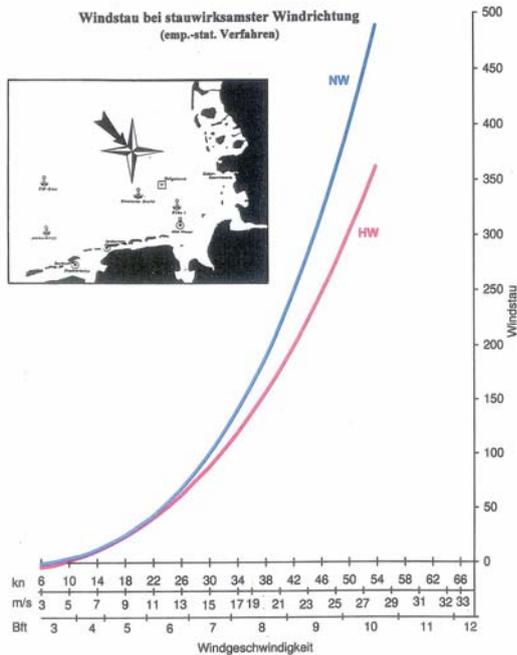


Abb. 9: Windstau in Cuxhaven für die Windrichtung maximalen Staus

Was die Dauer der Windeinwirkung betrifft, so ist aber unmittelbar einleuchtend, dass bei einem lang anhaltenden NW-Wind die in die Deutsche Bucht strömenden Wassermassen zu einer weiteren Erhöhung des Wasserstandes führen. In der Regel wird ein langanhaltender NW-Wind von einem ausgedehnten, kalten Tief (gelegentlich

„Windstautyp“ genannt) mit relativ schwachem Druckgradienten erzeugt, das langsam auf einer Zugbahn weit nördlich des offenen Randes der Nordsee verläuft. Es erzeugt in der Deutschen Bucht einen relativ schwachen (bis zu 9 Bft) NW-Wind, der aber über bis zu drei Gezeitenperioden andauern kann.

Ein starker Wind von kurzer Dauer wird durch ein warmes Tief mit starkem Druckgradienten (gelegentlich Zirkulationstyp genannt) verursacht, dessen Bahn über der zentralen Nordsee verläuft. Dieses Tief erzeugt in der Deutschen Bucht westliche Winde bis Stärke 10 und mehr.

Fernwelle

Zu extremen Hochwasserständen können auch Fernwellen beitragen. Fernwellen entstehen als Folge eines nördlich von Schottland nach Osten ziehenden Tiefs vom Typ „Windstau“, das einen Wassermassentransport erzeugt, der in Verbindung mit der Schelfkante ein Aufsteilen der Wasserwelle an der schottischen Küste bewirkt. Dieser Flutberg wandert, wie in Abb. 10 gezeigt, fast ungedämpft längs der englischen Küste nach Süden und entlang der niederländischen Küste in die Deutsche Bucht, wo er nach etwa 12 - 15 Stunden ankommt. Fernwellen können in Cuxhaven Wasserstandserhöhungen von bis zu 80 cm innerhalb von einem halben Tag bewirken.

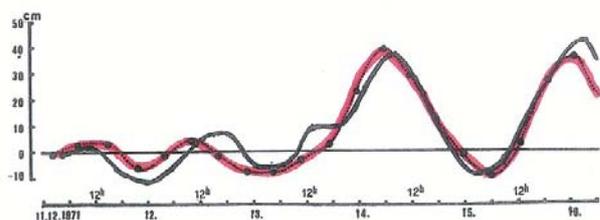


Abb. 10: Fernwelle

Weitere ozeanographische Prozesse, wie z.B. ein Druckgefälle in Nord – Süd Richtung und Eigenschwingungen tragen zur Höhe von Extremwasserständen nur in geringem Maße bei.

Schwere Sturmfluten	2 ½ m bis 3 ½ m über MHW
Sehr schwere Sturmfluten	ab 3 ½ m über MHW

2.3 Zusammenfassung, Deutsche Bucht

In der Nordsee unterscheidet man in Abhängigkeit von der erreichten Wasserstandshöhe drei Typen von Sturmfluten:

(normale) Sturmfluten 1 ½ m bis 2 ½ m
über MHW

Die Tabelle 2 fasst noch einmal die Auswirkungen der oben beschriebenen ozeanographischen Prozesse auf den Wasserstand in der Deutschen Bucht zusammen.

Zeitskala	Prozess	Wirkung auf den Wasserstand in der Deutschen Bucht
lang- und mittelfristige Änderungen	säkularer Anstieg	Anstieg 17 - 29 cm in 100 Jahren (nach J. Jensen)
kurzfristige Änderungen	Gezeiten	Wasserstandsänderungen um bis zu 3,5 m an der Küste und bis zu 4,0 m flußaufwärts innerhalb 6 Stunden
	Zugbahn des Tiefs nördlich der Nordsee	Wasserstandserhöhung um bis zu 5 m innerhalb eines Tages
	Zugbahn des Tiefs über der zentralen Nordsee bzw. der Deutschen Bucht	Wasserstandserhöhung um bis zu 5 m innerhalb Stunden
	Fernwelle	Wasserstandsänderungen bis zu 0,8 m 12 Std. nach Auftreten an engl. Küste

Tab. 2: Abschätzung der relativen Beiträge einzelner Prozesse zum Wasserstand in der südlichen Nordsee / Deutsche Buch

Aus der Tabelle wird deutlich, dass sich bei Tiefs, deren Zugbahn weit nördlich der Nordsee liegt, windbedingte Wasserstandserhöhungen lange vorher ankündigen. Bei Tiefs, die über die zentrale Nordsee ziehen, muss man mit kurzfristigen Wasserstandserhöhungen rechnen. In allen Fällen ist das zeitliche Zusammentreffen des Gezeitenhochwassers mit dem maximalen Windstau entscheidend für das Eintreten eines extremen Hochwassers.

