

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Siefert, Winfried; Lassen, Horst

Zur Windstauentwicklung in der südöstlichen Nordsee

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101336>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Siefert, Winfried; Lassen, Horst (1992): Zur Windstauentwicklung in der südöstlichen Nordsee. In: Die Küste 53. Heide, Holstein: Boyens. S. 1-28.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Zur Windstauentwicklung in der südöstlichen Nordsee

Von HORST LASSEN und WINFRIED SIEFERT

Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung beschäftigt sich mit dem Problem der Windstauentwicklung in der südöstlichen Deutschen Bucht während der Sturmfluten vom 24. und 25. November 1981. Die grundlegenden Voraussetzungen für diese Analyse sind die im Seebereich im KFKI-Programm DEBEX 1981 (Deutsche-Bucht-Experimente) aufgezeichneten November-Sturmfluten durch Hochseepiegel und die aus dem KFKI-Programm „Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee – säkularer Trend und Verhältnisse um 1980“ – vorliegenden mittleren Tidewasserstände mit den dazugehörigen mittleren Tidekurven, u. a. auch für die DEBEX-Hochseepiegel. In Verbindung mit den Daten zahlreicher Küstenpegel ist es damit erstmals möglich, großflächige Zusammenhänge zwischen dem Windstau auf See und dem im Küstenbereich aufzuzeigen. Mit diesem Bericht werden die vom BMFT geförderten KFKI-Projekte zur Tideentwicklung in der südöstlichen Nordsee abgeschlossen (s. Die Küste: H. 42, 1985; H. 44, 1986; H. 50, 1989 und H. 52, 1991).

Bei dem Wettergeschehen vom 24. und 25. November 1981 (u. a. Windstärken 8–10 Bft. aus 270° und 300°) zeigen die Windstau-Kennlinien, daß die Windstauverhältnisse (Stau örtlicher Pegel zum Stau am Pegel Helgoland-Binnenhafen)

- im Tiefwasserbereich der südöstlichen Deutschen Bucht nahe um den Faktor 1 liegen, also fast konstant sind. Damit scheint es denkbar, den seewärtigen Windstau näherungsweise durch den Windstau am Pegel Helgoland-Binnenhafen zu charakterisieren;
- im Flachwasserbereich des Küstenvorfeldes durch die Topographie und den Küstenverlauf nachhaltig beeinflußt werden. Die Windstauhöhen zeigen hier eine deutlich differenzierte Zunahme zur Küste hin. So werden z. B. in Büsum und am Eidersperrwerk gegenüber dem Tiefwasserbereich Kennwerte $> 1,6$ erreicht, d. h., der örtliche Windstau ist in diesem Zeitraum um etwa 60 % größer als der Helgoländer Stau;
- ihre maximalen Werte im Tiefwasserbereich und im angrenzenden Küstenvorfeld etwa 2 bis 3 Std. nach Niedrigwasser erreichen. Unmittelbar an der Küste kann dieser Zeitpunkt früher oder später bedingt durch örtliche Einflüsse eintreten. Er liegt aber auf jeden Fall vor Hochwasser;
- den theoretischen Ansatz – Windstauhöhe umgekehrt proportional zur Wassertiefe – bei Wilhelmshaven absolut nicht verifizieren. Die Besonderheit dieser örtlichen Windstau-Kennlinie kann z. Z. nur als regionaler Effekt gedeutet werden.

Summary

The following study is concerned with the wind surge development during the November 24–25, 1981 storm surges in the German Bight. The basic prerequisites for this analysis are the offshore tidal records taken in the context of the KFKI experiment DEBEX 1981 and the mean tidal water levels and their associated tidal curves (also for the above mentioned tidal gauge) determined within the KFKI program "Mean Tidal Levels in the Southeast Region of the North Sea – Secular Trends and Conditions Around 1980". Using additional data gained from numerous tidal gauges, it has, for the first time, been possible to show the interrelationship between the large scale offshore wind surge and that in the near shore area. This is the final report of the BMFT sponsored projects on the tidal movements in the southeast region of the North Sea (see "Die Küste", Vol 42, 1985; Vol 44, 1986; Vol 50, 1989 and Vol 52, 1991).

The wind surge characteristics during the November 24–25 storm surge (wind strength 8–10 Bft. from 270° and 300°) show the following differences at the local tide gauges and the tide gauge Helgoland-Binnenhafen):

- approximately a factor 1 for the deep water reach, i.e. nearly constant. It therefore appears reasonable to characterise the wind surge by that at the Helgoland-Binnenhafen tide gauge;
- a significant influence in the near shore area based on the topography and the coastal conditions. The wind surge heights show significant local increases towards the coast. For example, at Busum and the Eider Dam the factor is 1.6 compared with the offshore regions, i.e. the local wind surge is approximately 60% higher than the Helgoland surge;
- the maximum values in the offshore and near shore coastal regions were reached 2 to 3 hours following low water. This time lag can be modified in both directions at the coast due to local effects. The maximums occur, however, in any case before high water;
- the theoretical result that the wind surge is inversely proportional to the water depth could not be verified. The wind surge time history can at the moment only be attributed to regional effects. Naturally, these thoughts on wind surge development are in part subjective. This study can not claim to be complete, since the available data are not sufficient to determine the precise causal relationships between water surge elevations, wind duration and strength. Only local interpretations are possible. It is, therefore, extremely important for storm surge research that the conclusions related to wind surge be further developed and rounded based on additional measurements and analysis.

I n h a l t

1. Einführung	2
2. Bisherige Messungen und Analysen	4
3. Ermittlung von Windstau-Kennlinien	8
4. Ergebnisse	11
5. Schriftenverzeichnis	28

1. Einführung

In der vorliegenden Abhandlung werden Windstauuntersuchungen auf der Basis der hohen Sturmfluten vom 24. und 25. 11. 1981 in der südöstlichen Deutschen Bucht vorgestellt; mit deren Hilfe werden frühere Aussagen zum Windstau in diesem Bereich erweitert, um ein besseres Bild von dessen Entwicklung vor der Küste zu gewinnen.

In der deutschsprachigen Fachliteratur sind für diesen Meeresbereich und das angrenzende Küstenvorfeld der südöstlichen Nordsee nur wenige Dokumentationen von Daten über die Einwirkung des Windes – besonders bei Herbst- und Winterstürmen – auf die Höhe der mittleren Meeresoberfläche und den daraus resultierenden Windstau zu finden. Gerade die Erfassung dieses bisher als weitgehend gezeitenunabhängig angesehenen unperiodischen Anteils an den Wasserstandsschwankungen mit seinen dominierenden Merkmalen ist eine wichtige Informationsgrundlage für Sturmflutprognosen und die Ermittlung von Bemessungswasserständen für Küstenschutzmaßnahmen. Bis heute wird das Fehlen konkreter Windstaukenntnisse im freien Meer dadurch überwunden, daß bei Windstauanalysen von beobachteten Wasserständen an Küstenpegeln und theoretischen Überlegungen ausgegangen wird. Jüngste Erfahrungen aus den Sturmfluten von 1962 und 1976 mit extremen Wasserständen zeigen aber, daß allgemeines Interesse an der Verfügbarkeit von Windstauwerten für die Nordsee vorliegt, um die Vorhersagemöglichkeit für zu erwartende Sturmfluthöhen in der Küstenregion effizient weiterzuentwickeln.

Der Windstau steht in engem Zusammenhang mit meteorologischen Einflüssen, wobei neben Luftdruckschwankungen, Wasser- und Lufttemperaturänderungen der Wind je nach Richtung und Stärke die bedeutendste Einflußgröße auf die Höhe des örtlichen Wasserstandes ist. Die Topographie des Meeresbodens, lokale Gezeitenwirkungen und Fernwellen können

die Windstauwirkung noch zusätzlich meßbar beeinflussen. Hier wird der Windstau als Summe all dieser Erscheinungen definiert.

Für die Bestimmung des Windstauanteils am Verlauf einer Sturmflut gibt es keine eindeutige Festlegung. Unterschiedliche Vorgehensweisen zur Ableitung des Windstaus aus der Windstaukurve führen zu abweichenden Ergebnissen:

Die sog. Windstaukurve wird gebildet als Differenzkurve

- zwischen der eingetretenen und der für dieselbe Zeit vorausberechneten astronomischen Tide*; sie enthält damit alle Abweichungen von derjenigen Gezeit, die die astronomischen und topographischen Einflüsse einschließt (meist von Ozeanographen und vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie [BSH] verwendet), oder
- zwischen der eingetretenen und der für diese Zeit vorausberechneten mittleren Tide (in Gebieten mit relativ kleinen astronomisch bedingten Ungleichheiten). Diese enthält damit zusätzlich zu den obengenannten auch noch astronomische Anteile, im wesentlichen die halbmonatlichen und täglichen Ungleichheiten (meist von Küsteningenieuren, auch vom Sturmflutwarndienst des Strom- und Hafengebäudeamt Hamburg [HT] verwendet). Die Bezeichnung Windstaukurve ist also in beiden Fällen nicht korrekt. Da der Windstaeinfluß jedoch der dominierende ist, ist sie zu vertreten. Neutral wäre aber die in der Ozeanographie gebräuchliche Bezeichnung „Wasserstandsresiduum“.

Die südöstliche Nordsee ist wegen ihrer geringen Spring- und Nippabweichungen eines der ganz wenigen Gebiete auf der Erde, die zur Verwendung mittlerer Tidekurven geeignet sind. Hier ist dann das HT-Verfahren einfacher anzuwenden, mit dem der Windstau mit ausreichender Aussagefähigkeit reproduziert werden kann. Die so definierten Differenzkurven enthalten sämtliche Abweichungen der natürlichen Tide von einer langjährigen mittleren Tide. Es liegt damit nahe, alle Einflüsse gemeinsam zu berücksichtigen, da nur das Gesamtergebnis sämtlicher Abweichungen vom Gleichgewichtszustand der mittleren Tide interessiert.

Die mittlere Tide als langjähriges Mittel unterliegt im Laufe der Zeit geringfügigen Änderungen. Da diese jedoch verhältnismäßig klein sind, ist es bei der Ermittlung der Windstaukurven nicht entscheidend, über welchen Zeitraum die mittleren Tiden gebildet werden. Mindestens 5 Jahre empfehlen sich allein deshalb, um kurzfristige Einflüsse auszuschalten (siehe dazu SIEFERT und LASSEN, 1985, und LASSEN, 1990).

Wesentlich erweiterte Informationen zum Windstau ergeben sich aus der Interpretation von Windstau-Kennlinien (SIEFERT und LASSEN, 1985). Die Höhe des Windstaus ist theoretisch in erster Näherung bei gleichem Wind umgekehrt proportional zur Wassertiefe zu erwarten, d. h., der Windstau wäre dann über die Tide im freien Meer konstant, während er im Flachwasserbereich vor den Küsten von der Wassertiefe beeinflusst wird. Somit ergeben sich in dieser Zone örtlich stark voneinander abweichende Windstaucharakteristika. Mit Hilfe von Windstau-Kennlinien lassen sich diese speziellen Unterschiede deutlich darstellen. Die Windstau-Kennlinie wird als Funktion relativer, etwa phasengleicher Änderungen an einer Station A zu einem Referenzpegel B berechnet. Die Kennlinie über die Tidedauer wird dann zu

$$K(t) = \frac{W(t), A}{W(t), B}$$

Die bisher veröffentlichten Windstau-Kennlinien im Küstenvorfeld der deutschen Nordseeküste für 12 Pegel zeigen in diesem Flachwasserbereich im Verlauf gewisse Ähnlichkeiten,

* Dabei ist zu bedenken, daß im allgemeinen nicht der *Tideverlauf*, sondern nur die *Scheitelwerte* vorausberechnet werden.

aber auch stärkere Abweichungen (SIEFERT und LASSEN, 1985). Weiter weist der Kennlinienverlauf darauf hin, daß hier $K(t)$ weit mehr als durch die Wassertiefe durch

- die Topographie der Umgebung
 - die örtlichen Strömungsverhältnisse
 - die Stromkenterzeiten
- bestimmt wird.

