

# Windstauentwicklung in dem Tiefwasserbereich der südöstlichen Nordsee bei Sturmflutwetterlage

Von HORST LASSEN, WINFRIED SIEFERT<sup>†</sup> u. GABRIELE GÖNNERT

## Zusammenfassung

In der folgenden Arbeit werden zunächst allgemeine Kriterien zur Bewertung stündlich erfasster Gezeitenbewegungen auf der Forschungsplattform Nordsee (FPN) durch die Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik diskutiert. Die nach einfachen Berechnungsmethoden aufbereiteten täglichen Gezeiten sind unter Einbeziehung des mittleren Meeresspiegels (MSL) auf PN = NN -5 m beschickt und in monatlichen Wasserstandslisten zusammengefasst worden. Eine Untersuchung hinsichtlich Aussagefähigkeit und Zuverlässigkeit der berechneten Scheitelwerte über eine Differenzanalyse mit zeitgleichen Daten des Pegels Helgoland lieferte für den mittleren Tidebereich eine hinreichende Übereinstimmung von Zeit- und Höhenabweichungen. Für Gezeitenbetrachtungen erwiesen sich die abgeleiteten Gezeiten als prinzipiell geeignet.

Anschließend wird anhand von 10 Sturmtiden an der FPN aus dem Zeitraum 1979 bis 1992 die Windstauentwicklung im Zusammenhang mit den Ergebnissen aus dem KFKI-Projekt „Windstauanalysen in der Nord- und Ostsee“ (GÖNNERT, 1999) analysiert. Damit ist es möglich während einer Sturmflut die zeitliche Entwicklung von Windstaustrukturen in der südöstlichen Nordsee von Tiefwasserbereich bis in den Flachwasserbereich des Küstenvorfeldes zu erstellen.

## Summary

Hourly water surface elevations recorded at the Research Platform North Sea (FPN) located in the centre of the German Bight of the North Sea were processed in order to define tidal parameters and the Mean Sea Level (MSL). Correlation with data recorded at the gauge 'Heligoland' showed a satisfactory match. Data are suited for a comprehensive tidal analysis.

Based on this, 10 storm surges recorded between 1979 and 1992 at the gauges 'Heligoland' and 'Cuxhaven' were analyzed using findings from the KFKI-project 'Analysis of Wind Set-Up in the North and Baltic Sea' (GÖNNERT, 1999). Results lead to a definition of wind set-up evolution in the Southern North Sea between deep and shallow water.

## Inhalt

1. Einführung .....	88
2. Datenanalyse .....	88
2.1 Pegelnull, mittlerer Meeresspiegel .....	101
3. Windstauverhältnisse im Meeresbereich .....	104
3.1 Windverhältnisse .....	104
3.2 Seegangverhältnisse .....	105
3.3 Windstau im Tiefwasserbereich der südöstlichen Nordsee .....	119
3.4 Auswertung .....	120
4. Zusammenfassung der Ergebnisse .....	124
5. Danksagung .....	124
6. Schriftenverzeichnis .....	124

## 1. Einführung

Im Mittelpunkt der Ausführungen zum KFKI-Projekt „Tideablauf und Meeresspiegel im Bereich der südlichen Nordseeamphidromie“ sind aus den umfangreichen Gezeitenbeobachtungen von Hochseepegeln und der Forschungsplattform Nordsee (FPN) aktuelle Gesetzmäßigkeiten zur Gezeitendynamik für den Tiefwasserbereich der südlichen Nordsee entwickelt und in Abbildungen dargestellt worden (LASSEN u. SIEFERT, 1996). Die Analyse führte durch die Strukturierung des Hochseepegelnetzes zu einer wesentlichen Erweiterung bisher vorliegender Erkenntnisse zum Gezeitenablauf in dem Seegebiet. Es stellte sich aber auch heraus, dass das vorhandene Datenmaterial der Hochseepegel nicht ausreichte, um eine zuverlässige Sturmflut- bzw. Windstauanalyse für diesen Bereich zu erstellen. Sie ist daher zu diesem Zeitpunkt nicht in Betracht gezogen worden. Hauptprobleme bei der Realisierung von Windstauanalysen sind die teilweise unüberwindlichen Hürden bei der Auswertung der erforderlichen Daten, die u.a. durch unzureichende Erfassung von Wasserständen, der Meteorologie oder durch Pegelausfall bedingt sind. Ähnliche Schwierigkeiten machten sich auch bei der Beschaffung von Sturmflutdaten der FPN bemerkbar. Laut Auskunft des ehemaligen Betreibers der FPN, der „Reedereigemeinschaft Forschungsschiffahrt GmbH, Bremen“, sind die jährlichen Aufzeichnungen des Analogpegels mit Ausnahme der Jahre 1987 und 1988 als unwiderbringlich verloren anzusehen. Nach Außerdienststellung der FPN sind die Tideaufzeichnungen vernichtet worden, da seitens angesprochener Verwaltungen kein Bedarf an dem Datenmaterial bestand. Gleichzeitig gab es aber auch den Hinweis, dass bei der Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik (FBWG) Pegeldata der FPN von 1979 bis 1992 vorhanden sind. Im Rahmen einer Dateneinsicht konnte festgestellt werden, dass in diesem umfangreichen Datenmaterial auch Informationen über Sturmtiden enthalten sind, die es sinnvoll erschienen ließen, unter diesen Voraussetzungen für den Tiefwasserbereich der südöstlichen Nordsee Windstaukurven abzuleiten, um diese mit den entsprechenden von Helgoland und Cuxhaven zu vergleichen. Aus der Analyse zeitgleicher Veränderungen der örtlichen Windstaustrukturen zu den entsprechenden mittleren Tidekurven lässt sich der Windstauverlauf vom freien Meer (FPN) über Helgoland bis zur Küste (Cuxhaven) mit Auswirkungen zum Sturmflutgeschehen darstellen. Diese Pegel wurden ausgewählt, da sie den Übergang vom Tiefwasserbereich zur Küste bilden und auf einer Linie bei nordwestlichen Winden liegen. Von Interesse ist diese Entwicklung, da der Windstau abhängig ist von der Wassertiefe (TOMCZAK, 1952). Mit abnehmender Wassertiefe steilt sich der Windstau auf und wird höher.

Da im KFKI-Projekt „Windstauanalysen in Nord- und Ostsee“ Sturmfluten und deren Windsituation von Helgoland und Cuxhaven analysiert wurden, erfolgte die vorliegende Arbeit im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes. Darauf basieren auch Daten und Definitionen. Anzumerken bleibt, dass die FBWG ihre Pegelprotokolle aus den Jahren 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1987, 1988, 1990, 1991 und 1992 freundlicherweise zur Verfügung stellte.

