

## Vorwort

zu den Beiträgen von

EIBEN, SCHWARZER und STERR in diesem Heft

Sturmflutereignisse an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste finden allgemein nicht die Beachtung wie vergleichbare Sturmfluten an der Nordseeküste. Die Häufigkeit des Auftretens von Sturmfluten ist dort größer und die Bedrohung durch die See entsprechend augenfälliger.

Damit sind die Probleme der Küstensicherung an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste genauso beachtenswert wie vielschichtig und fordern auch wegen des selteneren Auftretens von Sturmfluten zur genauen Beobachtung der hydrologischen und sedimentologischen Abläufe während der Sturmphasen auf.

Gewässerkundliche Beobachtungen besonders, bezogen auf das Seegangs-, Strömungs- und Brandungsströmungsgeschehen, wurden bisher im wesentlichen zur Erfassung ortsspezifischer Daten dann vereinzelt durchgeführt, wenn z. B. bedeutende Küstenschutzmaßnahmen projektiert werden sollten. Aus der Zufälligkeit des meteorologischen und hydrologischen Geschehens heraus ergab sich manchmal die Gelegenheit zur Erfassung extremerer Ereignisse.

Der Fachbereich der Hydrogeologie der Universität Kiel hat eine Reihe von wichtigen Beiträgen geleistet, die im Bereich der Küstensicherung beachtet und verwendet wurden. Koordinierende Bearbeitungen zwischen Hydrologen, Geologen und anderen Fachbereichen erfolgten hauptsächlich maßnahmebezogen und entsprechend ortsgebunden.

Daher ist die Reihe koordinierender Untersuchungen, bezogen auf die Probleme der Küstensicherung und der Erhaltung der Küste, entsprechend kurz für den Bereich der schleswig-holsteinischen Ostseeküste.

Küstenschutzmaßnahmen wie die Deichverstärkung Probstei machten zur Projektierung der Maßnahme 1975 die Errichtung einer Meßstation zur Erfassung von meteorologischen und hydrologischen Daten erforderlich, um die bereits z. B. durch die „Untersuchungsstelle Heiligenhafen“ Ende der 50er Jahre gewonnenen hydrologischen und sedimentologischen Erkenntnisse wesentlich zu vertiefen.

Das 1976 für die Maßnahme Probstei entwickelte Untersuchungsprogramm verlangte und leistete eine koordinierende Bearbeitung der hydrologischen, hydrodynamischen, sedimentologischen und morphologischen Probleme für den Küstenbereich vor der Probstei, aber auch für wesentliche Teile der schleswig-holsteinischen Ostseeküste. Dieses wurde durch die gute Zusammenarbeit der derzeit am Programm beteiligten Dienststellen des Landes Schleswig-Holstein und beteiligten Fachinstitute möglich.

Wegen der besonderen Bedeutung der Sturmflutereignisse im Winter 1986/87 sollten die aus dem vorgenannten Untersuchungsprogramm 1979 im Heft 65 des Leichtweiß-Institutes der TU Braunschweig zusammengefaßten Arbeiten bestätigt bzw. ergänzt werden.

Aus Interesse an der Fortschreibung der Sache fanden sich die Verfasser der o. g. Beiträge zu den folgenden Ausarbeitungen bereit, in der Hoffnung, zu weiteren Arbeiten in dieser Richtung anzuregen und die wenigen mit Meßeinrichtungen ausgerüsteten Beobachtungspunkte auch künftig zu nutzen.

H. EIBEN

# Wind, Wasserstände und Seegang während der Sturmperioden an der Ostseeküste Schleswig-Holsteins im Winter 1986/87

VON HARTMUT EIBEN

## Zusammenfassung

In der Zeit vom 1. 12. 1986 bis 15. 1. 1987 traten an der Ostseeküste mehrere bemerkenswerte Sturmfluten ein.

Neben den kleineren hob sich die Sturmflutperiode vom 6. 1. bis 14. 1. 1987 wegen ihres Wind-, Wasserstands- und Seegangsverlaufes besonders heraus. Dieses Ereignis entsprach in Größe und Intensität im wesentlichen dem vom Jahreswechsel 1978/79, übertraf es sogar hinsichtlich des beobachteten Seegangs. Dieser konnte wegen der beginnenden Eisbildung an vielen Küstenstellen nicht zur vollen Entfaltung gelangen. Insofern sind manche Küstenabschnitte vor ähnlichen Zerstörungen, wie sie zum Jahreswechsel 1978/79 entstanden, verschont worden.

Statistisch trat die Sturmflut rechtzeitig auf und mahnte, den Schutz der stark beanspruchten Küstenbereiche nicht außer Acht zu lassen.

## Summary

*Several remarkable storm surges occurred during the winter of 1986/87. The storm surges between January 6-14, 1987 were especially significant due to the associated winds, water levels and sea states. The size and intensity of this event were similar to those during the 1978/79 winter. The sea state in 1987 was more intense.*

*The development of ice at many coastal areas prevented the sea state from reaching its expected maximum. Therefore, the damage was not as extensive as in 1978/79.*

*Statistically, the storm surge occurred when expected. It is a continued warning that coastal protection must be taken very seriously.*

## Inhalt

1. Vorbemerkung . . . . .	15
2. Meßstationen . . . . .	15
3. Auswertung und Darstellung der Wasserstands-, Seegangs- und Windganglinien . . . . .	15
4. Meßergebnisse . . . . .	16
4.1 Wasserstände . . . . .	16
4.1.1 Wasserstandshöhen . . . . .	16
4.1.2 Verweilzeiten . . . . .	22
4.2 Seegang . . . . .	23
4.2.1 Allgemeines . . . . .	23
4.2.2 Wellenhöhen und Ereignisdauer . . . . .	25
4.2.3 Wellenperioden . . . . .	27
4.2.4 Belastungsrichtung des Seeganges . . . . .	29
4.3 Eisbildung . . . . .	29

## 1. Vorbemerkung

Im Winter 1986/87 liefen an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste in der Zeit vom 1. 12. 1986 bis zum 15. 1. 1987 mehrere bemerkenswerte Sturmfluten auf.

Die in dieser Zeit aufgezeichneten Wasserstands-, Wind- und Seegangseignisse unterschiedlicher Größenordnung und Entstehungsursache ergänzen die Charakteristiken für Ostsee-Sturmfluten. Ziel dieses Berichtes ist es, sie zu dokumentieren und hinsichtlich ihrer hydrologischen und hydrodynamischen Bedeutung einzuordnen.

## 2. Meßstationen

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Meßdaten wurden an verschiedenen Standorten gemessen. Die Wind- und Seegangsganglinien wurden an der in Heft 65 der Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes Braunschweig beschriebenen Meßstation „Kalifornien“ am Schönberger Strand, ca. 25 km nordöstlich von Kiel, aufgezeichnet. Dabei befand sich ein Seegangmeßkopf (Echolotwellenpegel System FAHRENTHOLTZ) ca. 800 m vom Ufer entfernt in einer Wassertiefe, bezogen auf NN von NN - 4,50 m. An einem etwa in der Streichlinie der Bühnen gelegenen zweiten Meßpfahl (ca. - 2,50 m NN) wurden auch die Brandungsströmung sowie der Wasserstand gemessen, allerdings nur zeitweise.

Daher wurden für die Auswertung der fehlenden Wasserstandsdaten die Aufzeichnungen des am Bahnhofskai in Kiel gelegenen Pegels herangezogen. Diese Zuordnung war zulässig, weil die Korrespondenzen der Pegel Bahnhofskai Kiel und Kalifornien bekannt sind.