Die vorhandenen Windstauanalysen für die südöstliche Nordsee beziehen sich – wie bereits angedeutet – fast ausschließlich auf Datenkollektive von Küstenpegeln bzw. auf Modellrechnungen. Diese Informationen reichten aber bisher zur Beschreibung der Windstaustruktur im freien Meer nicht aus. Die wenigen verfügbaren Windstauwerte im Meeresbereich lassen nur eine grobe Charakterisierung der wirklichen Verhältnisse zu. Gerade solche Meßergebnisse werden aber mit hinreichender Genauigkeit benötigt, um für den seewärtigen Bereich die örtlichen Windstauhöhen bei unterschiedlichen Starkwinden darstellen zu können und zu präzisieren.

Das Problem ist die Gezeitenerfassung im Tiefwasserbereich. Die einzige Methode, um hier die Tideverhältnisse nachzuvollziehen, ist z. Z. durch die Gezeitenregistrierung von Hochseepegeln gegeben. Sie bieten die beste Möglichkeit, Gezeitenschwankungen zu erfassen und für die wissenschaftliche Interpretation bereitzustellen. Hochseepegel sind Druckpegel: Am Meeresgrund wird der Gesamtdruck der über dem Druckaufnehmer liegenden Wassersäule plus Luftdruck registriert. Aus fortlaufenden Druckänderungen lassen sich nach Korrektur von Luftdruck, Salzgehalt und Wassertemperatur örtliche Wasserstandsverhältnisse ableiten. Im vorliegenden Fall darf aber nicht außer acht gelassen werden, daß im offenen Seegebiet keine Beziehung zur NN-Höhenebene besteht. Um aber die Vergleichbarkeit von Wasserstandshöhen zwischen verschiedenen Hochsee-Pegelstationen herzustellen, bedarf es einer Referenzfläche. Geht man von der Vorstellung aus, daß der mittlere Meeresspiegel (MSL) oder das mittlere Tidemittelwasser (MTmw) im freien Meer in erster Näherung der physikalisch definierten Bezugsfläche der Nivellementshöhen entsprechen, so hat man die für die Gegenüberstellung von Meereshöhen benötigte Bezugsfläche. Von maßgebender Bedeutung ist es daher, daß Hochseepegel im Meßzeitraum (ca. 3 Monate) auch genügend mittlere Tiden aufzeichnen, um aus diesem Datenkollektiv im Vergleich zu einem Bezugspegel (z. B. Helgoland mit ganzjähriger Tideaufzeichnung) die für die Meßperiode gültige MSL-Höhe abzuleiten. Verkannt werden dürfen auch nicht Schwierigkeiten, die besonders in den Wintermonaten bei Hochsee-Pegelmessungen in der Gezeitenerfassung sowie bei der anschließenden Datenaufbereitung und – bedingt durch die Bereichsgröße – in nicht raum- und zeitdeckenden Meßkampagnen auftreten. Diese Tatsachen, die eine Hochsee-Pegelmessung erschweren, sind wohl Gründe, warum es bis heute nur eine einzige Auswertung solcher Daten, und zwar von TOMCZAK (1953), gibt.

2. Bisherige Messungen und Analysen

Im Rahmen seiner Untersuchungen über die Einwirkung des Windes auf den mittleren Wasserstand an der Westküste Schleswig-Holsteins, zwischen Ems und Elbe und in der Deutschen Bucht für die Wasserstandsvorhersage und den Sturmflutwarndienst des BSH wurden von TOMCZAK (1953) außer den vorhandenen Küstenpegeln auch Hochseepegel im Seegebiet der südöstlichen Nordsee in der Zeit vom 15. 2. bis 15. 3. 1951 eingesetzt. Die Positionen der ausgelegten Hochseestationen und der stationären Pegel sind in Abb. 1 eingetragen. Diese Arbeit enthält somit die erste geschlossene Messung und Auswertung einer

großen Anzahl von Hochseepegeln. Aus dem vorliegenden Beobachtungsmaterial und unter Zugrundelegung eines mittleren Wasserstandes als Höhenbezugsebene für Hochseedaten vergleicht TOMCZAK die Windstaukurven untereinander. Abschließend kommentiert er u. a. die Ergebnisse seiner Windstauauswertungen im Seebereich. Die Übereinstimmung der Kurven in ihrem allgemeinen Verlauf ist erstaunlich. Weiter hat der Verlauf der Windstaukur-

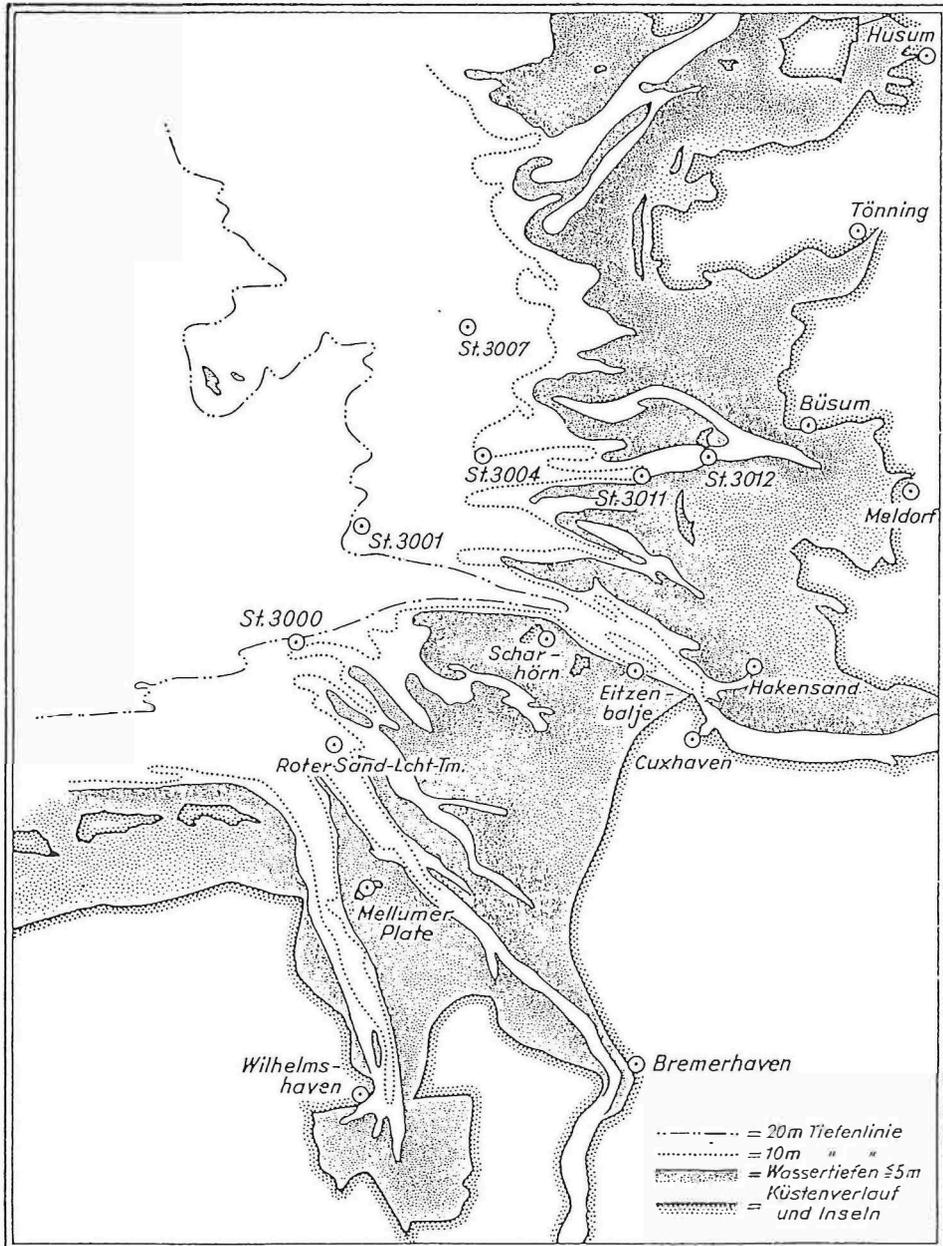


Abb. 1. Übersichtskarte der Meßstationen von TOMCZAK (1953)

ven gezeigt, daß der erste Anstieg des mittleren Wasserstandes beim Aufkommen aufländiger Winde diesen ohne Verzögerung folgt. Der Betrag der Erhöhung entspricht der jeweiligen Stärke und Richtung des Windes in der mittleren und südlichen Nordsee und den topographischen Gegebenheiten der Deutschen Bucht (Küstenverlauf und Wassertiefe). TOMCZAK weist auch nach, daß die Topographie des Meeresgrundes Einfluß auf die Stauhöhe hat: Der Stau an den Küstenstationen nimmt schneller zu als an den Stationen im tiefen Wasser. Nach Erreichen des Windstaumaximums ändert sich der Stau wieder gleichmäßig. Bei abnehmendem Stau macht sich ein stärkeres Fallen bei den Küstenstationen bemerkbar, was im Sinne einer Nivellierung des mittleren Wasserstandes auch erwartet werden muß.

Obwohl diese Ergebnisse erstmals die Darlegung wesentlicher Windstauernkmale im freien Seebereich eröffneten, fehlen Angaben zum Windstau bei Sturmfluten, da im Meßzeitraum nur ein einzelner erhöhter Wasserstand von 1,5 m aufgetreten ist.

Damit erlangen die im DEBEX-Programm 1981 (Deutsche-Bucht-Experimente) des KFKI (siehe WIESE, 1982) u. a. von Küsten- und Hochseepegeln aufgezeichneten hohen Sturmzeiten vom 24. und 25. 11. 1981 besondere Bedeutung, weil sie es erstmals ermöglichen, großflächige Windstauverhältnisse in der südöstlichen Nordsee von der See bis zur Küste zusammenhängend zu dokumentieren.

Im Rahmen des angegebenen Programms sind von Helgoland aus in Richtung Osten (Eiderstedt) und nach Süden (Wangerooog) neun Aanderaa-Hochseepegel ausgelegt worden. Fünf dieser Hochseestationen – Jadetonne, Schlüsseltonne, Helgoland-Süd, Helgoland-Nord und Steingrund-Nordost – zeichnen ebenso wie die für diese Betrachtung herangezogenen stationären Pegel – Bensorsiel, Wangerooog-West, Wilhelmshaven-Alter Vorhafen, Helgoland-Binnenhafen, Leuchtturm Alte Weser, Cuxhaven-Steubenhöft, Leuchtturm Großer Vogelsand, Büsum, Blauort-Norderpiep und Eidersperrwerk – die o.g. Sturmflut auf (Abb. 2).