Auch für die Deutsche Bucht müssen für Fragestellungen im Rahmen eines Risikomanagements die beiden zentralen Fragen beantwortet werden:

- 1) „Mit welchen Hochwasserständen ist in der Deutschen Bucht zu rechnen?“ und
- 2) „Wie häufig werden dort vorgegebene Hochwasserstände überschritten?“

Zur Beantwortung der ersten Frage lohnt es sich einen Blick in die Vergangenheit zu werfen und nachzusehen, welche extremen Scheitelhöhen bislang an der Deutschen Küste aufgetreten sind. Dazu wird in Abb. 11 die Folge der bei Cuxhaven und Hamburg seit 1840 eingetretenen Sturmflutscheitelhöhen gezeigt. Für die Darstellung sind die Scheitelwerte (sie lagen ursprünglich als Höhen über Pegel-Null vor) auf Höhen über dem in Abb. 11 gezeigten mittleren Hochwasser (MHW) umgerechnet worden. Sie zeigt also die Sturmflutscheitelhöhe über dem MHW der Sturmflutsaison, zu der die individuelle Sturmflut zugerechnet werden muss. Aus der Darstellung kann entnommen werden, dass man in Cuxhaven mit Sturmflutscheitelhöhen von 3,70 m und in Hamburg mit Scheitelhöhen von gut 4,5 m über dem MHW rechnen muss, wenn man das höchste jeweils eingetretene Ereignis als möglichen Fall für die Zukunft zugrunde legt. Außerdem ist aus den Abbildungen erkennbar, dass die Sturmflutwelle auf dem Weg von Cuxhaven nach Hamburg deutlich erhöht wird. Die Sturmflutscheitelhöhen in Hamburg liegen, zumindest in den

letzten 40 Jahren, fast einen Meter höher als in Cuxhaven. Dass diese Erhöhung eine Folge der Ausbaumaßnahmen in der Elbe ist, wird durch die Abb. 12 nahegelegt. In dieser Abbildung ist die Differenz zwischen der Scheitelhöhe in Hamburg und in Cuxhaven, jeweils bezogen auf das mittlere Hochwasser (MHW), seit 1840 dargestellt. Ganz offensichtlich wird die Sturmflutwelle in der Elbe erst ab den fünfziger Jahren immer um etwa 60 bis 90 cm erhöht.

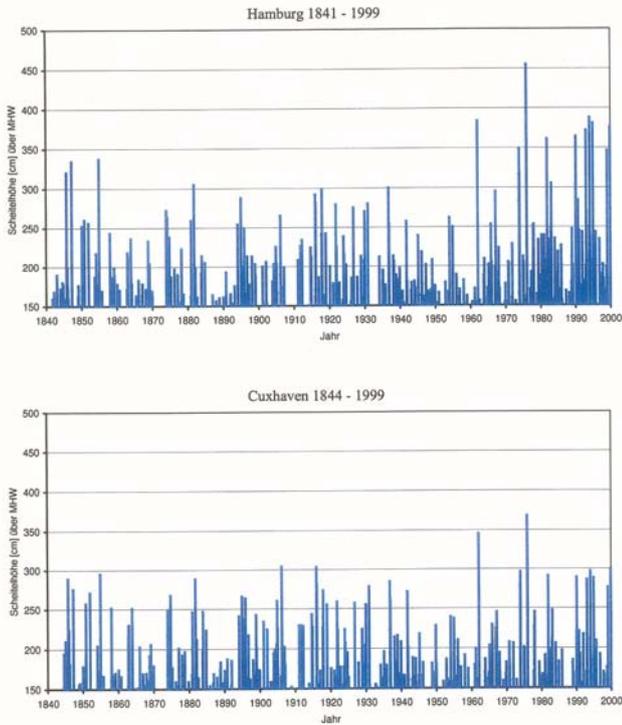


Abb. 11: Folge der eingetretenen Sturmfluten bei Hamburg und Cuxhaven

Die zweite, für Überlegungen zum Risikomanagement zentrale Frage: „Wie häufig werden in der Deutschen Bucht vorgegebene Hochwasserstände überschritten?“ kann aus der Zeitreihe für Cuxhaven in der Abb. 11 nur unzureichend beantwortet werden. Hierfür ist eine detaillierte Untersuchung mit Hilfe der Extremwertstatistik notwendig. Entsprechende Ergebnisse für den Bereich der deutschen Nordseeküste werden in einem späteren Vortrag präsentiert.

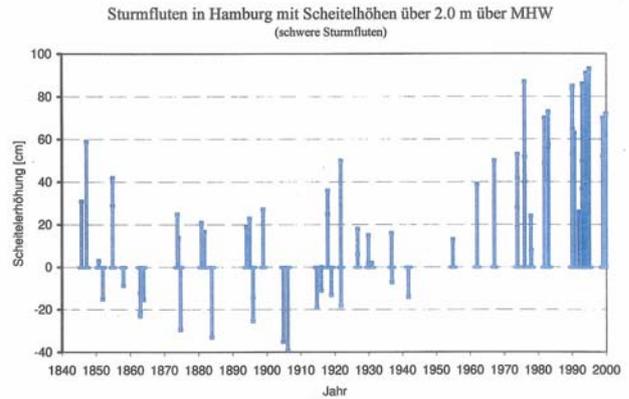


Abb. 12: Differenz der Scheitelhöhe in Hamburg und Cuxhaven, jeweils bezogen auf das mittlere Hochwasser (MHW)