Die Temperaturmeßdaten wurden an der Meßstelle des Wasser- und Schiffsamtes Lübeck in Travemünde aufgezeichnet und von dort dankenswerterweise zur Verfügung gestellt.

## 3. Auswertung und Darstellung der Wasserstands-, Seegangs- und Windganglinien

Die aufgezeichneten Wasserstandsdaten waren im Rahmen einer Plausibilitätskontrolle nur geringfügig in einzelnen Zeitbereichen zu korrigieren. Wegen der in den Pegeln vorhandenen Dämpfungselemente erforderte es weitgehend keines besonderen Ausgleiches der Wasserstandsaufzeichnung.

Die Seegangsmessungen erfolgten – besonders zu den Zeiten stärkeren Seegangs – zeitweilig manuell. Dabei wurde je Meßphase auf eine ausreichend lange Aufzeichnungszeit geachtet.

Zu einigen Meßzeiten waren übertragungsbedingte Störungen auszugleichen. Dieses ist weitgehend gelungen, weil diese Meßphasen meistens von einem Beobachter überwacht wurden.

Die Seegangsschriebe wurden manuell ausgewertet. Der Seegang wurde als  $H_s$  bzw.  $T_s$  angegeben.

Die Windmeßstation zeichnete über die gesamte Zeit störungsfrei auf. Die Ganglinie zur Windgeschwindigkeit wurde wegen der zeitweise starken Böigkeit als Mittelwert aus der einhüllenden Minimal- bzw. Maximalkurve manuell ermittelt (s. Abb. 1). Diese Art der Auswertung entsprach auch der von früheren Windereignissen, so daß eine Vergleichbarkeit dazu gegeben ist.

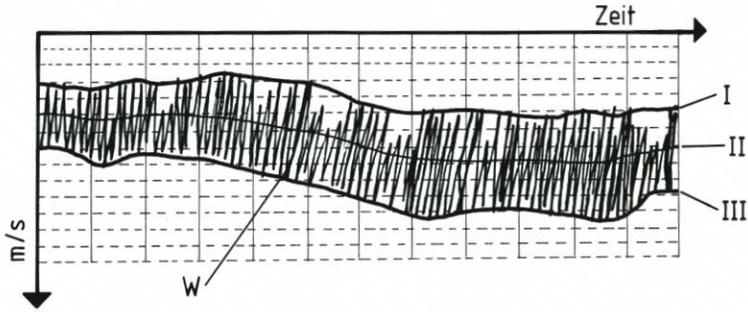


Abb. 1: Beispiel für die Auswertung der Windganglinie

Auf eine detaillierte Auswertung der Brandungsströmung mußte wegen des sehr hohen Arbeitsaufwandes verzichtet werden.

Die während der Beobachtungszeit gemessenen Daten für Windgeschwindigkeit und -richtung, Wasserstände und Seegang sind in den Anlagen 1 bis 4 als Ganglinien dargestellt.

#### 4. Meßergebnisse

##### 4.1 Wasserstände

###### 4.1.1 Wasserstandshöhen

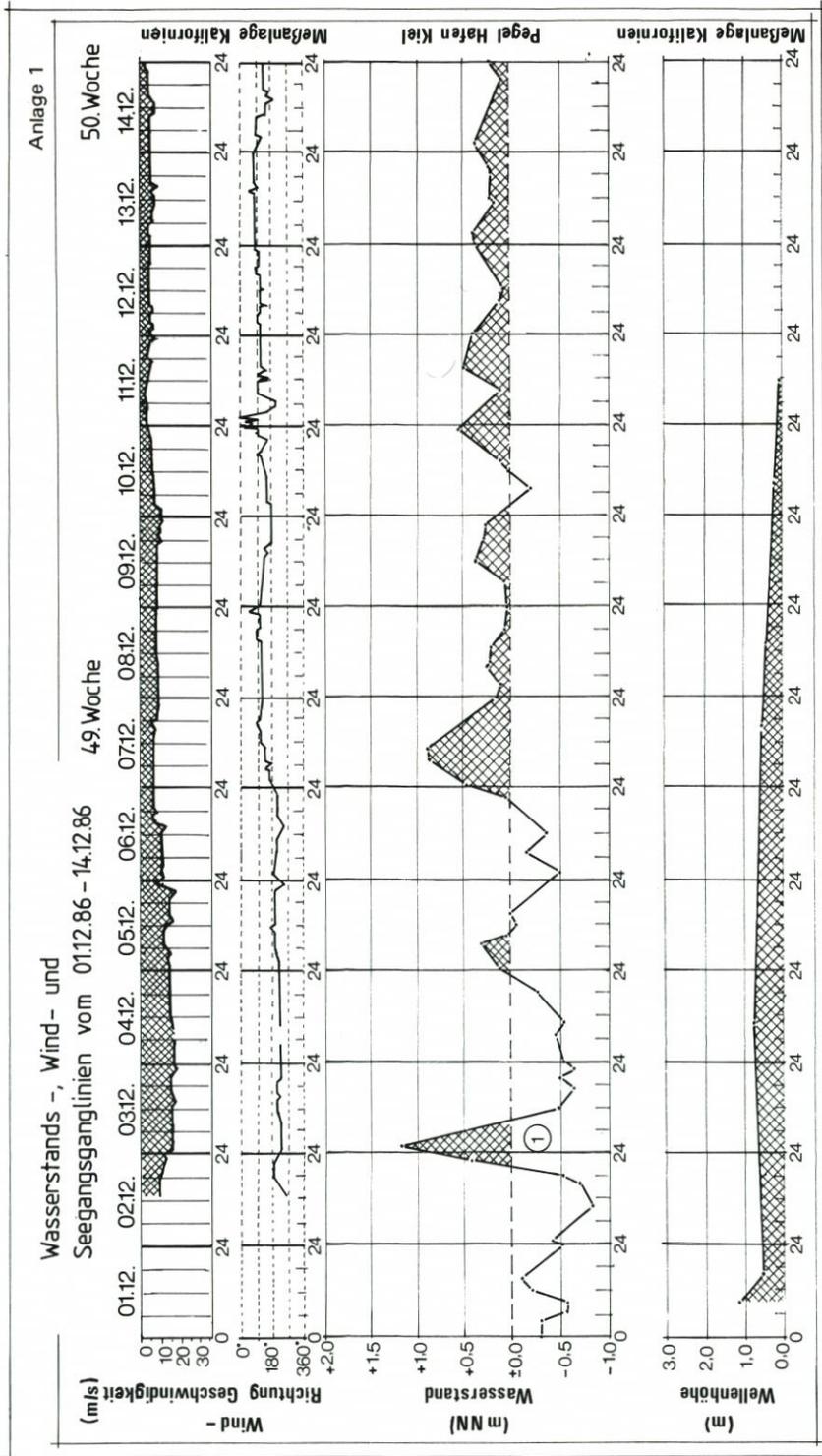
Gemäß DIN 4049 unterscheiden sich Sturmfluten nach ihrer Schwere. Die Zuordnung zum jeweiligen „Schwerebereich“ einer Sturmflut erfolgt über die Häufigkeit und den Wasserstandsbereich, dem das Wasserstandsereignis zugehört. Diese Klassifikation ist nach Auffassung des Verfassers unvollständig, weil die Schwere einer Sturmflut nicht nur vom Wasserstandsereignis her, sondern auch von dessen Auslösfaktoren sowie der Größenordnung der Seegangenergie und deren Wirkung auf die Küste beurteilt werden muß. Im Sinne der DIN 4049 ist der Begriff des Schwerebereiches einer Sturmflut an der deutschen Nordseeküste angebracht, weil Sturmfluten hier immer von westlichen Stürmen ausgelöst werden und mit einer entsprechenden Seegangwirkung auf die Küste verbunden sind.