Da für alle benannten Pegel – Küsten- wie Hochseepegel – mittlere Tidekurven aus dem KFKI-Programm „Mittlere Tiedewasserstände in der südöstlichen Nordsee – säkularer Trend und Verhältnisse um 1980“ vorliegen (LASSEN und SIEFERT, 1992), bot es sich an, nach der in Kap. 1 genannten Methode aus der Informationsfülle und Komplexität der Daten individuelle Windstaukurven für die Sturmzeiten am 24./25. 11. 1982 (Nr. 147 und 148 des Hamburger Sturmflutverzeichnis*) abzuleiten.

Bei der weiteren Betrachtung darf aber nicht außer acht gelassen werden, daß die Windstauanalyse aus einer über zwei volle Tidephasen gelaufenen Sturmflut die Charakteristik nur zu diesem Zeitpunkt – ohne Anspruch auf zu große Verallgemeinerung – wiedergeben kann. Wegen der Fülle der zu klärenden Detailfragen zu diesem Thema ist es durchaus wünschenswert, weitere gründliche theoretische und praktische Untersuchungen durchzuführen, um über diese erste vorliegende Einzelaussage hinaus noch weitere Erkenntnisse über die Windstaustruktur im südöstlichen Nordseebereich hinsichtlich ihres Informationsgehalts bei unterschiedlichen meteorologischen Verhältnissen zu erhalten. Detailliert sollte untersucht werden, in welcher Weise Starkwindlagen in einem großräumigen Windfeld – besonders infolge plötzlicher Richtungsänderungen – die Höhe der Wasseroberfläche beeinflussen.

Wie sich die Windstauhöhe eines Ortes über den Tidezyklus entwickelt, läßt sich anschaulich über die Windstaukurve darstellen. Die in Abb. 3a zusammengestellten Windstaukurven der Sturmzeit 147 von Helgoland-Binnenhafen, Büsum, Cuxhaven, Wilhelmshaven und Bensorsiel vermitteln einen ersten Eindruck über die regional stark abweichenden

* Diese Nummern werden im folgenden häufig verwendet. Das Verzeichnis ist verfügbar in der Bücherei des Amtes Strom- und Hafenaubau.

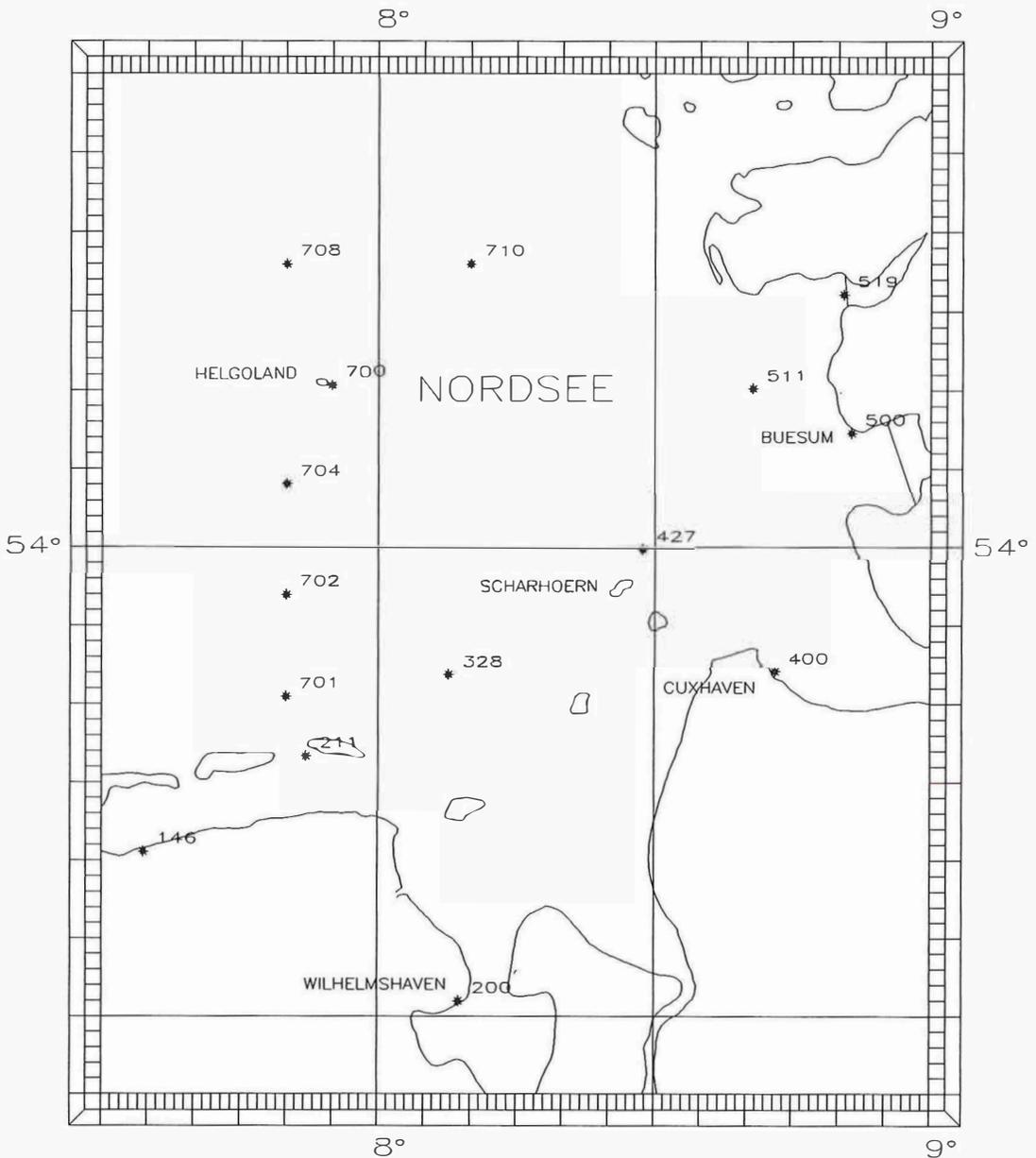


Abb. 2. Übersichtskarte der 1981 verwendeten Stationen. (Nummern der Stationen nach „Die Küste“, H. 52, 1991)

146 = Bensersiel, 200 = Wilhelmshaven-Alter Vorhafen, 211 = Wangerooge W, 328 = LT. Alte Weser, 400 = Cuxhaven-Steubenhöft, 427 = LT. Gr. Vogelsand, 500 = Büsum, 511 = Blauort, 519 = Eidersperrwerk, 700 = Helgoland, 701 = Jadetonne, 702 = Schlüsseltonne, 704 = Helgoland-S, 708 = Helgoland-N, 710 = Steingrund-NO

Windstauhöhen im Untersuchungsgebiet bei annähernd gleichbleibender Windrichtung und -stärke. Danach kann die Helgoländer Windstauhöhe aufgrund der gleichmäßigen Windstaukurvenform in erster Näherung als konstant angenommen werden. An den anderen Küstenorten zeigt sich dagegen deutlich der zunehmende Einfluß von Topographie und abnehmender Wassertiefe auf die zeitgleichen Windstauhöhen und damit auf den unterschiedlichen Verlauf der Windstaukurven. Aus Abb. 3a und Tab. 1 ist ersichtlich, daß der Windstauanteil in Büsum und in Cuxhaven am Morgen des 24. 11. 1981 größer ist als in Wilhelmshaven und Benseniel. Zum Nachmittag gleichen sich die maximalen Stauhöhen der vier Küstenorte an und zeigen in der folgenden Sturmide 148 eine abnehmende Stautendenz von näherungsweise 1 m. Am Morgen des 25. 11. 1981 ist der Küstenstau noch etwa 30 cm höher als bei Helgoland (Abb. 3b). Interessant sind hier die Windstaukurven von Wilhelmshaven. Die stark divergierenden Windstauhöhen geben diesen beiden Kurven einen oszillierenden Verlauf, in dem die Extreme deutlich hervortreten. Sie können z. Z. nur als Naturerscheinung bei Starkwinden gedeutet werden.

Tabelle 1. Windstaumaximum und Windstauminimum der Sturmtiden 147 und 148 mit ihren prozentualen Stauabweichungen gegen Helgoland

	Morgens Windstau				Nachmittags Windstau	
	max cm	%*	min cm	%*	max cm	%*
Helgoland	267	0	228	0	240	0
Büsum	402	+50	279	+22	351	+46
Cuxhaven	353	+32	267	+17	312	+30
Wilhelmshaven	302	+13	168	-26	328	+36
Benseniel	302	+13	228	0	312	+30

* prozentuale Stauabweichungen gegen Helgoland

3. Ermittlung von Windstau-Kennlinien

Für die Vorgehensweise bei jetzigen und zukünftigen Analysen spielt der Bezugsort bei der Gegenüberstellung der Wasserstandshöhen eine wichtige Rolle, um die Windstauarakteristik erkennen und quantifizieren zu können und möglichst die Beschreibung der Sturmide vom freien Meer bis zur Küste zu erfassen. Im vorliegenden Fall wurde der Pegel Helgoland-Binnenhafen aufgrund seiner geographischen Lage als Referenzpegel für die Windstauanalyse gewählt.

In Anlehnung an die Auswertemethode des Strom- und Hafenbau Hamburg sind für jeden Pegel zur Ermittlung zeitgleicher Windstauverhältnisse für die Sturmtiden 147 und 148 je 26 halbstündliche Tidewerte von T_{nw} bis T_{nw} ermittelt worden. Das Datenmaterial ist so aufbereitet, daß die in der Praxis vorkommenden Unzulänglichkeiten

- Abweichung der vorausberechneten astronomischen T_{nw} -Zeit zum 26. Halbstundenwert (hier $\leq 10^m$)
- in den Pegelaufzeichnungen
- bei der Konstruktion einer mittleren Tidekurve
- durch integrale Erfassung von Fernwellen und Eigenschwingungen des Meeres bei den Darstellungen der Windstaukurven für die Bestimmung der Windstau-Kennlinien ohne

Sturmtide 147

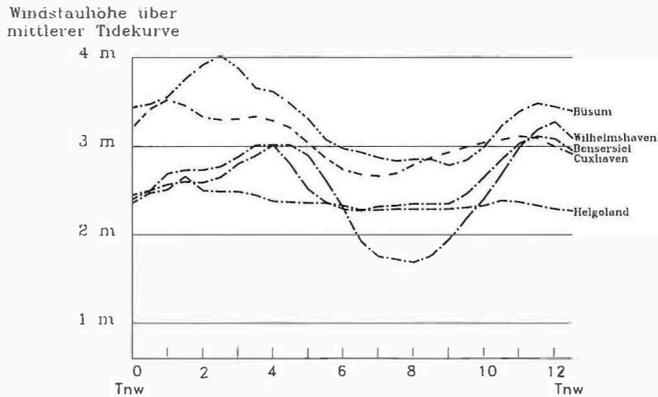


Abb 3a

Sturmtide 148

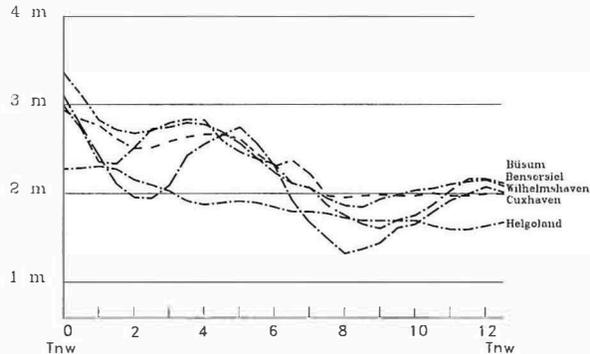


Abb 3b

Abb. 3. Windstaukurven vom 24./25. 11. 1981 (Sturmflut-Nr. nach dem Hamburger Verzeichnis)

nennenswerten Einfluß sind. Eine empirisch entwickelte Genauigkeitsanalyse aus den vorliegenden Informationen und denen von SIEFERT und LASSEN (1985) sowie die entsprechende Sachkenntnis geben eine erste gute Näherung zur Genauigkeit dieses Verfahrens. Danach ist für die Windstauergebnisse mit realistischen Unsicherheiten um $\pm 5\%$, im Extremfall mit $\pm 10\%$ zu rechnen; wobei jedoch vorausgesetzt wird, daß bei diesem Konzept zur Bestimmung der Windstau-Kennwerte die Windstauhöhe bei Helgoland mehr als einen Meter betragen sollte.