## 2. Datenanalyse

Die täglichen Pegelprotokolle der FBWG enthalten neben Angaben stündlicher Wasserstände auch die informativen meteorologischen Daten mit Hinweisen auf allgemeine Wetterangaben (Tab. 1a u. 1b). In den Protokollen fehlen aber Angaben zu den Scheitelwerten der Gezeit wie Eintrittszeit und Scheitelhöhe. Das Problem der vorliegenden Arbeit lag so-

Tab. 1a: Wetter- und Pegeldaten der Forschungsplattform Nordsee (Abschrift aus Protokoll)

Uhrzeit	Wind		Wellen		Wassertemp.		Luft		Sichtw.	Baro	Pegel	Bedeckg.	Allgemeine Wetterangaben und Bemerkungen	
	Richtung (°)	Geschw. (Kn)	H1/3 (m)	Hmax (m)	Periode (sec)	°C	-19 m	Temp.						Feuchte
01	280	33	2,9	4,5	5,7	5,4	5,2	7,1	100	6	1007,2	2,26	8	
02	280	34	3,9	5,6	6,7	5,4	5,2	6,9	100	5	1007,0	2,25	8	Sprühregen
03	290	38	3,3	5,1	6,3	5,4	5,2	7,1	100	6	1006,5	2,11	8	
04	290	37	3,4	5,3	6,3	5,4	5,2	7,3	100	6	1006,2	1,97	8	
05	290	39	4,0	6,5	7,0	5,4	5,2	7,4	100	6	1006,2	1,75	8	
06	280	37	3,7	5,3	7,1	5,4	5,2	7,5	100	6	1006,6	1,43	8	Böen 48 Kn
07	290	36	3,8	7,1	7,0	5,3	5,2	7,4	100	6	1006,8	1,17	7	Böen 46 Kn
08	280	37	4,2	6,3	7,2	5,3	5,2	7,6	100	8	1007,2	1,08	7	
09	280	36	4,4	7,9	7,5	5,3	5,2	7,3	100	10	1007,2	1,10	8	
10	280	36	3,5	5,3	6,5	5,2	5,2	7,2	100	8	1007,5	1,35	7	
11	280	37	3,7	5,4	6,5	5,3	5,2	7,1	100	8	1007,7	1,53	8	
12	280	34	3,7	5,6	6,8	5,3	5,3	6,8	100	6	1007,1	1,75	8	
13	280	34	3,7	5,6	6,4	5,4	5,3	6,7	100	8	1007,7	2,03	8	
14	280	32	3,6	5,1	6,5	5,3	5,2	6,7	100	10	1006,8	2,10	7	
15	280	33	3,8	5,8	6,5	5,3	5,2	6,9	100	10	1006,4	2,05	8	
16	270	32	3,4	5,1	6,9	5,3	5,2	6,7	99	10	1006,4	1,87	8	
17	260	32	3,4	5,3	6,4	5,3	5,2	6,5	99	10	1005,9	1,65	8	
18	260	35	3,1	4,6	6,2	5,3	5,2	6,6	100	8	1005,6	1,43	8	
19	270	33	3,3	6,0	6,7	5,3	5,2	6,9	99	10	1005,2	1,18	8	
20	250	34	3,8	6,5	6,5	5,3	5,2	6,7	99	8	1004,3	1,05	8	Böen 46 Kn
21	250	35	3,5	5,2	6,2	5,2	5,2	6,8	99	8	1003,3	1,20	8	
22	250	36	3,8	7,7	6,8	5,2	5,2	6,7	99	8	1002,3	1,44	8	
23	250	41	3,7	5,2	6,9	5,3	5,2	6,8	99	8	1000,4	1,67	8	Sturmböen 48 Kn
24	240	42	3,9	7,9	6,1	5,3	5,2	6,8	99	6	998,7	1,99	8	Sturmböen 50 Kn

Tab. 1b: Wetter- und Pegeldaten der Forschungsplattform Nordsee (Abschrift aus Protokoll)

Uhrzeit	Wind Richtung (°)	Geschw. (Kn)	H1/3 (m)	Wellen		Wassertemp.		Luft Temp. °C	Feuchte %	Sichtw. sm	Baro Pascal	Pegel ü. örtl. SKN m	Bedeckg.	Allgemeine Wetterangaben und Bemerkungen
				Hmax (m)	Periode (sec)	°C -4,5 m	°C -19 m							
01	250	1	3,3	5,4	6,6	7,6	6,5	6,3	95	10	1003,8	1,91	3	Böen 40 Kn
02	250	30	3,2	5,4	6,7	7,6	6,5	6,1	93	8	1003,7	2,18	6	Böen 38 Kn
03	240	32	3,3	5,6	6,7	7,6	6,5	5,9	95	10	1004,2	2,22	7	Böen 38 Kn
04	250	31	3,2	5,2	7,1	7,6	6,5	5,9	96	10	1004,7	2,05	7	Böen 38 Kn
05	250	32	3,5	5,6	7,4	7,6	6,5	5,9	90	10	1005,0	1,97	6	Böen 40 Kn
06	240	33	3,6	6,0	7,4	7,5	6,5	5,7	88	10	1004,4	1,84	3	Böen 42 Kn
07	230	33	4,0	6,6	8,0	7,5	6,5	5,9	91	10	1003,4	1,43	3	Böen 44 Kn
08	220	36	3,8	6,0	7,8	7,5	6,5	5,8	83	12	1002,7	1,05	4	Böen 44 Kn
09	200	33	3,7	5,7	7,6	7,5	6,5	5,0	100	8	1002,3	0,80	6	Böen 46 Kn
10	210	37	3,8	6,5	7,7	7,5	6,5	4,9	100	8	1000,8	0,69	8	Böen 48 Kn
11	200	39	3,6	5,7	7,4	7,5	6,5	4,2	100	6	999,5	0,96	8	Böen 50 Kn
12	190	41	3,7	6,0	7,2	7,5	6,5	4,5	94	5	997,6	1,13	7	Böen 50 Kn
13	190	47	3,9	6,4	7,0	7,6	6,5	4,7	100	5	995,3	1,36	8	Schauer/Böen 54 Kn
14	190	45	3,9	6,1	7,2	7,7	6,5	4,2	100	3	993,2	1,59	8	Regen/diesig/Böen 64 Kn
15	190	50	4,2	7,3	7,1	7,7	6,5	4,6	97	3	990,9	1,85	8	Regen/diesig/Böen 66 Kn
16	200	45	4,6	8,2	7,8	7,7	6,5	5,6	100	5	989,9	1,92	8	Regen/diesig/Böen 62 Kn
17	210	36	5,1	7,8	7,3	7,7	6,5	6,5	100	6	989,6	1,68	7	Regen/diesig/Böen 54 Kn
18	210	37	4,9	7,5	8,0	7,7	6,5	6,8	100	6	989,1	1,57	7	Regen/diesig/Böen 48 Kn
19	250	38	4,2	7,6	7,3	7,7	6,5	2,7	100	5	988,7	1,21	8	n. Graupelschauer Wetterleuchten 54 Kn
20	210	29	4,0	7,2	7,6	7,7	6,4	6,3	95	8	987,3	0,78	4	Böen 42 Kn
21	210	31	3,4	6,4	7,2	7,6	6,4	6,5	98	8	986,3	0,62	4	Böen 42 Kn
22	220	34	3,3	4,9	6,9	7,6	6,4	6,9	85	8	986,1	0,75	6	Böen 50 Kn
23	210	36	3,6	5,9	7,0	7,6	6,4	6,4	93	8	985,2	0,90	4	Böen 49 Kn
24	210	33	3,8	6,6	7,3	7,6	6,4	5,9	98	8	985,0	1,18	3	Böen 50 Kn

mit vorerst im Wesentlichen in der Bestimmung dieser Werte. Aus den Veränderungen stündlicher Wasserstände um den zu erwartenden Scheitelintritt konnten Höhen und Eintrittszeiten nach dem Schätzverfahren von GUYON mit annehmbarer Genauigkeit hergeleitet werden. Eine schlüssige Formelableitung wird um 1900 in den Comptes de l'Académie des Sciences behandelt.