Wegen ihrer Beckenform gerät der Wasserspiegel der Ostsee z.B. häufig bei Weststürmen ins Schwingen, so daß trotz des ablandigen Windes infolge des „Rückschwappens“ der Ostsee die schleswig-holsteinische Ostseeküste unter zeitweiligen Hochwassereinfluß gerät. Weite Küstenbereiche werden entsprechend nicht durch Seegang beansprucht.

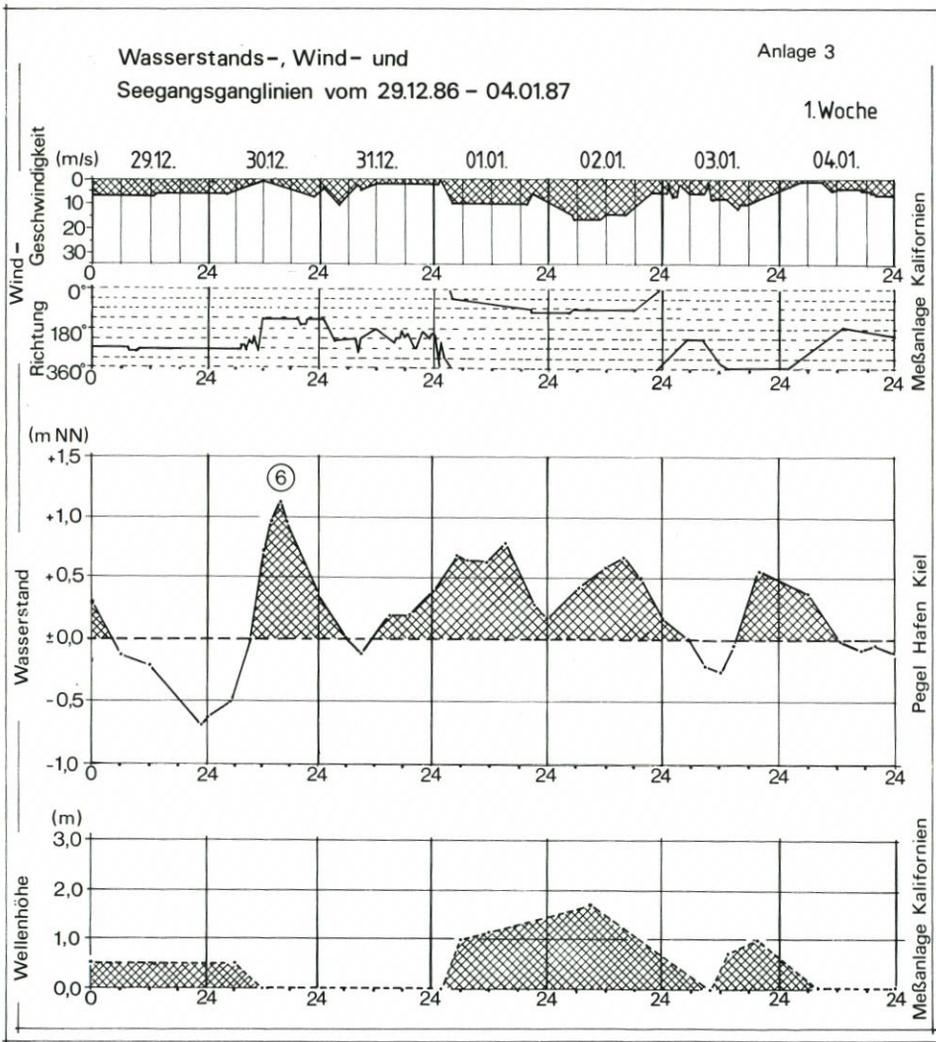
Daher wurde zur statistisch richtigen Einordnung aller Hochwassereignisse eine Einstufung analog DIN 4049 gewählt. Sturmfluten im eigentlichen Sinn (d. h. verbunden mit auflandigen Winden) sind nach Auffassung des Verfassers dann statistisch anders zu fassen, weil sie entsprechend seltener auftreten. Zur verständlicheren Einordnung der Wasserstandsereignisse analog der DIN 4049 sind daher Hochwassereignisse gemäß Tab. 1 einzustufen.

Entsprechend der in Tab. 1 vorgenommenen Einordnung sind in der Zeit vom 1. 12. 1986 bis zum 15. 1. 1987 insgesamt acht Fluten eingetreten mit entsprechend hohen Wasserständen, die in die Gruppe der erhöhten Wasserstandsereignisse einzuordnen sind (Tab. 2).

Das Hochwasser vom 12./13. 1. 1987 (Ereignis Nr. 9 gemäß Anlage 4) gehört mit seinem Wasserstandsmaximum von NN +1,82 m in die Gruppe der höheren Hochwassereignisse. Das letzte Hochwasser dieser Größenordnung wurde am 15. 2. 1979 beobachtet.