Die Windstauentwicklung ist im wesentlichen von der maßgebenden Windrichtung und -stärke abhängig. Der vom Wind erzeugte Stau ist in etwa dem Quadrat der Windgeschwindigkeit proportional, wobei der Einfluß der Windrichtung in den Proportionalitätsfaktor eingeht. Die im Diagramm (Abb. 4) dargestellten Windrichtungen und -stärken geben die Verhältnisse der im Untersuchungsgebiet zentral gelegenen Windmeßstation auf der Insel Scharhörn vom 24./25. 11. 1981 mit halbstündlichen Mittelwerten wieder. Auffällig sind die verhältnismäßig stabilen Werte der genannten meteorologischen Größen. Vereinfachend können daher die Windrichtungen für die Sturmtiden 147 und 148 mit 270° und 300° bei Windstärken zwischen 8 und 10 Bft. in diese Analyse eingeführt werden. Diese Tatsache

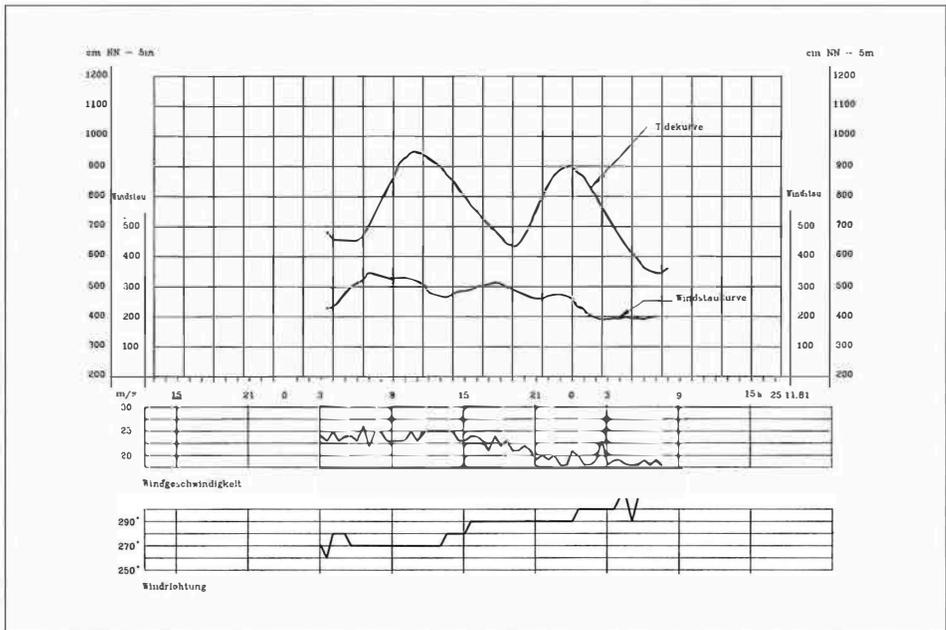


Abb. 4. Tide- und Windstaukurven Cuxhaven mit Windgeschwindigkeit und Windrichtung Scharhörn am 24./25. 11. 1981

kommt der Sachaussage insofern entgegen, da kurzfristige windrichtungsspezifische Aspekte – z. B. können geringe Änderungen in der Windrichtung (Frontdurchgänge) einen Vorzeichenwechsel im Stau bewirken – bei dieser Betrachtung außer acht bleiben können. Ein solcher Idealfall kommt in der Natur sehr selten vor.

Im Seegebiet der südöstlichen Nordsee mit Wassertiefen zwischen 20 m und 45 m ist die Windstautentwicklung bisher nur in groben Zügen bekannt (s. o.). In diesem Zusammenhang ist es für die vorliegende Windstauanalyse sicherlich als glücklicher Umstand zu betrachten, daß verschiedene See- und Küstenpegel während der Meßperiode zum DEBEX-Programm 1981 die Entwicklung der Sturmtiden 147 und 148 großflächig erfaßt und aufgezeichnet haben. Die Ergebnisse zeigen für die seewärtigen Pegel Helgoland-Binnenhafen (Abb. 5), Jadetonne (Abb. 6), Schlüsseltonne (Abb. 7), Helgoland-Süd (Abb. 8), Helgoland-Nord (Abb. 9), Steingrund-Nordost (Abb. 10) und Leuchtturm Alte Weser (Abb. 11) einen Ablauf der jeweiligen Sturmtidekurve, der näherungsweise höhenversetzt dem der mittleren Tidekurve, auch in den maximalen Scheitelbereichen, entspricht. Mit der Schraffur zwischen dieser und der mittleren Tidekurve für Nr. 147 wird der Windstau in den Darstellungen hervorgehoben.

Wie die Ergebnisse der Tab. 2 zeigen, besteht im freien Meer zwischen den mittleren Stauhöhen (Mittel aus 26 halbstündlichen Windstauhöhen über den Tidezyklus) mit den dazugehörigen Standardabweichungen kein signifikanter Unterschied. Die im Verhältnis gegenüber den anderen Pegeln größere Standardabweichung bei Nr. 147 am Pegel Jadetonne deutet auf die Abhängigkeit des Windstaus in Küstennähe schon von geringeren Schwankungen bei westlichen Starkwinden hin.

Der gleichmäßige, aber abweichende Höhenverlauf der seewärtigen Sturmtidekurven (die Kurve 148 ist tiefer als die andere) ist auf die nachlassende Windstärke am Nachmittag des

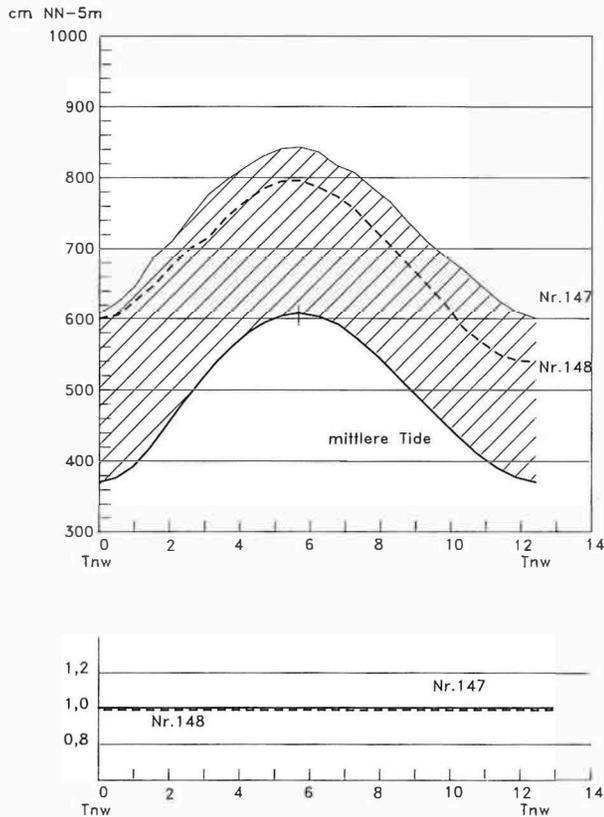


Abb. 5. Sturmtiden Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tide am Pegel Helgoland-Binnenhafen (oben); Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

24. 11. 1981 zurückzuführen und nicht auf die Drehung der Windrichtung von 270° nach 300° . Nach den unbedeutenden Abweichungen zwischen den mittleren Windstau-Kennwerten 147 und 148 im seewärtigen Bereich der südöstlichen Nordsee (Tab. 2) ist in diesem Fall zu vermuten, daß die Windstaustruktur hier dem großräumigen Wettergeschehen ohne ein spezifisches Windrichtungskriterium folgt.

4. Ergebnisse

Um die relativen Formänderungen des Windstaus von See bis zur Küste darzustellen, erhalten die Windstau-Kennwerte für den Pegel Helgoland die Größe 1. So lassen sich aus den tidephasengleichen Quotienten Windstau (A)/Windstau Helgoland-Binnenhafen prozentuale Windstauabweichungen zu Helgoland berechnen.

Die Charakterisierung des Windstaus über die Windstau-Kennlinien im Verhältnis zu dem von Helgoland läßt bei den Seepiegeln keine signifikanten Unterschiede erkennen (Tab. 2). Der Windstau an den seewärtigen Pegeln beträgt nach den vorstehenden Ausführungen erwartungsgemäß ca. 95 % bis 105 % des Windstaus am Pegel Helgoland. Dieser Tatsache ist insofern besondere Bedeutung beizumessen, weil es damit möglich erscheint, den seewärti-

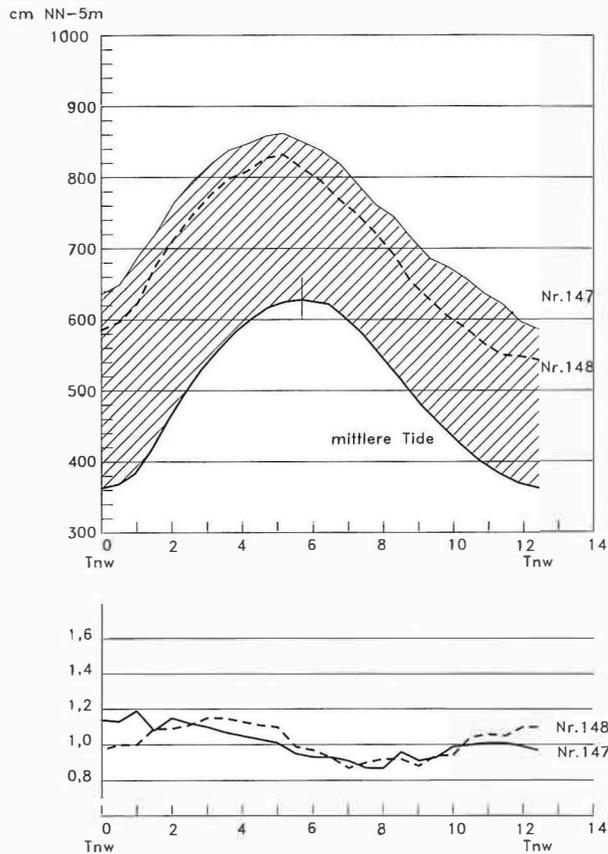


Abb.6. Sturmtiden Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tide am Pegel Jadetonne 7 (oben); Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

gen Windstau vereinfachend durch den Windstau von Helgoland-Binnenhafen zu beschreiben. Die Bestimmung einer gültigen formelmäßigen Aussage über diese Abhängigkeit muß verschoben werden, solange keine weiteren Ergebnisse direkter Windstaumessungen vorliegen.