$$T = T_2 + \frac{a-b}{a+b} \times 30$$

T = gesuchte Eintrittszeit, Verbesserung in min.

$$H = H_2 + 1/8 \frac{(a-b)^2}{a+b}$$

H = gesuchte Höhe, Verbesserung in cm

$$H_2 - H_1 = a \quad H_2 - H_3 = b$$

$$H_1 < H_2 > H_3 \text{ für Thw}$$

$$H_1 > H_2 < H_3 \text{ für Tnw}$$

$H_1, H_2, H_3$  sind stündliche Wasserstände in cm vor, um und nach dem genäherten Scheitel.  
 $T_2$  = Zeitstunde vor oder nach dem genäherten Scheitelintritt.

Die Zuverlässigkeit der nach der Näherungsformel berechneten Scheitelwerte hängt von der Messgenauigkeit stündlicher Wasserstände ab. Vorausgehend war daher zu beurteilen, ob die stündlichen Pegelraten die Tidecharakteristik für den Tiefwasserbereich der südöstlichen Nordsee mit ausreichender Genauigkeit wiedergeben. Die Pegelunterlagen enthalten hierzu keine Vorinformationen. Da in diesem Fall strenge Kriterien für Zuverlässigkeitsaussagen nur schwer zu erhalten sind, musste nach anderen Wertungen zum Nachweis von Aussagefähigkeit und Repräsentanz vorliegender Tidedaten gesucht werden. Die Herleitung der nötigen Anhaltspunkte für diese Analyse erfolgte daher über eine formale Analogie. Schätzverfahren, Gegenüberstellungen von Tidedaten und funktionale Beziehungen der Wasserstände zu denen des Vergleichspegels Helgoland lieferten einen Überblick über die Güte der Pegelraten FBWG. Zur fundierten Beurteilung der nach der Näherungsformel abgeleiteten Scheitelwerte mussten zuvor aus der vorhandenen Datenfülle stündlicher Wasserstände etwa 300 Tidekurven reproduziert und graphisch dargestellt werden. Aus diesen Tidekurven sind die Scheitelwerte der betr. Tide optisch bestimmt worden. Ein Vergleich der nach unterschiedlichen Systemen ermittelten Scheitelwerte ermöglichte eine Aussage über deren Zuverlässigkeit. Die graphischen Darstellungen der Tidekurven lieferten zusätzlich die für die Konstruktion einer mittleren Tidekurve benötigten halbstündigen Tidewerte von Tnw über Thw bis Tnw. Die mittleren Tidekurven sind ein bekanntes Hilfsmittel, um Veränderungen im örtlichen Gezeitenablauf betrachteter Kalenderjahre zu erkennen. (Die Abb. 1a bis 1g liefern einen Überblick über die entwickelten Tideverhältnisse aus stündlichen Wasserständen. Die Abb. 2a bis 2k geben eine Darstellung der mittleren Tideverhältnisse für verschiedene Jahre aus dem Analysezeitraum). Zusammenfassend ist als Ergebnis dieser Zuverlässigkeitsanalyse festzuhalten:

1. In den graphischen Darstellungen der Tidekurven sind, bis auf wenige Ausnahmen, keine Instabilitäten erkennbar. Die entwickelten mittleren Tidekurven zeigen in den verschiedenen Jahren eine befriedigende Übereinstimmung. Die täglichen Tidekurven der FPN ha-

ben eine ausgeprägte Ähnlichkeit mit den entsprechenden Tidekurven des Bezugspegels Helgoland.

2. Die nach unterschiedlichen Methoden bestimmten Gezeitenparameter weisen eine gute Übereinstimmung auf. Beide Berechnungsarten kommen zu fast gleichen Ergebnissen. Die Eintrittszeiten differieren um bis zu 10 min und die Scheitelhöhen um  $\pm 2$  cm.
3. Der direkte Vergleich der beobachteten Gezeiten des Analogpegels (1987, 1988 und 1992) mit denen des Hochseepegels auf dem Fundament der FPN (1992) vermittelt letztlich auch die Übereinstimmung zwischen den unabhängig voneinander bestimmten Eintrittszeiten und Höhen. Damit bestätigt sich die gute Auflösungsgenauigkeit berechneter Tiden nach dem Näherungsverfahren von GUYON. Bei der weiteren Vorgehensweise zur Ableitung der Scheitelwerte für 14 000 Tiden aus der vorliegenden Datenfülle mit Hilfe des Näherungsverfahrens konnte also davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse optimale Aussagen für tägliche Wasserstände liefern. Nach Überprüfung der errechneten Tiden durch relevante Zeit- und Höhenabweichungen zum Bezugspegel Helgoland sind die Scheitelhöhen auf örtliches Springtideniedrigwasser des Analogpegels (EGGE, 1979) beschickt und mit den Eintrittszeiten in monatliche Wasserstandslisten als vorläufige Daten übernommen worden.