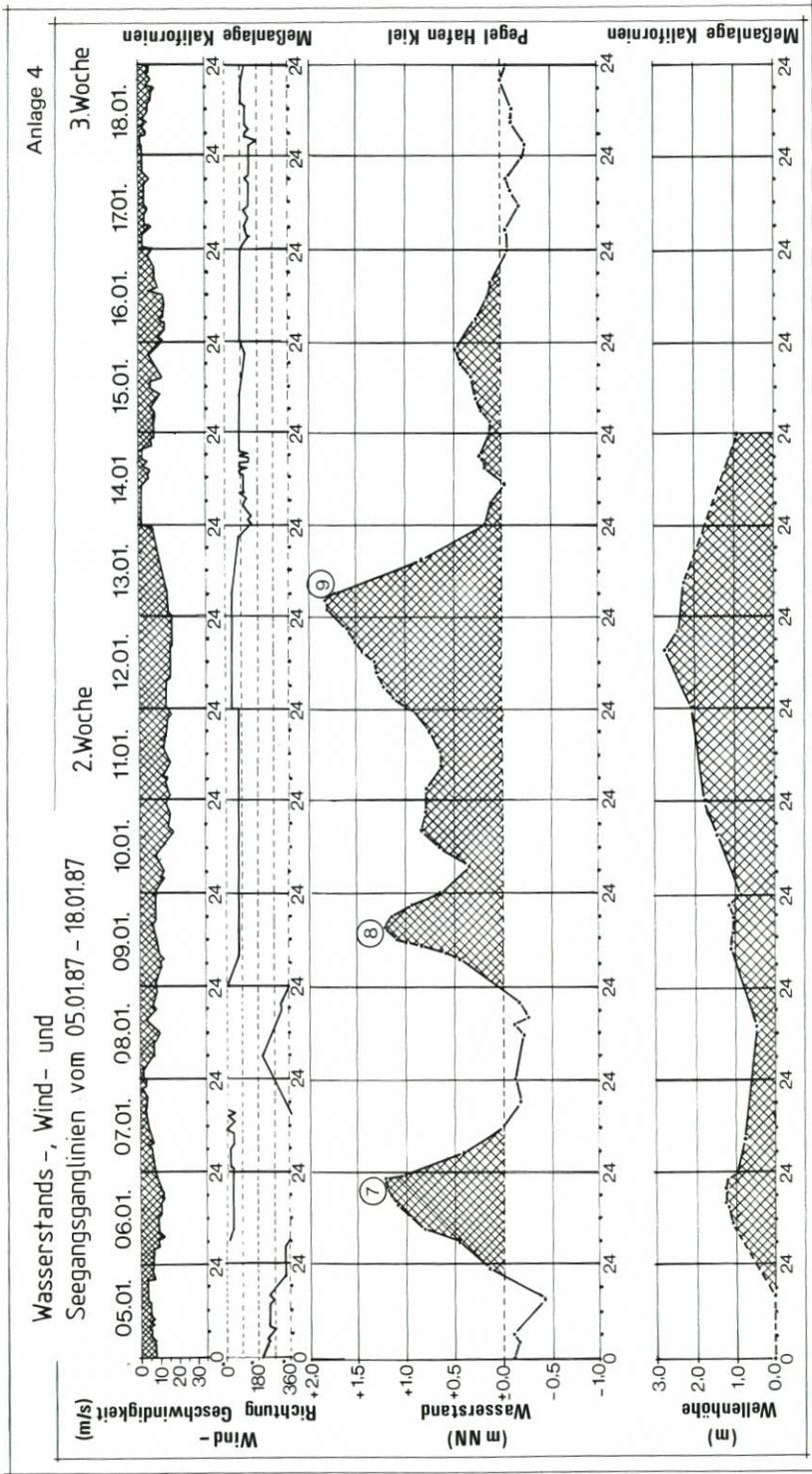


Tabelle 1. Hochwasserereignisse und ihre Häufigkeit analog DIN 4049

Hochwasserereignisse	Häufigkeit N [N = n/a]*	Wasserstandsbereich
erhöhte	2 bis 0,2	NN + 0,90 m bis 1,49 m
höhere	0,2 bis 0,5	NN + 1,50 m bis 1,99 m
höchste	0,05 und kleiner	NN + 2,00 m und größer

\* n = Anzahl der Ereignisse, a = Jahre des Ermittlungszeitraumes

Tabelle 2. Erhöhte Hochwasserereignisse (Fluten) im Winter 1986/87

Ereignis Nr. *	Zeit	Höchstwasserstand [NN m]
1	3. 12. 1986	1,15
2	19. 12. 1986	1,06
3	19. 12. 1986	1,08
4	20. 12. 1986	0,90
5	22. 12. 1986	0,96
6	30. 12. 1986	1,15
7	6. 1. 1987	1,20
8	9. 1. 1987	1,23

Bei den in der Vergangenheit beobachteten Hochwassern an der Ostseeküste haben unterschiedliche meteorologische Faktoren für die sehr unterschiedlich verlaufenden Ganglinien der Wasserstände gesorgt. Tab. 3 zeigt eine Zuordnung der in der Zeit vom 1. 12. 1986 bis 15. 1. 1987 beobachteten Fluten zu ihren wesentlichen meteorologischen Auslösfaktoren.

Tabelle 3. Zuordnung der Fluten zu den meteorologischen Faktoren

Gruppe	meteorologischer Auslösfaktor	Ereignis-Nr. gemäß Tab. 1
I	durch SW-W-Winde verursachter „Rückschwappeneffekt“ ohne wesentliche Verstärkungsfaktoren	1, 6
II	durch N-NO-Winde verursachter „Einstaueffekt“	9
III	durch SW-W-Winde erzeugtes „Rückschwappen“ mit Verstärkungseffekt und zeitweiligem nachlaufenden Einstau durch N-NO-Winde	2, 3, 4, 5, 7, 8

Die in Tab. 3 vorgenommene Zuordnung unterteilt nur in recht grobe Fallgruppen. Auf eine nähere Erläuterung kann hier verzichtet werden, weil diese nur im Rahmen einer Bearbeitung über wesentlich längere Beobachtungszeiträume sinnvoll erscheint und erst dann eine differenziertere Betrachtung zuläßt.

## 4.1.2 Verweilzeiten

Das unterschiedlich lange „Verweilen“ höherer Wasserstände in bestimmten Höhenstufen charakterisiert Sturmfluten und gibt wichtige Anhaltspunkte zur Einordnung gemäß Tab. 3 sowie zur „Belastung“ der Küste.

Außerdem wurde versucht, einzelne Ereignisse aus den Gruppen II und III in Tab. 3 früheren ähnlichen Sturmfluten an der Ostsee gegenüberzustellen, um Ähnlichkeiten und besondere Merkmale darzustellen.

In den Abbildungen 2 bis 5 ist die Verweildauer der Wasserstände über Wasserstandshöhenstufen von jeweils 0,25 m für verschiedene Wasserstandsereignisse dargestellt (nicht zu verwechseln mit dem von FÜHRBÖTER in Heft 65 der Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes 1979 verwendeten Begriff!).

Am Beispiel der Hochwasserereignisse der Gruppe I, die SW-W-Wind aus wenig gedämpften und gedämpften Rückschwappbewegungen (ohne Einstau hervorruhende N-NO-Winde) entstanden, werden die Besonderheiten ihrer Verweilzeiten in Abb. 2 deutlich.

Die Flut vom 30. 12. 1986 zeigt einen nicht durch Westwinde gedämpften „Rückschwappeneffekt“ bei annähernd gleichen Erregungswindgeschwindigkeiten in der schwapperzeugenden Phase. So konnte sich über 21 Stunden ein Wasserstand  $NN \pm 0,00$  m und über 11,5 Stunden ein Wasserstand  $NN + 0,50$  m halten.

Bei Wasserständen über  $NN + 0,75$  m und  $NN + 1,00$  m lagen die Verweilzeiten bei 8 bzw. 3 Stunden.

Die Hochwasserereignisse wie die Flut vom 30. 12. 1986 mit Scheitelhöhen von  $NN + 1,00$  m bis  $1,25$  m treten ein- bis dreimal jährlich auf, verlaufen sehr ähnlich hinsichtlich der Entwicklung ihrer Verweilzeiten und schwingen auch in ähnlicher Form.

Sobald durch länger anhaltende SW- bis W-Winde der auflaufende „Rückschwapp“ gedämpft wird, kommt es zu ebenso typischen Abläufen wie bei Ereignis 1 (Scheitelhöhe des Wasserstandes und Erregungswindgeschwindigkeit wie Ereignis 6).

Die Flut am 3. 12. 1986 wurde hervorgerufen durch westliche Winde mit Windgeschwindigkeiten um 6 bis 7 m/s. Da der Wind aus gleicher Richtung auch noch während der gesamten „Rückschwappphase“ mit 8 bis 10 m/s anhielt, entstand eine Verkürzung der Dauer für Wasserstände über  $NN + 0,00$  m auf rd. 12 Stunden gegenüber dem Ergebnis 6.

Bei Wasserständen über  $NN + 0,75$  m und  $NN + 1,00$  m entstanden bei fast gleichen Wasserstandsscheitelhöhen von Ereignis 1 und 6 zwischen rd. 30 und 40 % längere Verweilzeiten bei Ereignis 6 (siehe auch Anlage 1 und 3).

Hier wird deutlich, wie intensiv die Verweilzeiten gedämpft werden, obwohl die Scheitelhöhe des Ereignisses 6 erreicht wird.

Die Hochwasserereignisse der Gruppe II, vom 8. bis 14. 1. 1987 wurden wesentlich durch den „Einstaueffekt“ des länger anhaltenden Sturmes aus NE verursacht. In Abb. 3 wurde diesen das Sturmflutereignis vom 26. 12. 1978 bis zum 1. 1. 1979 gegenübergestellt. Mit Ausnahme der Verweildauer in den Höhenstufen von  $NN + 1,00$  m bis  $NN + 1,25$  m und  $NN + 1,25$  m bis  $NN + 1,50$  waren sehr ähnliche Verweilzeiten festzustellen, obwohl für die Wintersturmflut 1978/79 im Mittel eine ca. 20 % höhere Windgeschwindigkeit aus östlichen Richtungen gemessen wurde. Die um ca. 25 cm höhere Wasserstandsspitze mit Verweilzeiten von ca. 4 Stunden beim Ereignis 8 und 9 vom 8. bis 14. 1. 1987 wurde von den aus NO gerichteten Winden und den sehr viel gleichmäßiger verlaufenden Windgeschwindigkeiten hervorgerufen.