Bei abnehmender Wassertiefe im Flachwasserbereich vor und an der Küste wird die geographische Lage mit der dazugehörigen topographischen Situation zu einem wichtigen Parameter für die Ableitung der Windstauhöhe. Die Wassertiefe, die im Seegebiet keinen dominierenden Einfluß auf die Windstauhöhe hatte, wirkt hier auf die Mächtigkeit der windbewegten Wasserschicht von Ort zu Ort unterschiedlich. Diese Beziehung kommt bei den Küstenpegeln Wangerooge-West (Abb. 12), Benersiel (Abb. 13), Wilhelmshaven-Alter Vorhafen (Abb. 14), Cuxhaven-Steubenhöft (Abb. 15), Leuchtturm Großer Vogelsand (Abb. 16), Büsum (Abb. 17), Blauort-Norderpiep (Abb. 18) und Eidersperrwerk (Abb. 19) durch Formabweichungen zwischen Sturmtidekurve und mittlerer Tidekurve und damit durch Formänderungen der Windstau-Kennlinien gegen die offene See (Helgoland) zum Ausdruck, wobei die Tatsache, daß sich Windstau und Tide gegenseitig beeinflussen, deutlich wird.

Die Pegel Wangerooge-West (Abb. 12) und Benersiel (Abb. 13) geben mit ihren Wind-

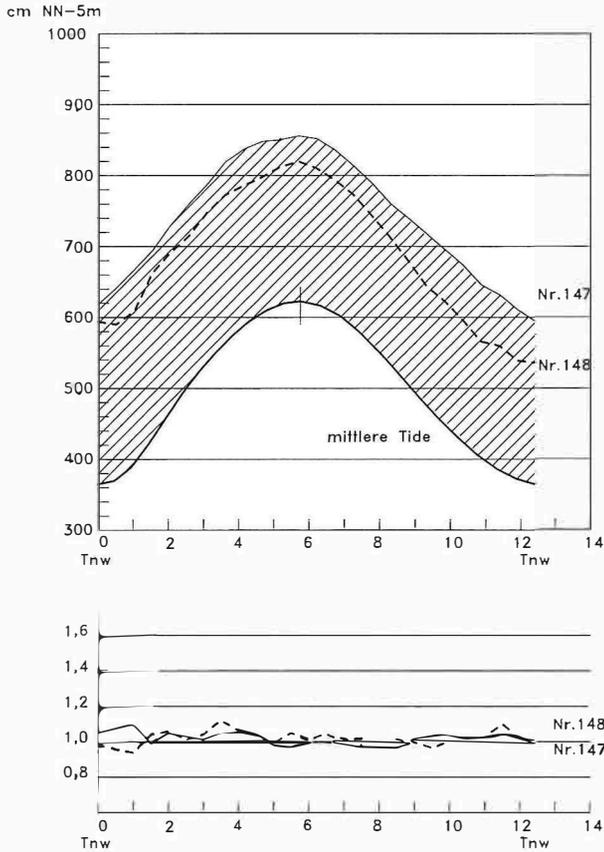


Abb. 7. Sturmzeiten Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tide am Pegel Schlüsseltonne (oben); Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

stau-Kennlinien Hinweise zum regionalen Sturmflutablauf im östlichen Wattgebiet Ostfrieslands zwischen Wangerooge und der Küste. Die Linien deuten hier auf eine differenziert andere Stauentwicklung als bei Helgoland hin: An beiden Orten treten die Kennlinienmaxima mit 1,28 bzw. 1,48 fast zeitgleich zur Tidephase 4 Std. nach astronomisch Tnw ein. Die Kennlinien 148 verlaufen höher als die anderen. Daher ist zu vermuten, daß sich die Drehung der Windrichtung auf WNW am 24. nachmittags auf Füll- und Entleerungsvorgänge der großen Wattflächen zwischen Küste und Inseln zusätzlich auswirkt und zu einem höheren Anstau führt. Das Windstaumaximum erreicht um Wangerooge 299 cm und bei Bengersiel 321 cm. Der Anstieg der maximalen Windstauhöhen beträgt bei den beiden Sturmfluten vom seewärtigen Bereich bis Wangerooge bis zu rd. 25 % und bei Bengersiel bis zu rd. 45 %. Dagegen ergibt sich für die mittleren Windstauhöhen (Tab. 2) ein solcher bis zu den Inseln von knapp 10 % und an der Küste von rd. 20 %. Dies drückt aus, daß bei Bengersiel die Sturmidekurven gegenüber der mittleren Tidekurve deformiert sind, für Wangerooge-West zwischen den Kurven dagegen eine annähernd höhenversetzte Übereinstimmung festgestellt werden kann.

Interessant ist die Windstauentwicklung der November-Sturmfluten 1981 am Pegel Wilhelmshaven-Alter Vorhafen. In Abb. 14 sind die nach der o.g. Berechnungsmethode

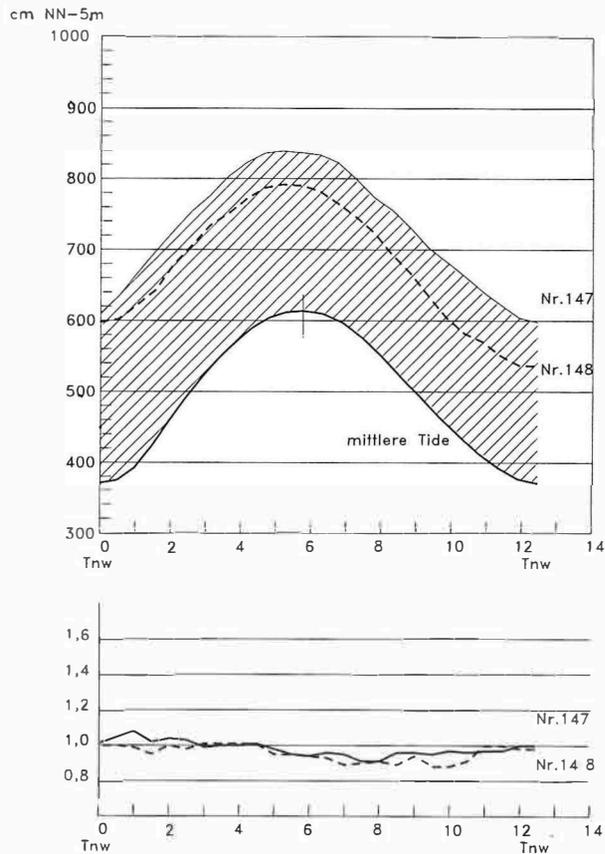


Abb. 8. Sturmtiden Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tide am Pegel Helgoland-Süd (oben); Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

ermittelten Windstauwerte graphisch dargestellt. Auch hier hat die Windstauentwicklung offensichtlich einen anderen Trend als im offenen Meer. Am Ausgang des Jadebusens sind die Einflüsse auf die Windstauentwicklung so vielschichtig verknüpft, daß die Kurvenverläufe vom Windstau 147 und 148 weder untereinander noch mit dem der mittleren Tidekurven übereinstimmen. Die nahezu sinusförmige Abwicklung der Windstau-Kennlinie mit ausgeprägten Minima und Maxima verdeutlicht diesen Trend. Bezeichnend ist aber das Windstauverhältnis gegen die offene See (Helgoland). Das starke Abfallen und Ansteigen der Windstau-Kennlinien mit einem Minimum von 0,75 und einem Maximum von 1,43 deuten auf Unterschiede in den Windstauhöhen zwischen Küste und der See hin. Dieser erkennbare unterschiedliche Windstauereffekt bei Starkwinden aus W bis WNW wird offensichtlich regional verursacht und hat seine Ursachen in der Abhängigkeit der Stauhöhen von Windrichtung und -geschwindigkeit sowie in der Tidebeeinflussung durch die Topographie des Küstenvorfeldes und durch die Geometrie des Jadebusens bei WSW- bis WNW-Winden und in Änderungen der Gezeitenströme. Dies ist insbesondere deshalb eine sichere Aussage, weil die seewärtigen Windstauverhältnisse gegen Helgoland nur um wenige Prozente schwanken. Trotz nachlassender Windstärke während der stauwirksamen Windrichtung aus WNW verzeichnet das Windstauverhältnis 148 teilweise eine Zunahme gegenüber der vorhergehenden

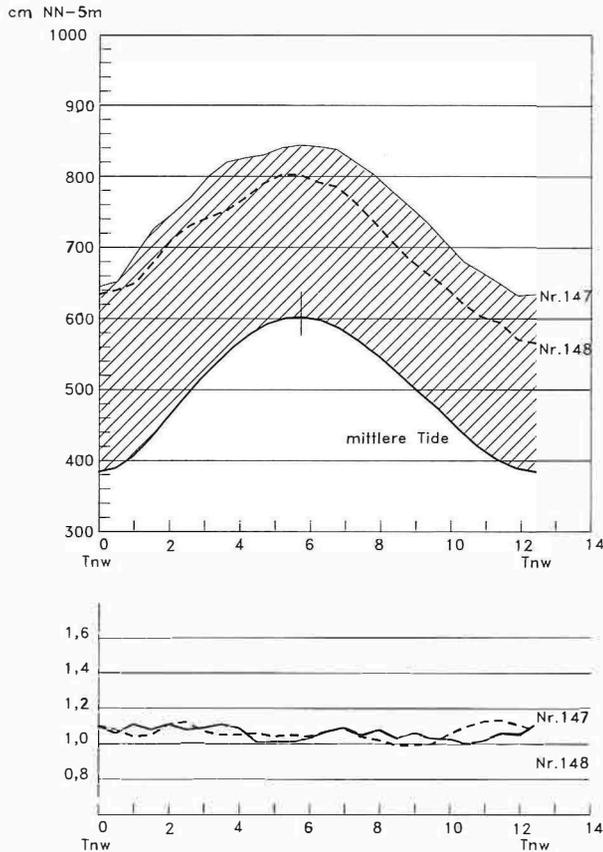


Abb. 9. Sturmtiden Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tide am Pegel Helgoland-Nord (oben); Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

den Sturmtide, d. h., der Windstau baut sich hier langsamer ab als auf der See. Im Gegensatz zu dem bisher Gesagten zeigen die Wilhelmshavener mittleren Windstauhöhen und Kennwerte für die Sturmtiden 147 und 148 bemerkenswerterweise keine bedeutsamen Abweichungen gegen die seewärtigen Mittelwerte (Tab. 2).

Im Gebiet der Elbmündung mit seinen stark strukturierten Wattflächen geben die Sturmtideaufzeichnungen der Pegel Cuxhaven-Steubenhöft unmittelbar an der Küste (Abb. 15) und Leuchtturm Großer Vogelsand im Küstenvorfeld (Abb. 16) einen interessanten Einblick in die Windstauentwicklung vom Tiefwasserbereich über das Küstenvorfeld bis zur Küste bzw. in das Ästuar:

Die Sturmtidekurve am Leuchtturm Großer Vogelsand läuft noch etwa parallel zur mittleren Tidekurve. Dagegen ist bei den Cuxhavener Linien durch küstenspezifische Einflüsse auf die Windstauhöhen keine Übereinstimmung zu finden. An beiden Orten entspricht der unterschiedliche Höhenverlauf der Kurven 147 und 148 eher dem Nachlassen der Sturmstärke am Nachmittag des 24. und nicht so sehr der stauwirksamen Windrichtungsänderung nach WNW.