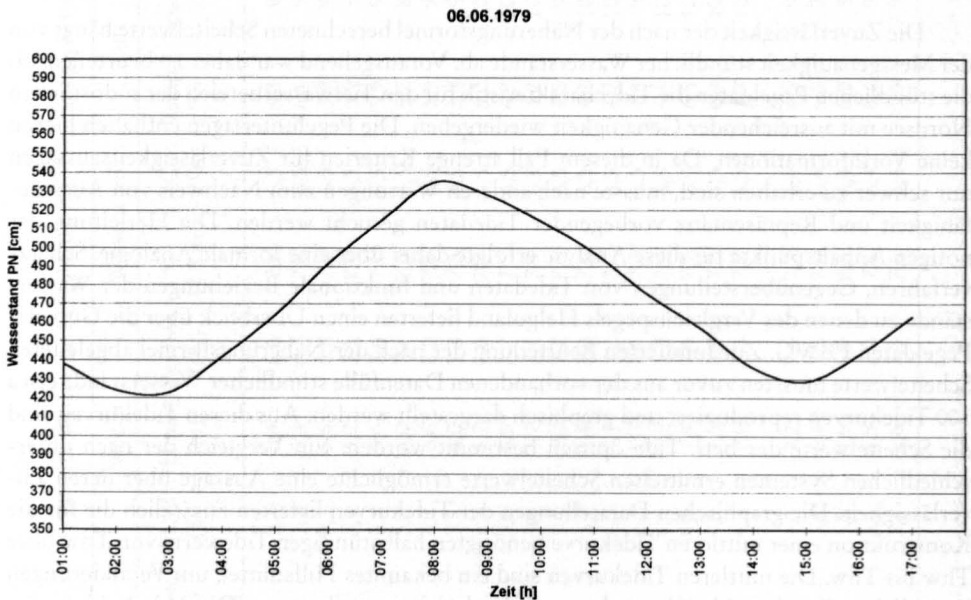


Abb. 1a: Die Tidekurve vom 6.6.1979 an der Forschungsplattform Nordsee

28.-29.06.1979

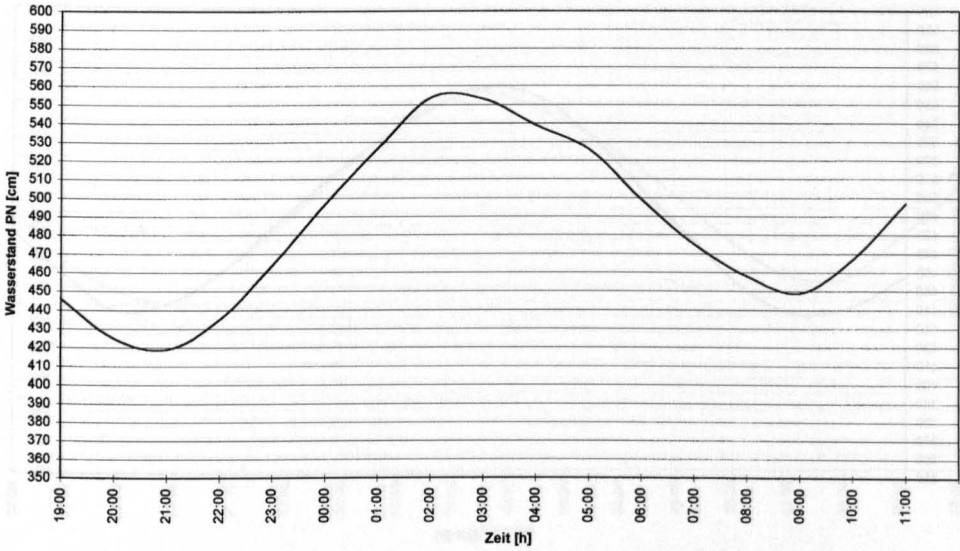


Abb. 1b: Die Tidekurve vom 28.-29.6.1979 an der Forschungsplattform Nordsee

07.05.1980

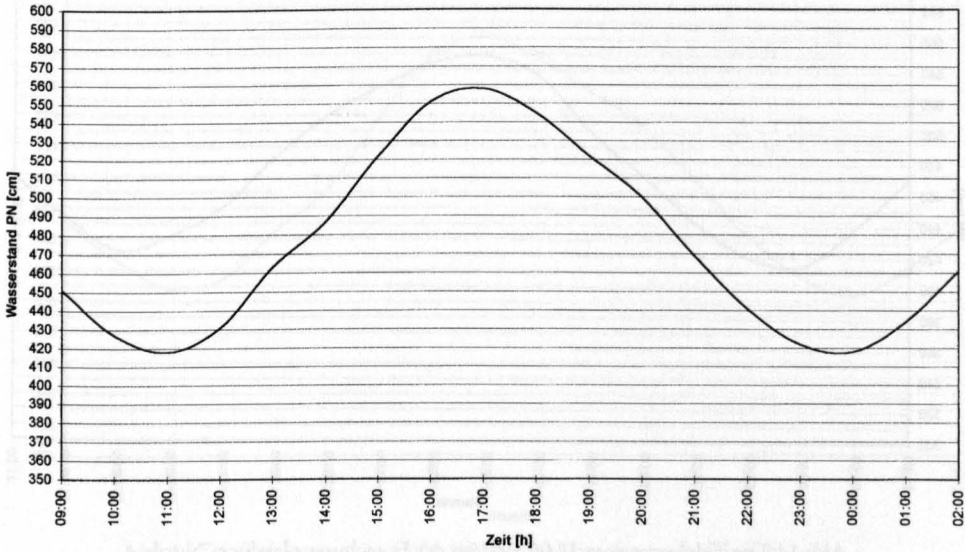


Abb. 1c: Die Tidekurve vom 7.05.1980 an der Forschungsplattform Nordsee

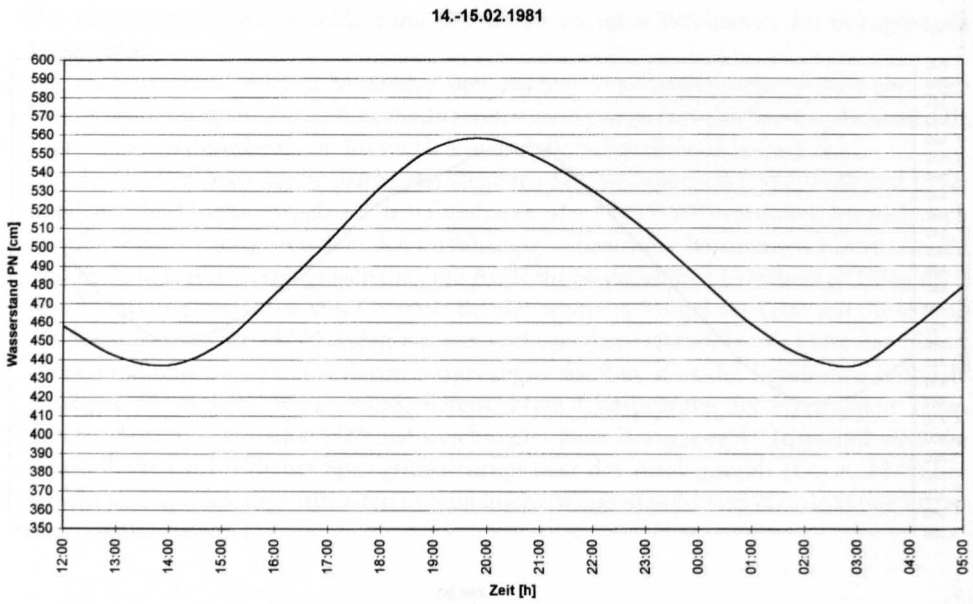


Abb 1d: Die Tidekurve vom 14. - 15.2.1981 an der Forschungsplattform Nordsee