Ein Vergleich der Wasserstände der Fluten vom 11. bis 13. 1. 1987 (Ereignis 9) mit dem

Ereignis vom 15. 2. 1979 (siehe Abb. 4) zeigt für die Verweildauer der Wasserstände über NN + 0,50 m eine erstaunliche Übereinstimmung.

Die höheren Verweilzeiten vom 15. 2. 1979 über NN + 1,00 m resultieren im wesentlichen aus den im Zeitbereich um den Wasserstandsscheitel bis zu ca. 40% höheren Windgeschwindigkeiten aus östlichen Richtungen bei annähernd gleichen Spitzenwasserständen beider Ereignisse.

Der o. g. Vergleich zeigt auch, daß – bei qualitativ sehr ähnlichem Verlauf der Windganglinie (allerdings im Mittel mit 25 bis 30% geminderten Windgeschwindigkeiten am 13. 1. 1987) – die nordöstliche Windrichtung dieser Flut eine ähnlich lange Verweildauer und den fast gleichen Spitzenwasserstand wie am 15. 2. 1979 verursacht hat.

Der Verlauf der Ereignisse 8 und 9 reiht sich damit hinsichtlich der Ähnlichkeit der Verweilzeiten und Höhe der Wasserstandsscheitel in die Folge der Ostseesturmfluten ein, die etwa alle 10 Jahre zu erwarten sind.

Auf die besondere Bedeutung der Bewertung des Zusammenwirkens von Verweildauer des Wasserstandes und Seegang wird noch eingegangen.

In Abb. 5 ist die Verweildauer der Wasserstände der Gruppe III am Beispiel der Flut am 6. 1. 86 (Ereignis 7) aufgezeigt. Außerdem wurde dieses Ereignis kleinerer Größenordnung dem Extremfall der Sturmflut von 1872 gegenübergestellt.

Die Flut am 6. 1. 86 kann als typisches Jahresereignis der Gruppe III herangezogen werden.

Die Verweilzeiten dieser Gruppe für Wasserstände über NN + 0,75 m bzw. NN + 1,00 m betragen 17 bzw. 11 Stunden. Gegenüber den vergleichbaren Rückschwappereignissen, z. B. bei Nr. 1 oder 6, verlängert der in der Auflaufphase auf N bis NO eindrehende Wind mit Windgeschwindigkeiten von 10 bis 12 m/s über eine Zeit von ca. 20 Stunden durch seine aufstauende Wirkung die Verweilzeiten um das Zwei- bis Vierfache bei den Wasserständen über NN + 0,75 m bzw. NN + 1,00 m.

Bei der in Abb. 5 aufgeführten Gegenüberstellung eines „Jahresnormalereignisses“ (Ereignis 7) der Entstehungsgruppe III mit der schweren Flut von 1872 fällt auch die starke qualitative Ähnlichkeit der Verweildauerentwicklung über die jeweiligen Höhenstufen auf. Dieses ist erklärlich aus der dynamischen Ähnlichkeit der meteorologischen Verursachung beider Ereignisse.

## 4.2 Seegang

### 4.2.1 Allgemeines

Der an der Meßstation Kalifornien aufgezeichnete höhere Seegang trat im wesentlichen bei den Wind- bzw. Wasserstandereignissen der Gruppen II und III auf. Insgesamt sind drei Seegangsphasen bemerkenswert (s. Anl. 1-4):

1. 18.-24. 12. 1986
2. 1.-02. 1. 1987
3. 6.-15. 1. 1987

Hauptsächlich der Seegang in der Zeit vom 18. bis 24. 12. 1986 und vom 6. 1. bis 15. 1. 1987 hatte nicht nur die jahresübliche strandverändernde Wirkung. Strandabschnitte wurden teilweise ausgeräumt. Schutzwerke bereichsweise stark angegriffen. Diese Wirkungen verwundern nicht, weil besonders vom 6. bis 15. 1. 1987 Wellenhöhen und -perioden festgestellt wurden, die denen der Sturmflut vom Jahreswechsel 1978/79 entsprachen, sie sogar teilweise

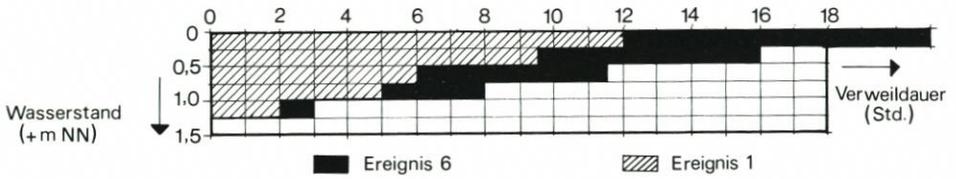


Abb. 2: Verweildauer der aus dem Rückschwappeneffekt (Gruppe I) hervorgerufenen höheren Wasserstände 1 und 6

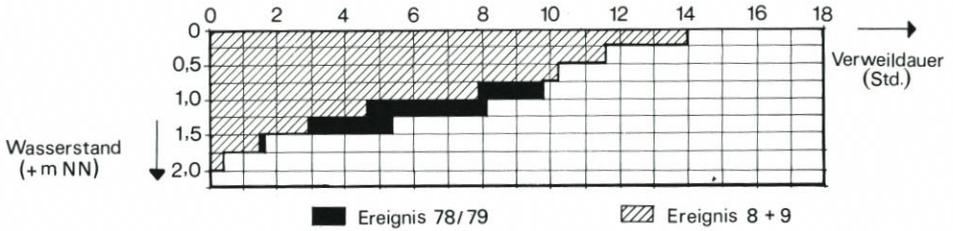


Abb. 3: Verweildauer der aus Einstauwirkungen hervorgerufenen Ereignisse (gem. Gruppe II) 8 und 9 als eine Ereignisfolge bewertet

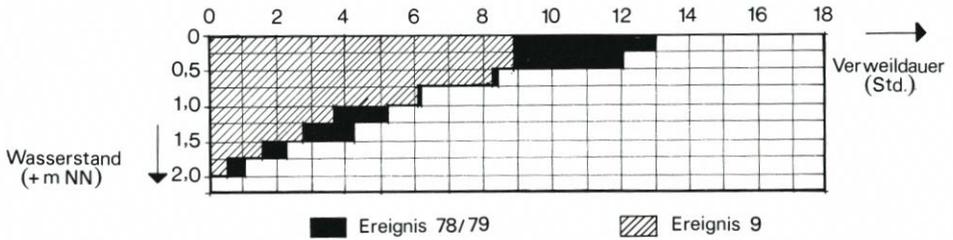


Abb. 4: Verweildauer des aus Einstauwirkungen hervorgerufenen Ereignisses (gem. Gruppe II) 9

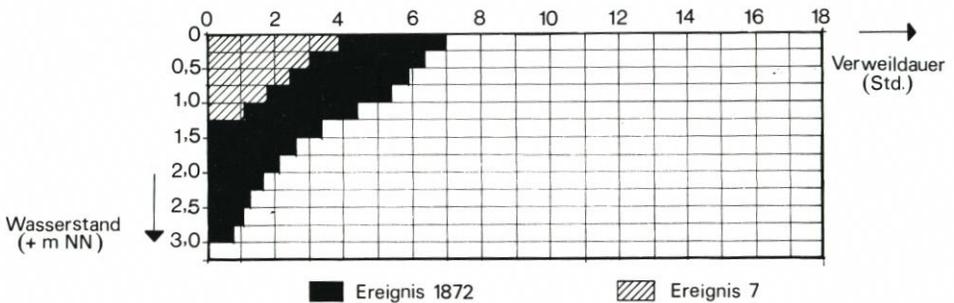


Abb. 5: Verweildauer der Wasserstände in Ereignis 7 zur Sturmflut von 1872

noch übertrafen. Die mit diesem Seegangereignis korrespondierenden Wasserstände haben dafür gesorgt, daß der auflaufende Seegang ziemlich ungehindert zu Zeiten der höheren Wasserstände an scharliegenden Deckwerken brechen konnte.