An beiden Stationen weichen die Windstau-Kennlinien 147 und 148 nicht erheblich voneinander ab. Teilweise überschneidet sich sogar der Linienverlauf. Trotz Abnahme der

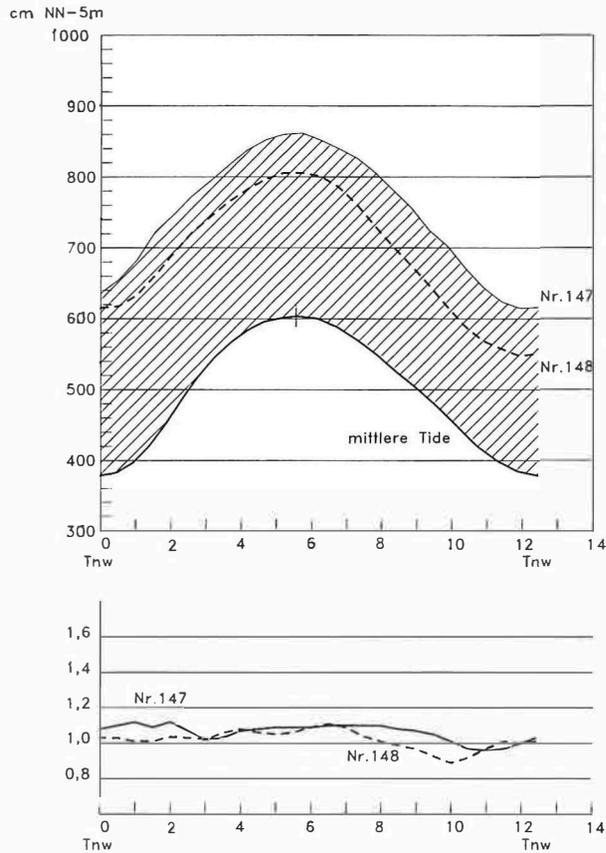


Abb. 10. Sturmtiden Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tide am Pegel Steingrund-Nordost (oben); Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

mittleren Windstauhöhe 148 gegen die andere (Tab. 2) ist die Abweichung zwischen deren Windstaukoeffizienten relativ klein. Damit ist anzunehmen, daß unter den herrschenden meteorologischen Verhältnissen zwischen der Windstauänderung in der offenen See (Helgoland), im Küstenvorfeld und in der Außenelbe eine gleichmäßige Beziehung (anders als im Jadebusen) besteht. Bei diesen Sturmtiden ist eine weitere schwer überprüfbare Abhängigkeit der Windstauhöhen von dem zu füllenden Wasservolumen elbaufwärts zu erwarten. In den Windstaukarten von TOMCZAK (1953) sind die Fahrwasser der Elbe und Weser als Gebiete niedrigen Staus zu erkennen.

Nach einer Abschätzung des Windstaueffekts von der offenen See bis Cuxhaven für die Sturmfluten 147 und 148 ergibt sich dagegen aus dem Verhältnis der mittleren Windstauhöhen (Tab. 2) eine Stauerhöhung für beide Sturmtiden im Mittel von See bis zum Großen Vogelsand um rd. 10 %, um dann bis Cuxhaven auf rd. 25 % anzusteigen. Wie zu erwarten war, erhöht sich der Windstau im Flachwasserbereich.

Aus den Ergebnissen geht weiter hervor, daß die maximalen Windstauhöhen und deren Kennwerte ca. 1 bis 2 Std. nach der astronomischen Tnw-Eintrittszeit beim Leuchtturm Großer Vogelsand mit 275 cm und 1,15, bei Cuxhaven mit 308 cm und 1,29 auftreten. Bei den herrschenden westlichen Starkwinden ist der mittlere Stau 147 in Cuxhaven rd. 20 % größer

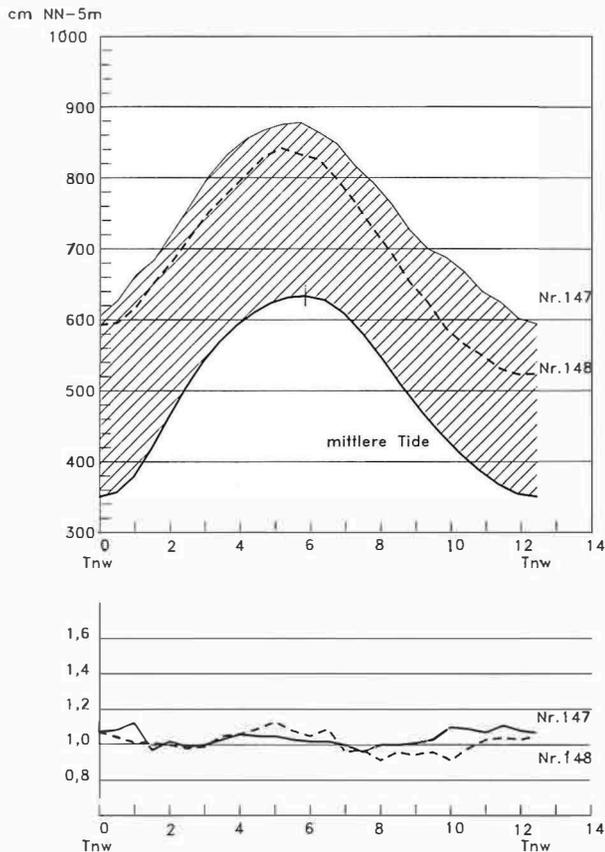


Abb. 11. Sturmtiden Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tide am Pegel LT. Alte Weser (oben); Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

als bei Wilhelmshaven. Kommt der Starkwind dagegen aus WNW, beträgt der Unterschied nur noch rd. 10 %.

Bei geschlossenen Toren des Eidersperrwerks vermitteln die Aufzeichnungen der Küstenpegel Eidersperrwerk (Abb. 19) und Büsum (Abb. 17) sowie der Pegel Blauort im Küstenvorfeld (Abb. 18) als Beispiele eine Übersicht zur Entwicklung der Sturmtiden 147 und 148 in der Dithmarscher Küstenregion: Der direkte stauwirksame Windeinfluß aus westlichen Richtungen führt in diesem Bereich zu einem anderen Ergebnis als an der niedersächsischen Küste: Die Sturmteidekurven 147 und 148 haben nur im Küstenvorfeld bei Blauort einen erkennbar ähnlichen, aber höhenversetzten Kurvenverlauf zur örtlichen mittleren Tidekurve. Wie bei allen Pegeln dieser Analyse sind auch in diesem Bereich Höhenabweichungen zwischen den Sturmtidekurven erkennbar, wobei die 148 deutlich niedriger verläuft. Als Folge des geschlossenen Sperrwerks fehlt in dieser Region die regulierende Wirkung der Eider mit ihrem Außendeichsgelände auf die Windstauentwicklung. Dieser Zusammenhang wird in den Darstellungen der Windstau-Kennlinien von Büsum und dem Eidersperrwerk durch relativ gute Übereinstimmung deutlich. Den Kennlinien fehlen kennzeichnende Extrema. Der flache Kurvenverlauf resultiert aus dem Rückstau. An beiden Stationen ändert sich das Stauverhältnis gegen die offene See (Helgoland) ohne große Schwankungsbreiten ziemlich

Tabelle 2. Mittlere Windstauhöhen und Windstaukennwerte

Pegel	mittlere Windstauhöhe				mittlerer Windstaukennwert				
	147 cm		148 cm		147 cm		148 cm		
	Höhe	S	Höhe	S	Kennw.	S	Kennw.	S	
<i>Seepegel</i>									
Steingrund – NO	253	± 16	192	± 28	1.06	± 0.05	1.02	± 0.05	
Helgoland – N	253	± 16	200	± 26	1.06	± 0.03	1.06	± 0.04	
Helgoland – Binnenhafen	238	± 10	188	± 23	1.00	± 0.00	1.00	± 0.00	
Helgoland – Süd	235	± 18	180	± 27	0.98	± 0.04	0.96	± 0.05	
Schlüsseltonne	243	± 15	192	± 23	1.02	± 0.04	1.02	± 0.04	
Jadetonne	242	± 30	192	± 30	1.01	± 0.08	1.01	± 0.09	
Leucht. Alte Weser	248	± 14	191	± 28	1.04	± 0.04	1.02	± 0.06	
Mittelwert	245		190		1.02		1.01		
<i>Küstenpegel</i>									
Wangerooge – W	263	± 18	216	± 24	1.11	± 0.08	1.15	± 0.08	
Bensersiel	265	± 28	232	± 34	1.11	± 0.11	1.24	± 0.12	
Wilhelmshaven – a. Vorhafen	253	± 49	208	± 48	1.06	± 0.20	1.10	± 0.20	
Cuxhaven – Steubenhöft	308	± 25	233	± 33	1.29	± 0.07	1.24	± 0.08	
Leucht. Gr. Vogelsand	275	± 20	206	± 30	1.15	± 0.05	1.09	± 0.05	
Büsum	331	± 37	233	± 48	1.38	± 0.12	1.24	± 0.16	
Blauort – Norderpiep	265	± 28	232	± 34	1.25	± 0.04	1.15	± 0.08	
Eidersperrwerk	322	± 42	220	± 46	1.35	± 0.13	1.17	± 0.15	

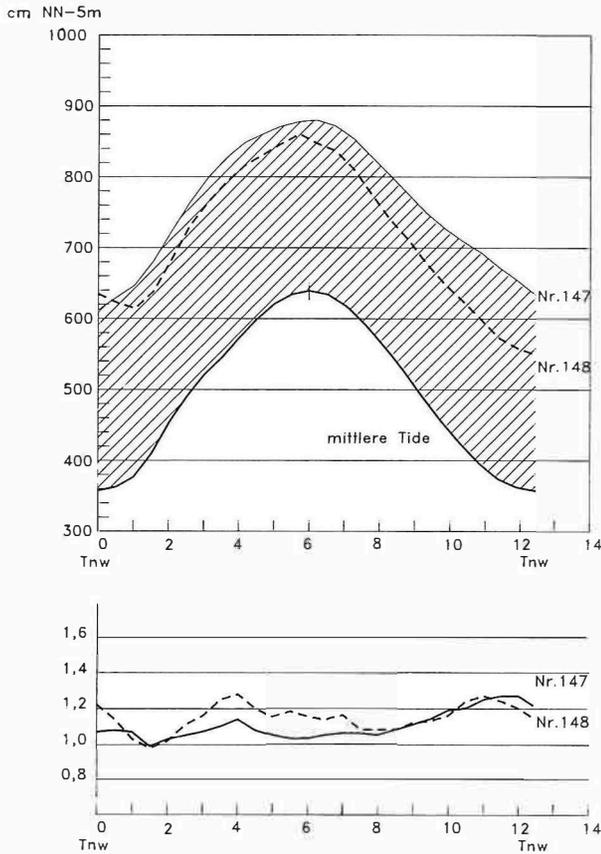


Abb. 12. Sturmzeiten Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tide am Pegel Wangerooge-West (oben); Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

gleichmäßig. Durch die westliche Windeinwirkung wird das Wasser in diesem flachen Küstenvorfeld mit seiner geschlossenen Küstenkonfiguration schneller als auf See angestaut. So erreichen die Windstauhöhen und ihre Kennwerte kurz nach der ersten astronomischen Tnw-Eintrittszeit des 24. ihre maximalen Stauhöhen und Kennwerte:

Pegel	maximaler Windstau (cm)	maximaler Windstau-Kennwert
Büsum	402	1,61
Eidersperrwerk	414	1,67
Blauort	340	1,37

Das HThw tritt an der Küste früher als seewärts ein, was auch bei anderen Sturmfluten der Fall ist. Nach Drehung des Starkwindes auf WNW lassen die Kennlinien 148 bezeichnende Formabweichungen im Verlauf gegen die Linie 147 erkennen. Bei etwa $\frac{2}{3}$ der Tide erlangt das Windstauverhältnis zu Helgoland Werte um 1, d. h., die Windstauhöhen im

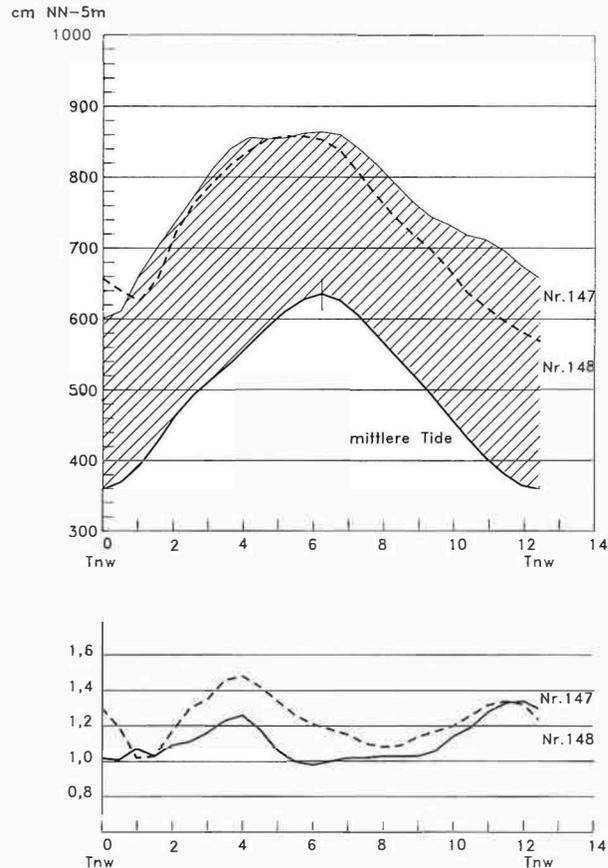


Abb. 13. Sturmzeiten Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tiden am Pegel Benseniel (oben); Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

Dithmarscher Küstenbereich und der offenen See stimmen überein. Im Küstenvorfeld beim Pegel Blauort ist die Windstauentwicklung ähnlich wie an der Küste. Nur sind hier die Kennwerte erwartungsgemäß kleiner. Die Kennlinie 147 verläuft sehr flach, und die Schwankungsbreite der Linie 148 ist nicht so stark ausgeprägt. Auch hier ist die Windstauhöhe nach etwa $\frac{1}{3}$ der Tide gleich der von der offenen See.

Die mittleren Windstauhöhen und deren Kennwerte (Tab. 2) lassen den zufälligen Charakter des Windeinflusses auf die Wasserstände am 24. erkennen. Dieser kann wie folgt erklärt werden: Bei westlichen Starkwinden 9 bis 10 Bft. mit gleicher Intensität über die Tide steigen die mittleren Windstauhöhen im Küstenvorfeld und an der Küste gegenüber dem seewärtigen Mittelwert bei Blauort um rd. 10 %, am Eidersperrwerk um rd. 30 % und in Büsum um rd. 35 %. In der zweiten Tageshälfte des 24. mit seinen WNW-Winden tritt diese Auswirkung auf den Windstau nicht in der gleichen Stärke auf. Sie erreicht bei Blauort zwar noch rd. 20 %, jedoch beim Eidersperrwerk nur noch rd. 10 % und bei Büsum rd. 20 %.

Bei dem herrschenden Starkwindfeld des 24. läßt sich aus der Klassifizierung der Windstau-Kennlinien 147 und 148 eine weitere Zusatzinformation zur Windstaucharakteristik Dithmarschens herleiten. Nach Drehung des Windes auf WNW reduzierte sich das Stau-

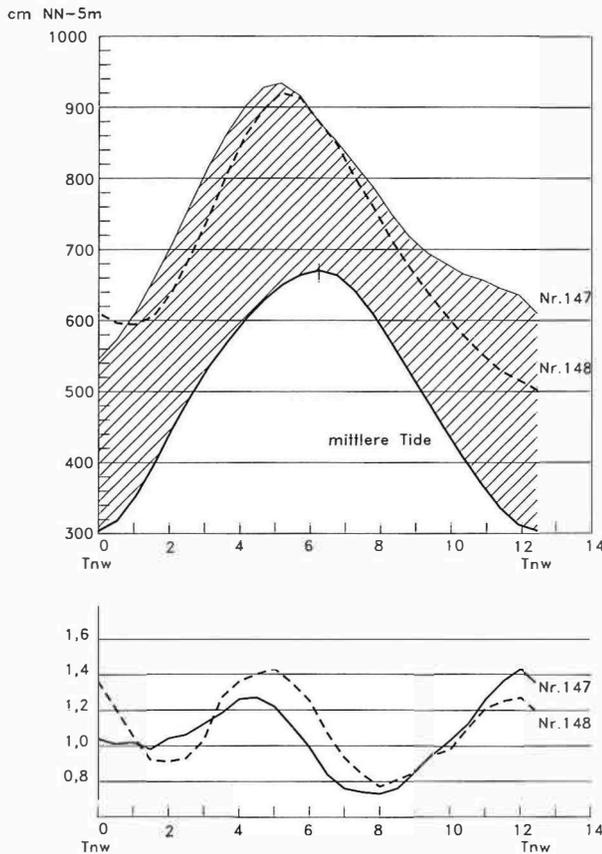


Abb. 14. Sturmzeiten Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tide am Pegel Wilhelmshaven-Alter Vorhafen (oben); Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

verhältnis 148 um rd. 10 %, während es sich an der ostfriesischen Küste leicht erhöhte. Auf diese Wechselwirkung deutet die Höhenabstufung der Kennlinie 148 hin. In Dithmarschen ist sie deutlich unter und in Ostfriesland über der Linie 147.

Nach detaillierten Windstauuntersuchungen in den vorigen Abschnitten werden die Sturmflutkennwerte 147 und 148 der jeweiligen Pegelstation im Untersuchungsgebiet abschließend gemittelt und die sich daraus ergebenden Kennlinien in den Abb. 20a bis 20n dargestellt. Diese Datenkombination bietet den Vorteil, die Windstaustruktur deutlicher herauszuarbeiten, als es aus den Einzelinformationen der Abb. 5 bis 19 möglich ist. Die gemittelten Kennwerte unterscheiden sich von den Einzelbeträgen bis zu 10 % im Küstenbereich und nur geringfügig im offenen Meer. Diese Abweichungen haben bei den Darstellungen der Kennlinienformen (Abb. 20a bis 20n) gegenüber denen in Abb. 5 bis 19 keine wesentlichen Divergenzen zur Folge. Damit bleiben die vorstehenden Aussagen zur Windstauentwicklung im November 1981 generell richtig. Lediglich die Beträge für die maximalen und minimalen Kennwerte sowie die Kurvenformen ändern sich geringfügig aufgrund der Mittelbildung.

Bei diesen sehr hohen Sturmfluten zeigen die Kennlinienformen der Pegelstationen

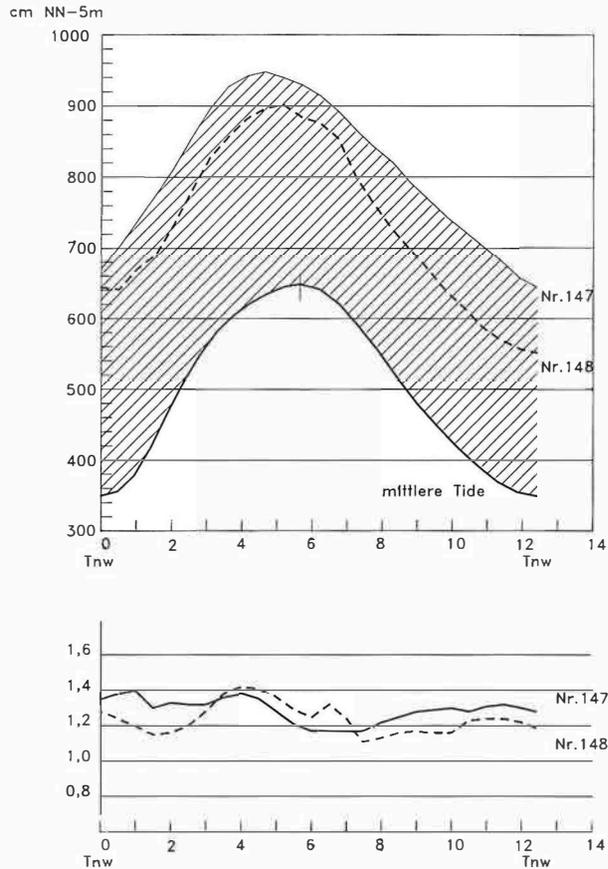


Abb. 15. Sturmzeiten Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tide am Pegel Cuxhaven-Steubenhöft (oben); Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

(Abb. 20a bis 20n) deutlich den unterschiedlich zunehmenden Einfluß der Küstentopographie auf die Windstauhöhe von der freien See bis zur Küste. Diese Kurven stehen nicht im Einklang mit denen, die von SIEFERT und LASSEN (1985) veröffentlicht worden sind. Aus dem Kennlinienvergleich beider Darstellungszeiträume wird aber auch deutlich, daß es z. Z. nur bedingt gelingt, Windstauhöhen zu bestimmen, die repräsentativ für Windrichtung und Windstärke sowie für den Luftdruck- und Temperaturgradienten sind. Es wird daher in Zukunft eine interessante Aufgabe sein, für den Meeres- und Küstenbereich die Windstaustruktur weiter aufzuhellen und das vorliegende Ergebnis kritisch auf seinen Informationsgehalt zu prüfen.