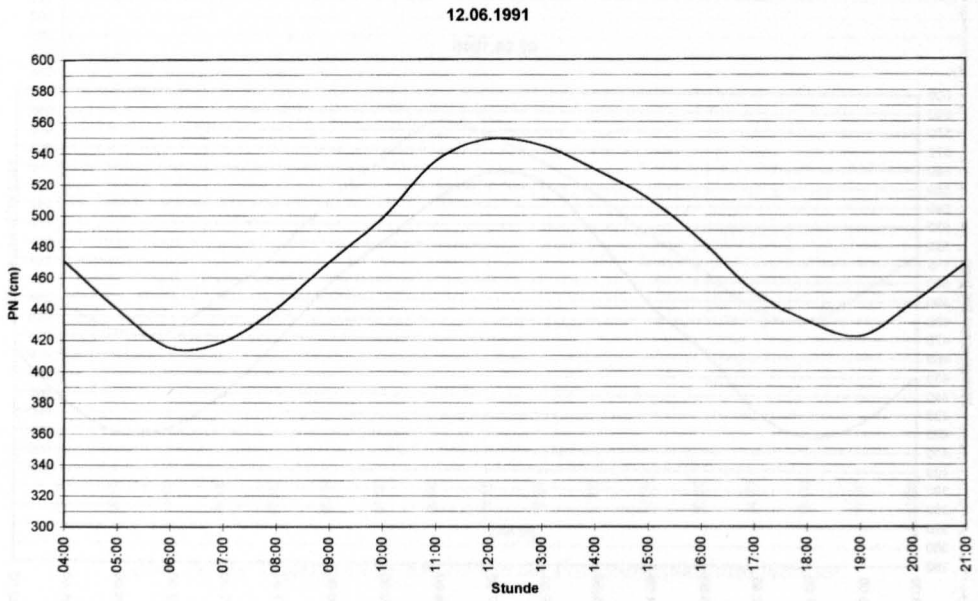


Abb 1e: Die Tidekurve vom 12.06.1991 an der Forschungsplattform Nordsee



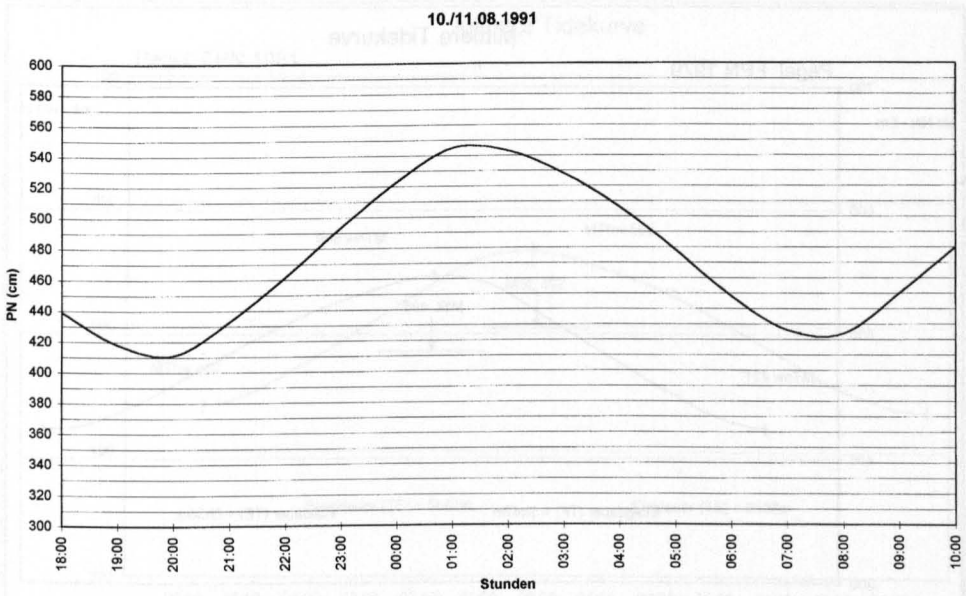


Abb. 1f: Die Tidekurve vom 10./11.08.1991 an der Forschungsplattform Nordsee

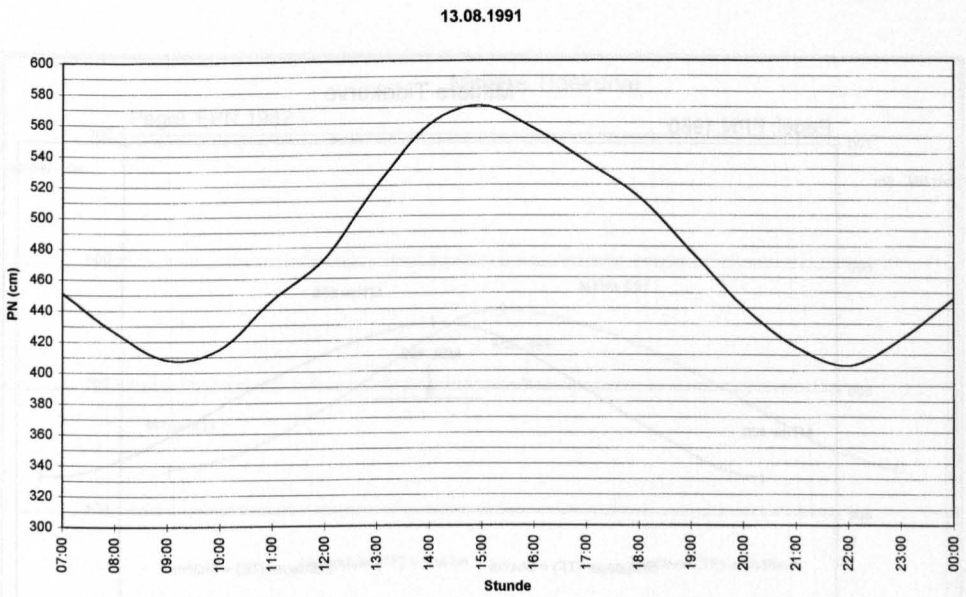


Abb 1g: Die Tidekurve vom 13.08.1991 an der Forschungsplattform Nordsee

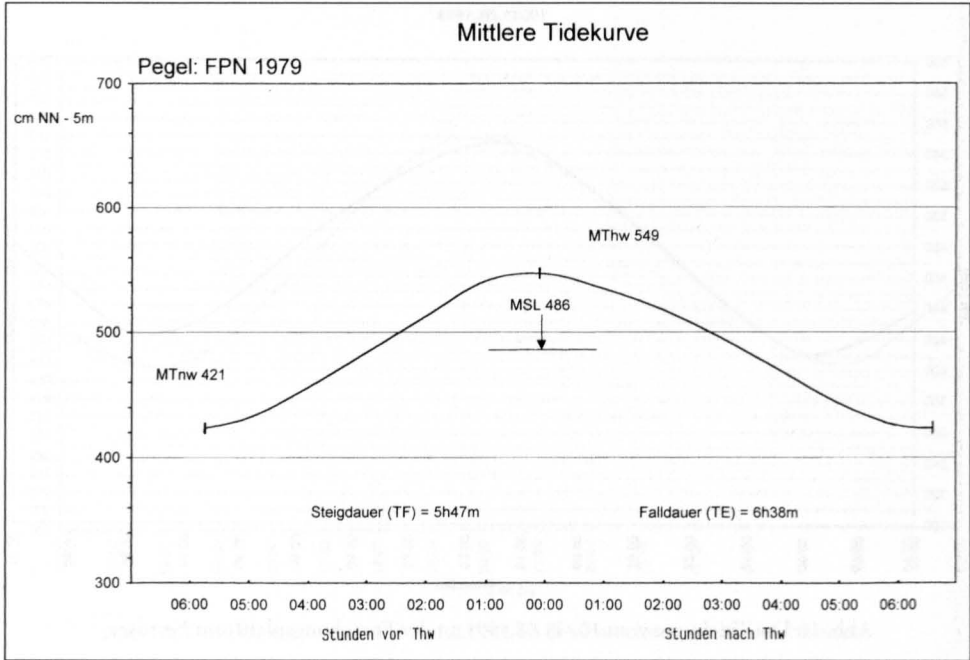


Abb. 2a: Die mittlere Tidekurve für 1979 an der Forschungsplattform Nordsee (Daten FBWG)