Die o. a. Ausführungen gelten im wesentlichen für die Küstenbereiche Schwansen, Eckernförder Bucht, Dänischer Wohld sowie Probstei bis Sehlendorf.

## 4.2.2 Wellenhöhen und Ereignisdauer

Zur Beschreibung des Seegangs wurden die aus den Aufzeichnungen errechneten „kennzeichnenden Wellenhöhen“,  $H_s$ , verwendet. In der Zeit vom 18. 12. bis 24. 12. 1986 wurden signifikante Wellenhöhen über 36 Stunden von rd. 1,60 m Höhe gemessen. Dabei erreichte der Seegang maximale Höhen von  $H_{max.} \cong 2,00$  m.

Wellenhöhen dieser Größenordnung sind besonders bei langer Einwirkdauer, so wie im vorliegenden Fall, als stark wirkender strandverändernder Faktor anzusehen.

Unmittelbar nach dieser Sturmperiode konnte keine Strand- und Vorstrandvermessung durchgeführt werden; in einzelnen Strandabschnitten – im Bereich Schönberger Strand zum Beispiel – waren aber deutliche Strandabträge erkennbar.

Dieses Seegangsereignis wurde hinsichtlich der Dauer und Wellenhöhen von dem in der Zeit vom 6. bis 15. 1. 1987 auftretenden Seegang noch übertroffen. Über 100 Stunden liefen Wellen auf mit kennzeichnender Wellenhöhe  $H_s > 1,50$  m. Rund 53 Stunden übertrafen die signifikanten Wellenhöhen den Wert von  $H_s = 2,00$  m.

Zur Zeit der höchsten Windgeschwindigkeit von ca. 18 m/s aus nordöstlichen Richtungen war eine signifikante Wellenhöhe von rd. 2,85 m zu verzeichnen, die maximalen Wellenhöhen erreichten 4,0–4,4 m.

Die festgestellte maximale Wellenhöhe von rd. 4,40 m überschritt auch max. die Wintersturmflut von 1978/79 um knapp einen Meter. Den Vergleich beider Ereignisse – bezogen auf die jeweils auslösenden Windgeschwindigkeiten – zeigt Tab. 4.

Der Vergleich macht deutlich, daß sich die signifikanten Wellenhöhen nicht entsprechen, wenn man ihre Höhen den zugehörigen Windgeschwindigkeiten zuordnet. Die kennzeichnenden Wellenhöhen im Januar 1987 liegen rd. 25 % höher als bei vergleichbaren Windgeschwindigkeiten im Dezember/Januar 1978/79.

Die maximalen Seegangshöhen vergleichbarer Windgeschwindigkeiten überstiegen die 1978/79er Werte um rd. 40 % (s. auch Abb. 6 u. 7).

Tabelle 4. Vergleich der Seegangshöhen der Periode vom 18.–24. 12. 87 mit der Wintersturmflut 1978/79

$H_s$				
auslösende Windgeschwindigkeit				
$V = 10$ m/s m	15 m/s m	18 m/s m	20 m/s m	Jahr
~1,70	1,90	2,15	2,70	1978/79
1,90	2,30	2,80	–	1987
$H_{max.}$				
m	m	m	m	Jahr
2,40	2,65	3,00	3,40	1978/79
~3,00	3,70	4,40	–	1987
$H_{max.} / H_s$				
–	–	–	–	Jahr
1,41	1,40	1,40	1,26	1978/79
~1,60	1,60	1,57	–	1987

Vergleicht man die Windentwicklung sowie die Entwicklung der signifikanten Wellen hinsichtlich ihrer absoluten Höhen und ihrer Ganglinie (s. Abb. 7), so ist eine deutliche Ähnlichkeit in Wellenhöhe, zeitlicher Entwicklung und dem jeweils höchsten  $H_s$  festzustellen.

Die unterschiedlichen Höhen in der Aufbauphase erklären sich aus den zeitweilig wesentlich höheren Windgeschwindigkeiten des 1978/79er Ereignisses.

Abb. 6 und 7 zeigen scheinbar widersprüchliche Ergebnisse hinsichtlich des Zusammenhanges von Windgeschwindigkeit und Seegangshöhe. Der Widerspruch löst sich auf, wenn man die vorherrschenden Windrichtungen beider Ereignisse vergleicht. Sie weichen  $22^\circ$  bis  $45^\circ$  voneinander ab. Wegen der größeren ungestörten Streichlängen für Winde aus nordöstlichen Richtungen, wie sie im Januar 1987 vorherrschten, erklärt sich auch die Ausbildung der windgeschwindigkeitsspezifisch höheren Wellen gegenüber dem Ereignis vom Jahreswechsel 1978/79. Die zum Teil wesentlich höheren Windgeschwindigkeiten 1978/79 der Sturmperiode reichten gerade aus, um in etwa die gleichen absoluten Wellenhöhen aufzubauen, wie sie im Januar 1987 aufliefen.

Dieser Umstand läßt aber noch einen weiteren Schluß zu. Der bei nordöstlichen Winden mit Geschwindigkeiten von 25 bis 30 m/s im Bemessungsfall erzeugbare Seegang wird die im Januar 1987 festgestellten Seegangshöhen noch wesentlich überschreiten. Die für Windgeschwindigkeiten von 25 m/s nach dem Shore Protection Manual 1977 errechneten Wellenkennhöhen wurden bereits von einer um rd. 35 bis 40 % geringeren Windgeschwindigkeit unter vergleichbar langen mittleren Wellenperioden von 4 bis 5 Sekunden aufgebaut bzw. gemessen.

		U-Wind (m/s)			
		10	15	18	20
$H_s$	$\alpha_s = \frac{H_s 78/79}{H_s 87} = \frac{H_s 1}{H_s 2}$	0,89	0,83	0,77	—
$H_{max}$	$\alpha_{max} = \frac{H_{max} 78/79}{H_{max} 87} = \frac{H_{max} 1}{H_{max} 2}$	0,80	0,72	0,68	—