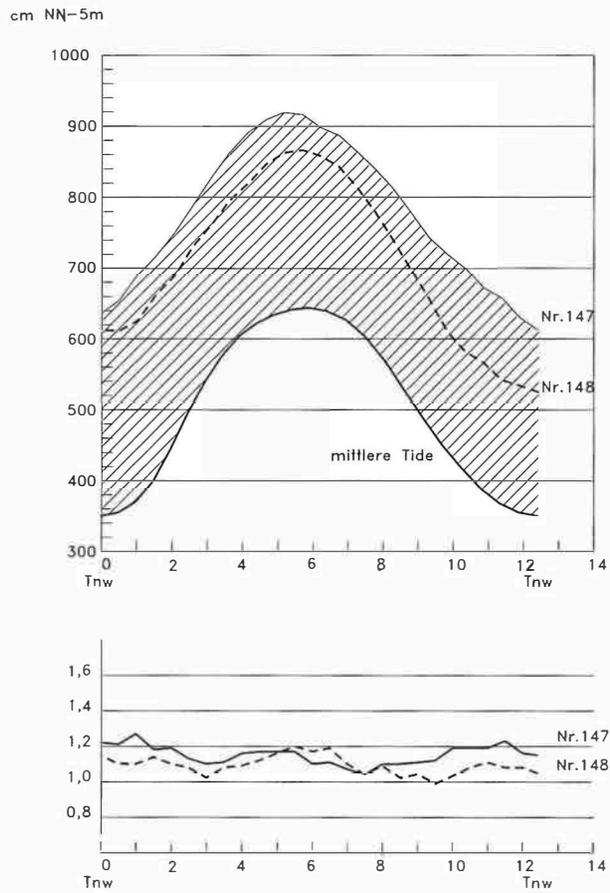


Abb. 16. Sturmzeiten Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tide am Pegel LT. Gr. Vogelsand (oben);
Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

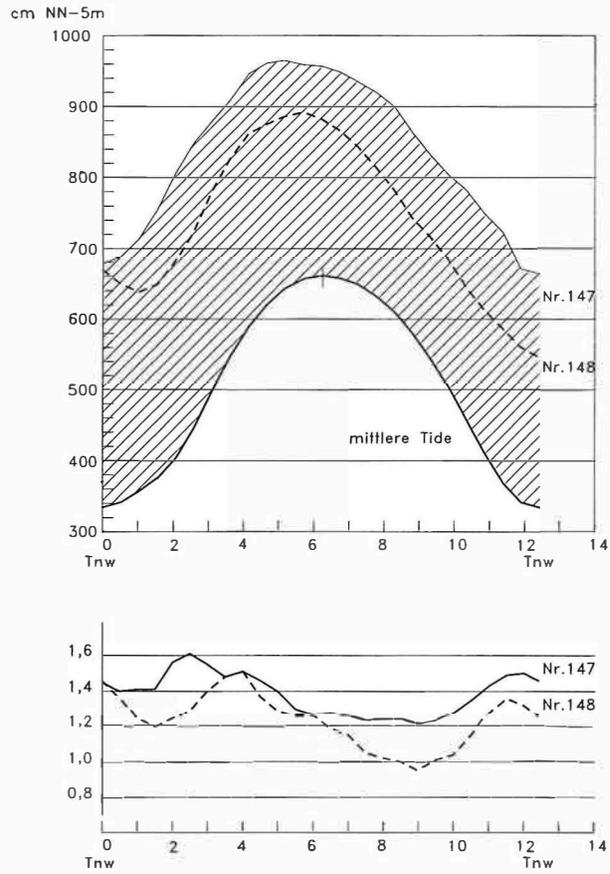


Abb. 17. Sturmzeiten Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tide am Pegel Büsum (oben); Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

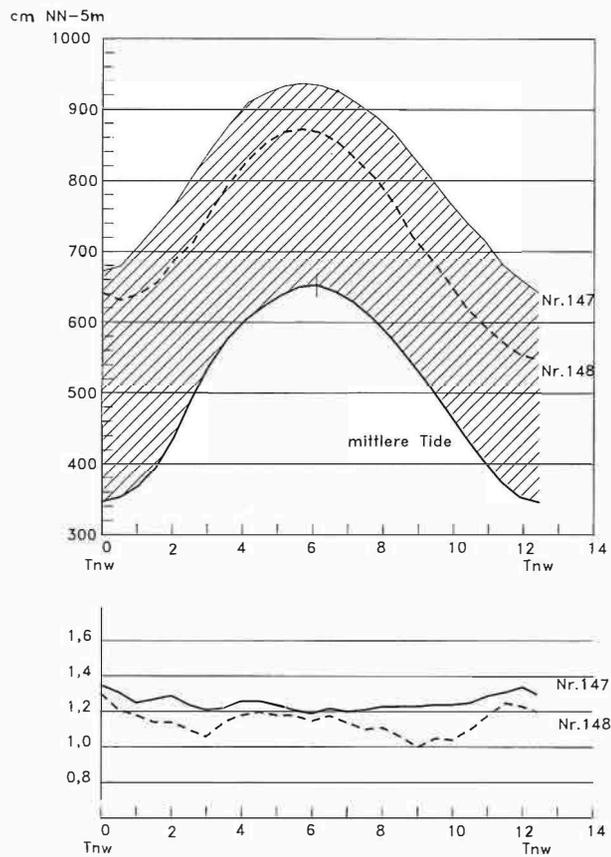


Abb. 18. Sturmtiden Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tide am Pegel Blauort (oben); Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

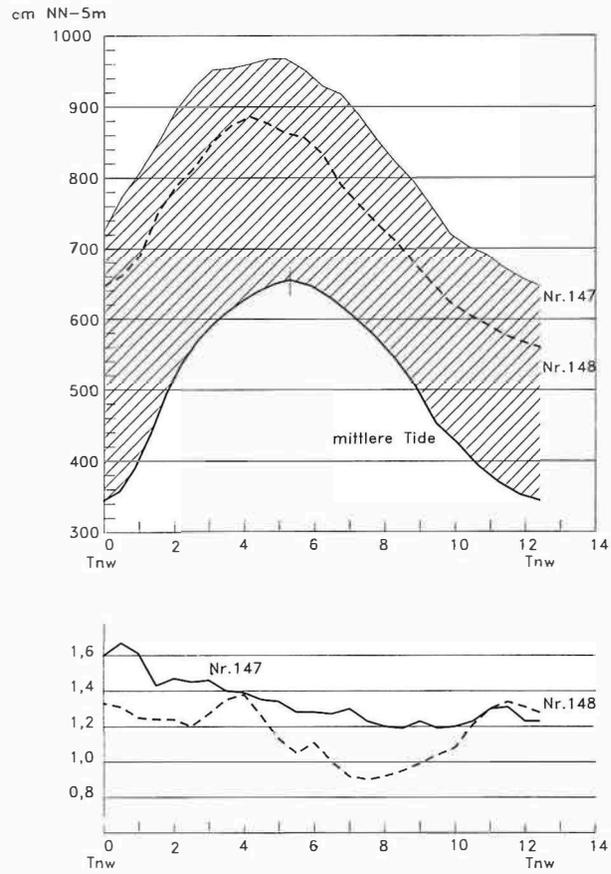


Abb. 19. Sturmtiden Nr. 147 und 148 sowie zugehörige mittlere Tide am Pegel Eidersperwerk AP (oben); Windstau-Kennlinien bezogen auf Helgoland-Binnenhafen (unten)

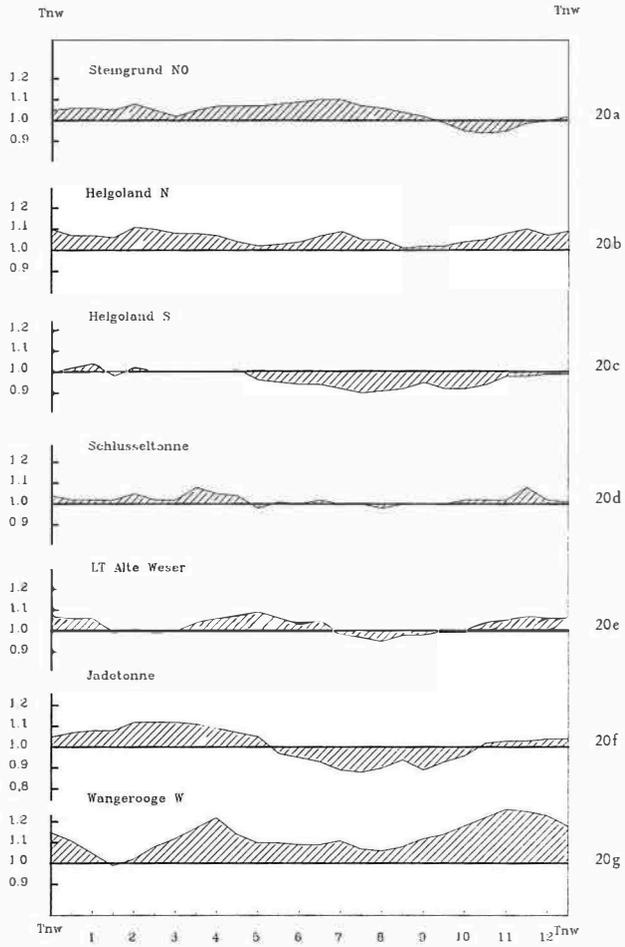


Abb. 20. a-g Gemittelte Windstau-Kennlinien (Nr. 147 und 148) bezogen auf Helgoland

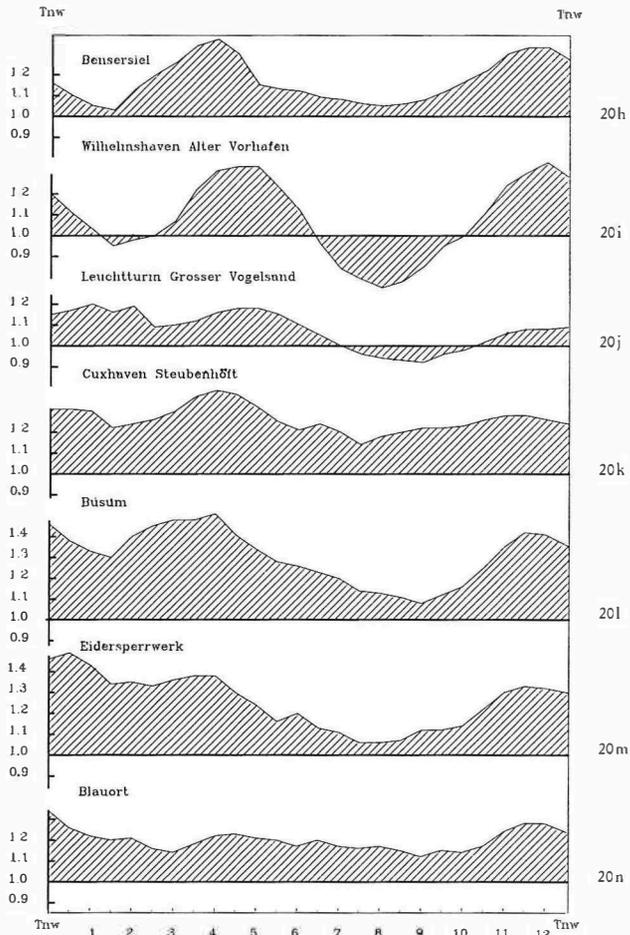


Abb. 20. h–n Gemittelte Windstau-Kennlinien (Nr. 147 und 148) bezogen auf Helgoland

5. Schriftenverzeichnis

- ANNUTSCH, R.: Wasserstandsvorhersage und Sturmflutwarnung. *Der Seewart*, H. 5, 1977.
- LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. *Die Küste*, H. 50, 1990.
- LASSEN, H. u. SIEFERT, W.: Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee – säkularer Trend und Verhältnisse um 1980. *Die Küste*, H. 52, 1991.
- SIEFERT, W.: Sturmflutvorhersage für den Tidebereich der Elbe aus dem Verlauf der Windstaukurve in Cuxhaven. *Mitteilungen des Franzius-Instituts*, H. 30, 1968.
- SIEFERT, W.: Erste Erfahrungen mit dem neuen Sturmflut-Vorhersageverfahren. *Mitteilungen des Franzius-Instituts*, H. 40, 1974.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelaufzeichnungen. *Die Küste*, H. 42, 1985.
- TOMCZAK, G.: Die Einwirkungen des Windes auf den mittleren Wasserstand der Deutschen Bucht vom 15. Februar bis 06. März 1951. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, H. 1, 1953.
- WIESE, H.-W.: Messungen der Wasserstände in der Deutschen Bucht während DEBEX '81. Erste Ergebnisse mit neuen Hochseepegeln. *Intermaritec*, 1982.