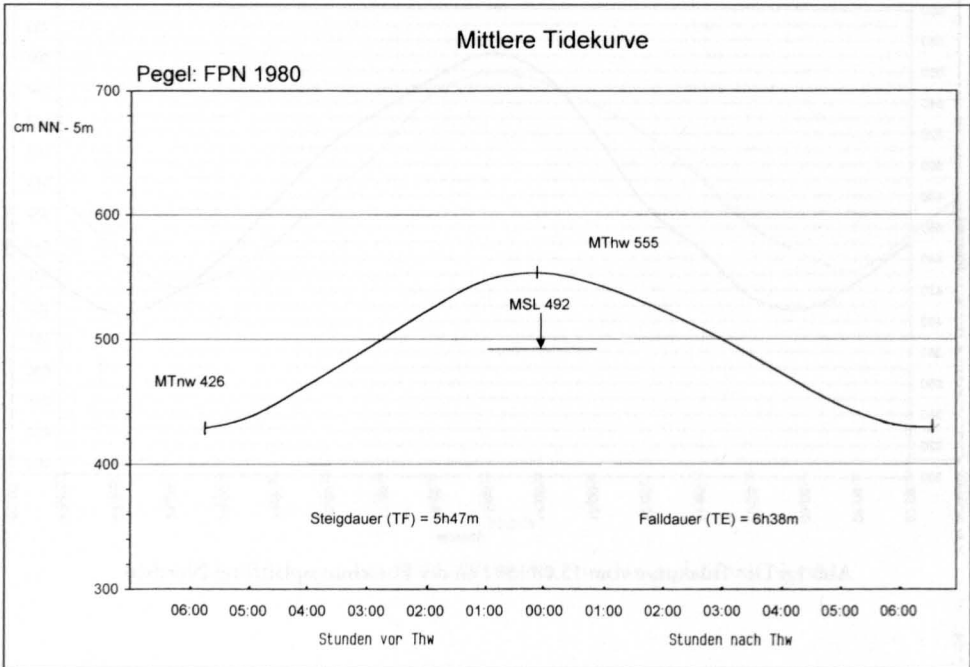


Abb. 2b: Die mittlere Tidekurve für 1980 an der Forschungsplattform Nordsee (Daten FBWG)



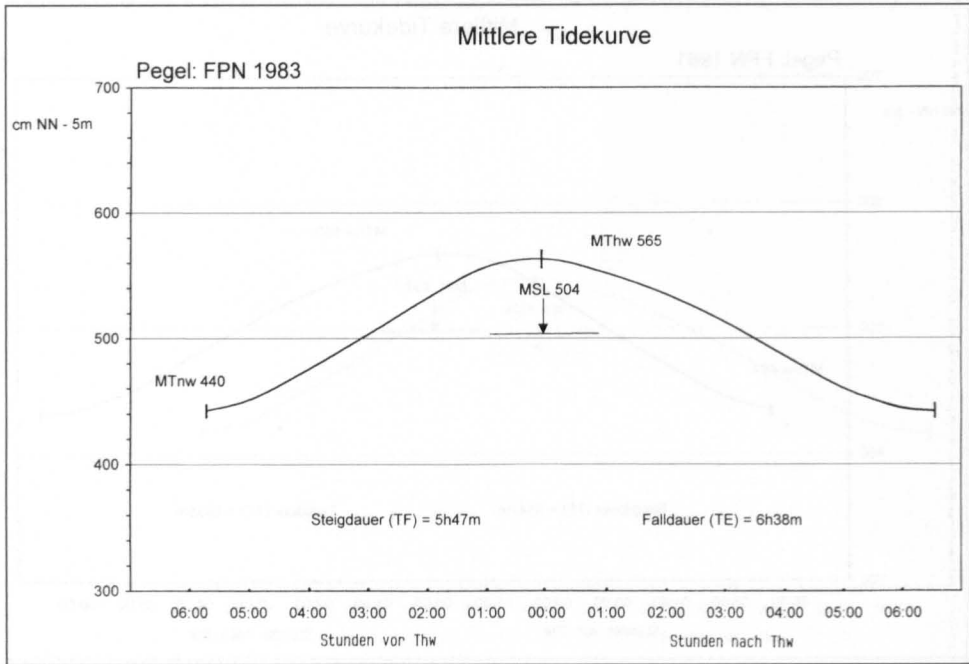


Abb. 2e: Die mittlere Tidekurve für 1983 an der Forschungsplattform Nordsee (Daten FBWG)

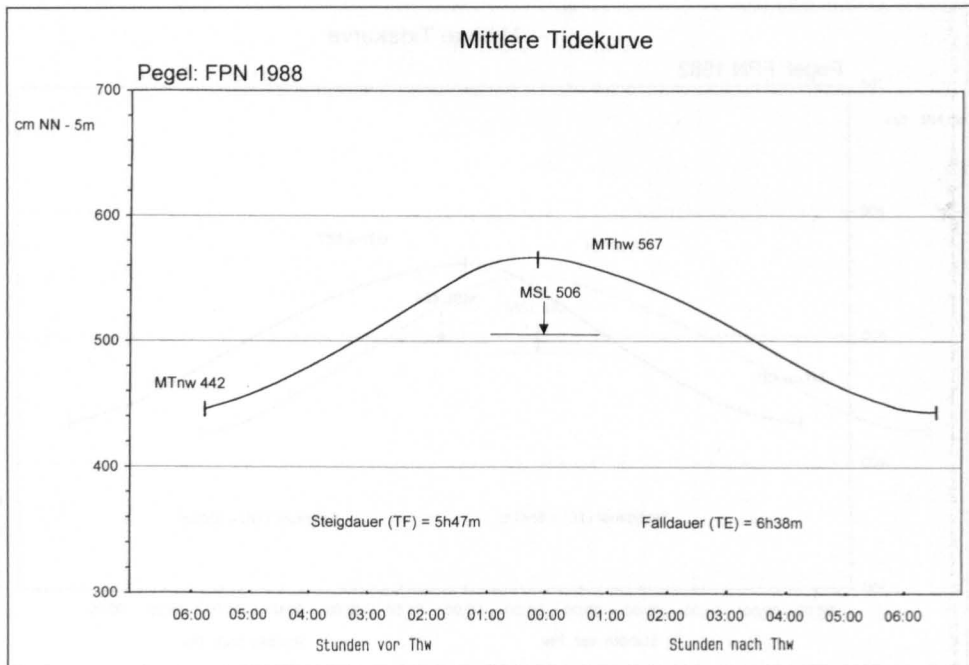


Abb. 2f: Die mittlere Tidekurve für 1988 an der Forschungsplattform Nordsee (Daten FBWG)