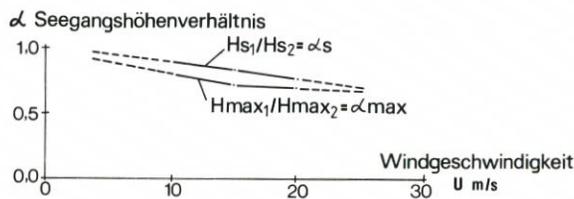
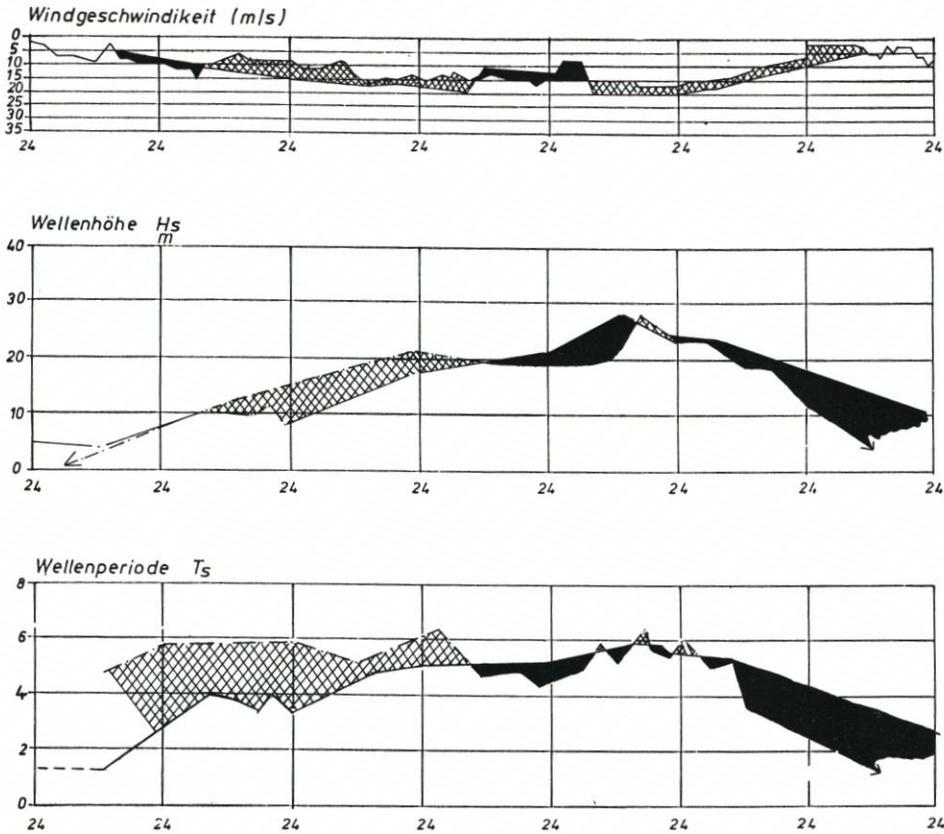


Abb. 6: Verhältnisse der Seegangshöhen vergleichbarer Windgeschwindigkeiten

An Küstenabschnitten mit ähnlich exponierter Lage und Vorstrandmorphologie wie bei der Probstei werden näherungsweise signifikante Wellen von 3,00 bis 3,20 m und  $H_{max}$  von 4,50 bis 4,80 m die tiefergelegenen Riffzonen erreichen.

Scharliegende Deckwerke mit stärker abfallender Vorstrandmorphologie (wie im Bereich Bülk) sind diesem Seegang ohne eine wesentliche wellendämpfende Wirkung des Vorstrandes ausgesetzt. Um einen Meter erhöhte Wasserstände verschieben die Brecherzone und damit den Bereich der höchsten Energieabgabe im Falle Bülk in unmittelbare Nähe des Deckwerkes.



### Ganglinien

- · · · · Dez./Jan. 78/79, vom 27.12.78 0<sup>00</sup> Uhr bis 02.01.79 24<sup>00</sup> Uhr  
 ——— Jan. 87 , vom 08.01.87 0<sup>00</sup> Uhr bis 14.01.87 24<sup>00</sup> Uhr

Abb. 7: Vergleich der Seegangshöhen von Jan. 1987 mit denen vom Dez./Jan. 1978/79

Daher sind hier wohl die starken Schäden am Deckwerk durch die Sturmfluten vom Januar 1987 zu erklären.

Im Bereich der Probstei wurde zur Zeit der höheren Wasserstände (ca. NN + 1,30 m) am 12. 1. 1987 der Seegang von ca. 3,00 bis 3,50 m Höhe unmittelbar im Bereich der Bühnenköpfe bzw. innerhalb des Bühnenfeldes – ca. 10 bis 25 m vom Ufer entfernt – gebrochen (s. Abb. 8).

### 4.2.3 Wellenperioden

Für die Zeit vom 18. bis 24. 12. 1986 ließen sich signifikante Wellenperioden bis zu  $T_s = 4,30$  Sekunden über rd. 100 Stunden feststellen. In Verbindung mit den gemessenen Seegangshöhen von  $H_s = 1,60$  m kann hier auch aus der Beobachtung vor Ort festgestellt werden, daß diese langanhaltende Sturmflut für einzelne Flach- und Kliffküstenabschnitte wesentliche ausräumende Wirkung hatte. Derartige Ereignisse mit einem wohl weitgehend ausgereiften

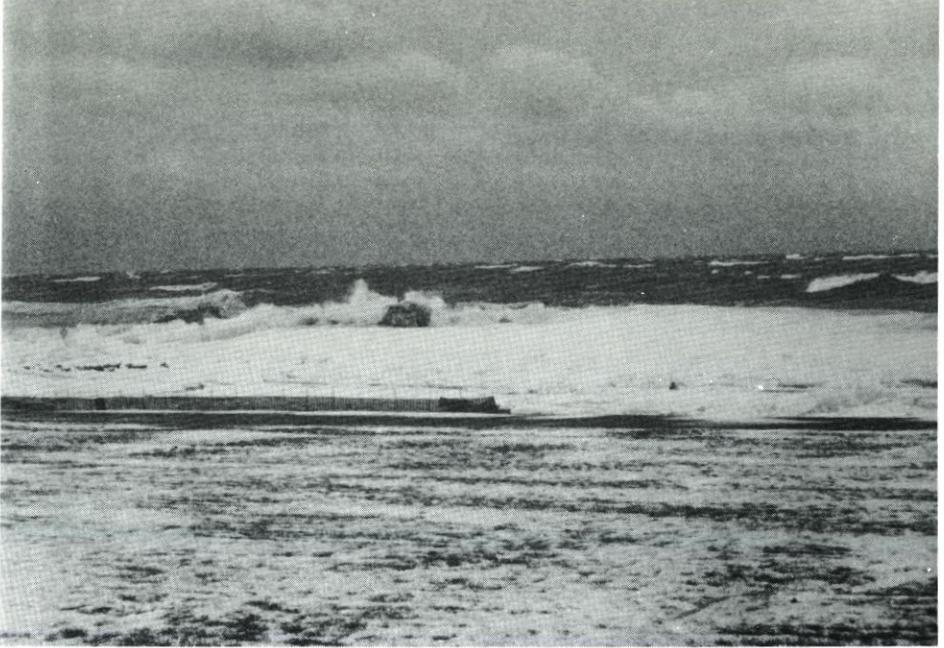


Abb. 8

Seegang (Windgeschwindigkeiten um 8 m/s) belasten jährlich häufiger die Küste und können als eine Art jährliche „Standardbelastung“ bezeichnet werden.

Eine nähere Untersuchung über die Häufigkeit ihres Auftretens und ihre Einwirkzeit erscheint notwendig, damit künftig mehr Erkenntnisse auf dem Gebiet der strandverändernden Faktoren gewonnen werden; sie ist aber im Rahmen dieses Berichtes nicht möglich.

Für die Sturmperiode vom 6. bis 15. 1. 1987 sind die signifikanten Wellenperioden in Abb. 11 dargestellt. Zur Zeit des höchsten Seeganges traten die längsten Wellenperioden mit  $T_s = \text{rd. } 6$  Sekunden auf. Damit folgten die signifikanten Wellenperioden fast zeitsynchron dem Aufbau der Wellenhöhen bzw. auch der zugehörigen Windentwicklung.

Wegen der insgesamt ausgeglichener verlaufenden Windganglinie verläuft auch die Kurve der signifikanten Wellenperioden im Januar 1987 ausgeglichener als bei der Sturmflut von 1978/79 (zu beachten ist dabei die über ca. 20 Stunden um bis zu 15 m/s abfallende Windgeschwindigkeit).

Beim Vergleich beider Ereignisse (siehe Abb. 7) fällt allerdings die verhältnismäßig längere Wellenperiode in der Aufbauphase des Sturmereignisses 1978/79 auf. Diese beobachteten Wellenperioden resultieren aus den länger anhaltenden Ostwinden (NO 1987) und deuten aufgrund der sehr viel längeren Streichlängen und der größeren Windwirkdauer auf einen hinsichtlich der Wellenperiode weitgehend ausgereiften Seegang hin.

Ähnlich wie bei den festgestellten Seegangshöhen im Januar 1987 wurde auch bei den beobachteten Seegangperioden bei NO-Winden um 18 m/s eine höhere Wellenperiode festgestellt, als sie sich nach den Berechnungen gemäß Shore Protection Manual 1977 bei Windgeschwindigkeiten von 20 m/s ermitteln läßt.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß Seegangsuntersuchungen bei Sturmfluten dieser Größenordnung wichtig und fortzuführen sind, damit besser abgesicherte Ansätze des Bemessungsseeganges gewonnen werden.

#### 4.2.4 Belastungsrichtung des Seeganges

Während der Sturmperiode vom 18. bis 24. 12. 1986 traf Seegang aus nordöstlicher Richtung auf die Küstenbereiche von etwa Dänisch-Nienhof bis Fehmarn in der oben dargestellten Größenordnung.

Während die Seegangenergie durch „Beugungseffekte“ in den Bereichen

- Dänisch-Nienhof bis Stohl
- Stakendorf bis Sehlendorf
- Schwansen
- Eckernförder Bucht
- Kieler Förde

mäßig bis stark abgemindert wurde, konnte sie sich fast ohne Abminderung durch „Beugung“ in den flacher gelegenen Vorstrandbereichen (Höhenlage der Vorstrandbereiche ca. NN 1 m bis 1,50 m) auswirken, und zwar in den Abschnitten

- Surendorf bis Dänisch-Nienhof
- Laboe bis etwa Stakendorf
- Sehlendorf bis etwa Heiligenhafen
- weite Bereiche der Nordküste Fehmarns.

Im Bereich der Probstei wurde die ausräumende Wirkung auf Strand und Vorstrand während dieses Ereignisses unmittelbar beobachtet.

Zwischen dem 6. und dem 15. 1. 1987 traf ein wesentlich stärkerer Seegang aus Nordost auf die Küste. Aufgrund der Richtung der einlaufenden Wellen konnte dieser Seegang (Größenordnung im Bereich der Probstei s. Abschnitt 4.2.2 und 4.2.3) fast ohne wesentliche Energieverluste durch z. B. Beugungseffekte orthogonal die Küstenabschnitte

- Schleimünde bis Gelting
  - Surendorf bis Bülk
  - Schilksee/Strände
  - Laboe bis Sehlendorf
  - Nordküste Fehmarn
  - Großenbrode bis Dahme
  - innere Lübecker Bucht
- erreichen.

Aufgrund des stärkeren Seegangs, aber auch wegen des höher aufsteigenden Wasserstandes während dieser Zeit brachen die Wellen nicht nur über den ähnlich hoch gelegenen Vorstrand(Riff-)bereichen, sondern gelangten auch z. B. in Bereiche mit tiefergelegenen Vorstränden, wie bei Strände, bis kurz vor die Uferbefestigungen und brandeten dort aus. Im Bereich der Probstei vor Kalifornien brach der Seegang an den T-Buhnen und im inneren Bühnenfeld.

### 4.3 Eisbildung

Die Seegangenergie gelangte in der Sturmperiode vom 6. bis 14. 1. 1987 in einigen Bereichen nicht zu ihrer vollen Wirkung, weil z. B. in den Bühnenfeldern der Probstei ab dem 10. 1. 1987 eine sich verstärkende Eisbildung zu beobachten war, trotz des auflaufenden Seeganges.

Während der Zeiten des stärksten Seeganges dämpfte eine bis ca. 40 m vor die Uferlinie reichende Grieseisschicht den Seegang derart, daß er trotz 2-3 m hoher Wellen ohne Wirkung auf den Strand und die Deckwerke blieb. Dieser Vorgang wurde am 12. 1. 1987 mit einem

Videogerät vom Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein aufgezeichnet. Eine ähnliche Wirkung konnte bei dieser Sturmflut an vielen Küstenabschnitten, z. B. von Laboe bis Sehlendorf, beobachtet werden.

Nur wenige Bereiche lagen nicht im Schutz des seegangsdämpfenden Eises. Dieses traf für Teile der Schwansener Küste, für die Südseite der Eckernförder Bucht bis Strande oder die Küste südlich von Schilksee zu und erklärt auch die starken Beschädigungen am Deckwerk vor der Klärwerkszufahrt in Bülk, Gemeinde Strande.

Die an der Temperaturmeßstelle der Wasser- und Schiffsverkehrsverwaltung in Travemünde festgestellten Wassertemperaturwerte unterschreiten die Null-Grad-Grenze am 10. 1. 1987 erstmalig und bleiben den ganzen Januar über unter  $0^{\circ}\text{C}$  (s. Abb. 9). Damit deckt sich die Beobachtung zur Eisbildung mit den o. a. Temperaturangaben.

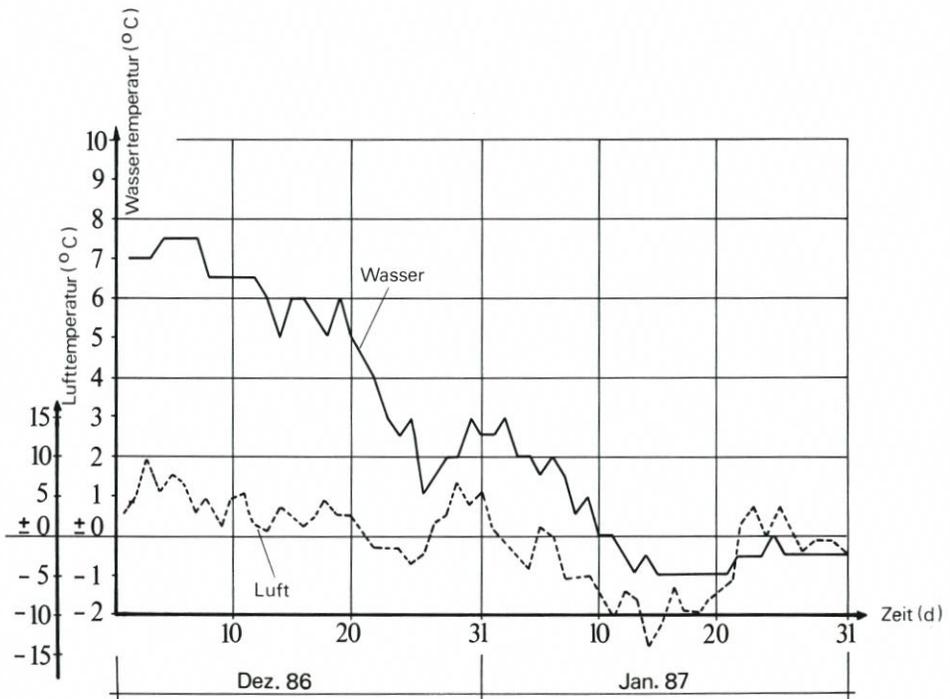


Abb. 9: Temperaturmessung an der Meßstelle Travemünde. Meßtiefe: 0,5 m unter dem jeweiligen WSP