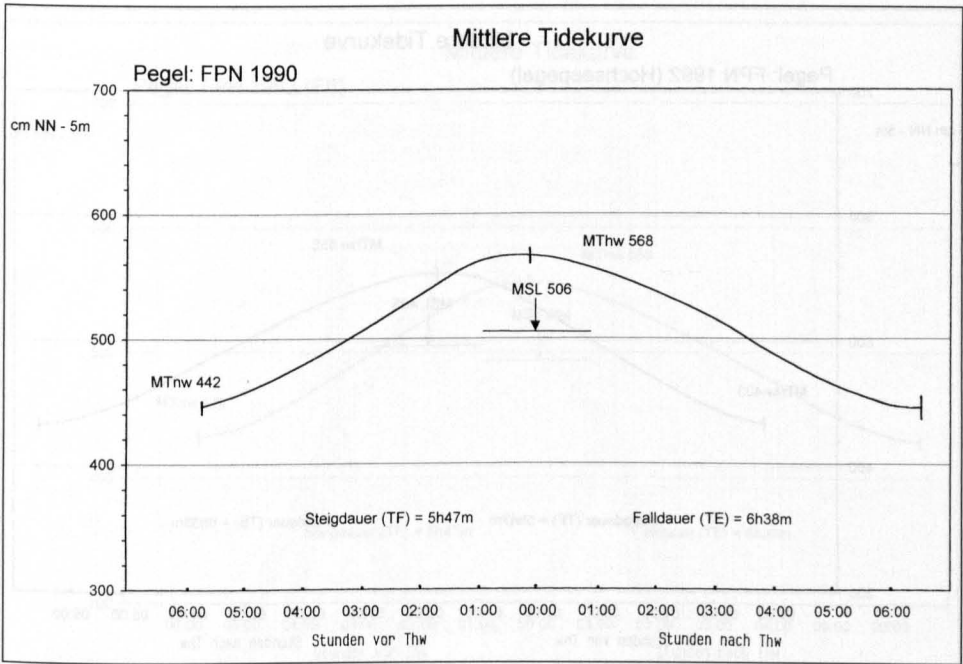


Abb. 2g: Die mittlere Tidekurve für 1990 an der Forschungsplattform Nordsee (Daten FBWG)

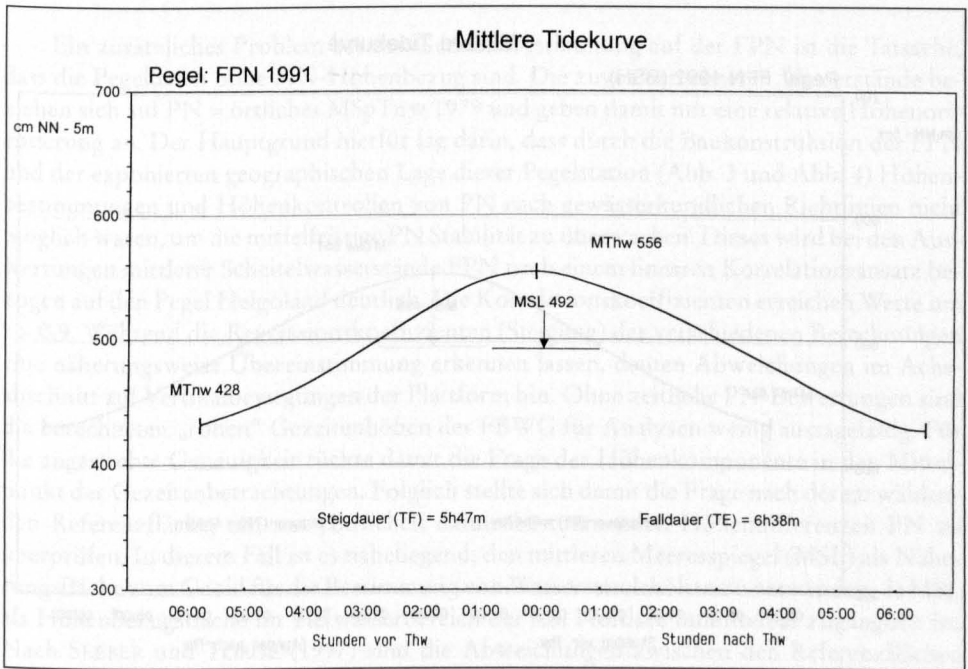


Abb. 2h: Die mittlere Tidekurve für 1991 an der Forschungsplattform Nordsee (Daten FBWG)

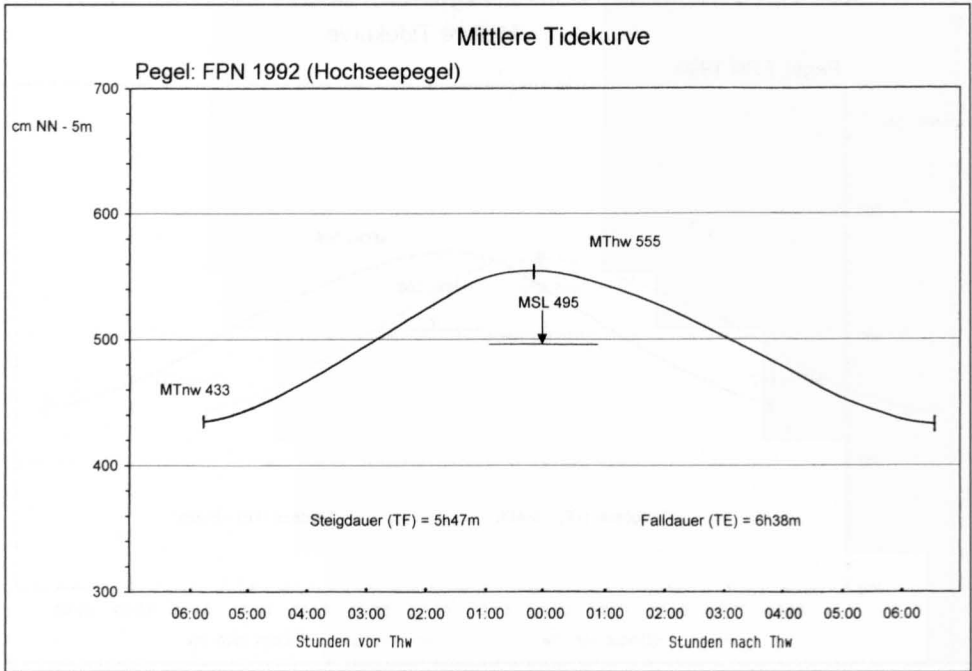


Abb. 2i: Die mittlere Tidekurve für 1992 am Hochseepegel FPN Nordsee (Daten BSH)

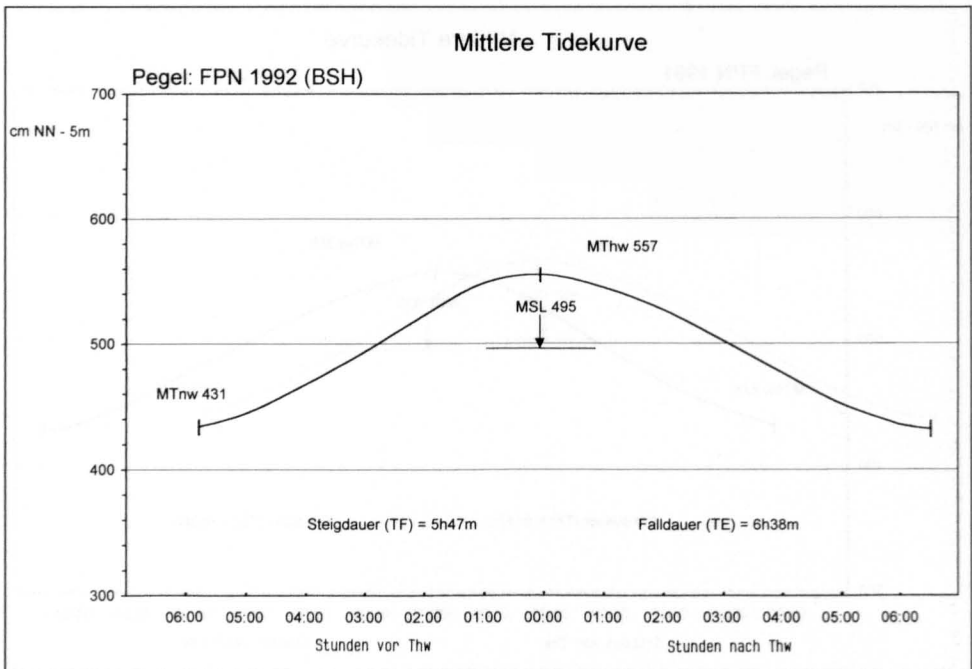


Abb. 2j: Die mittlere Tidekurve für 1992 an der Forschungsplattform Nordsee (Daten BSH)

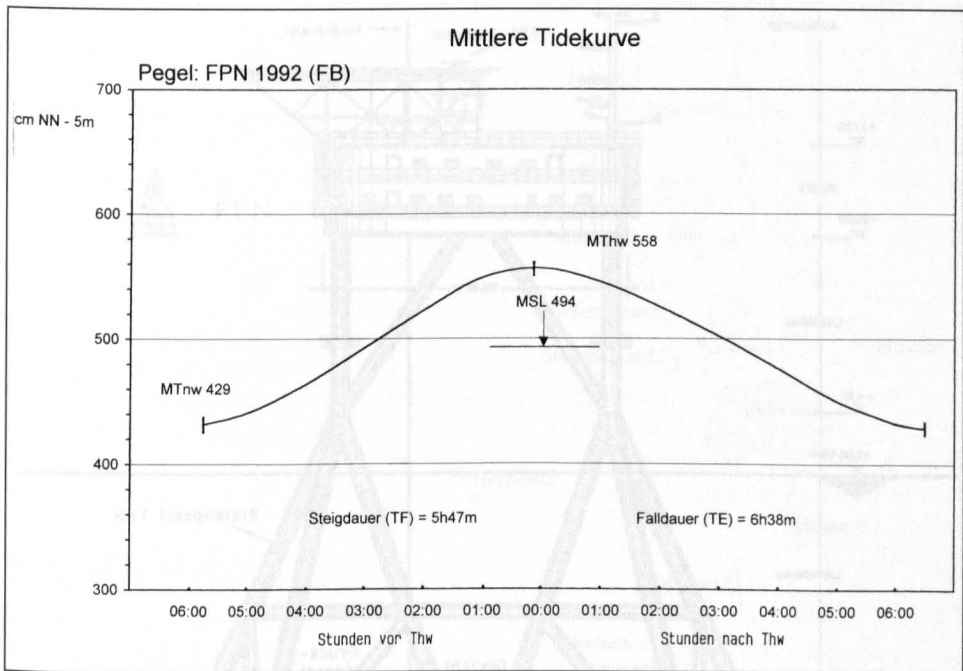


Abb. 2k: Die mittlere Tidekurve für 1992 an der Forschungsplattform Nordsee (Daten FBWG)

## 2.1 Pegelnull, mittlerer Meeresspiegel

Ein zusätzliches Problem bei der Gezeitenbestimmung auf der FPN ist die Tatsache, dass die Pegeldata ohne NN-Höhenbezug sind. Die zuvor berechneten Wasserstände beziehen sich auf PN = örtliches MSpTnw 1979 und geben damit nur eine relative Höhenorientierung an. Der Hauptgrund hierfür lag darin, dass durch die Baukonstruktion der FPN und der exponierten geographischen Lage dieser Pegelstation (Abb. 3 und Abb. 4) Höhenbestimmungen und Höhenkontrollen von PN nach gewässerkundlichen Richtlinien nicht möglich waren, um die mittelfristige PN Stabilität zu überwachen. Dieses wird bei den Auswertungen mittlerer Scheitelwasserstände FPN nach einem linearen Korrelationsansatz bezogen auf den Pegel Helgoland deutlich. Die Korrelationskoeffizienten erreichen Werte um  $r > 0,9$ . Während die Regressionskoeffizienten (Steigung) der verschiedenen Berechnungen eine näherungsweise Übereinstimmung erkennen lassen, deuten Abweichungen im Achsenabschnitt auf Vertikalbewegungen der Plattform hin. Ohne zeitliche PN-Bewertungen sind die berechneten „rohen“ Gezeitenhöhen der FBWG für Analysen wenig aussagefähig. Für die angestrebte Genauigkeit rückte damit die Frage der Höhenkomponente in den Mittelpunkt der Gezeitenbetrachtungen. Folglich stellte sich damit die Frage nach der zu wählenden Referenzfläche, um mit jährlichen datumsbestimmenden Höhendifferenzen PN zu überprüfen. In diesem Fall ist es naheliegend, den mittleren Meeresspiegel (MSL) als Näherungsfläche zum Geoid für die Bestimmung von Wasserstandshöhen zu verwenden, da MSL als Höhenbezugsfläche im Tiefwasserbereich der s.ö. Nordsee unmittelbar zugänglich ist. Nach SEEBER und TORGE (1997) sind die Abweichungen zwischen den Referenzflächen Geoid, Quasigeoid und NN im Meeresbereich  $< 1$  cm. Vergleichbare Aussagen liefern LASSEN und SIEFERT (1996) nach eingehenden Untersuchungen zum MSL. Die MSL-Höhen-

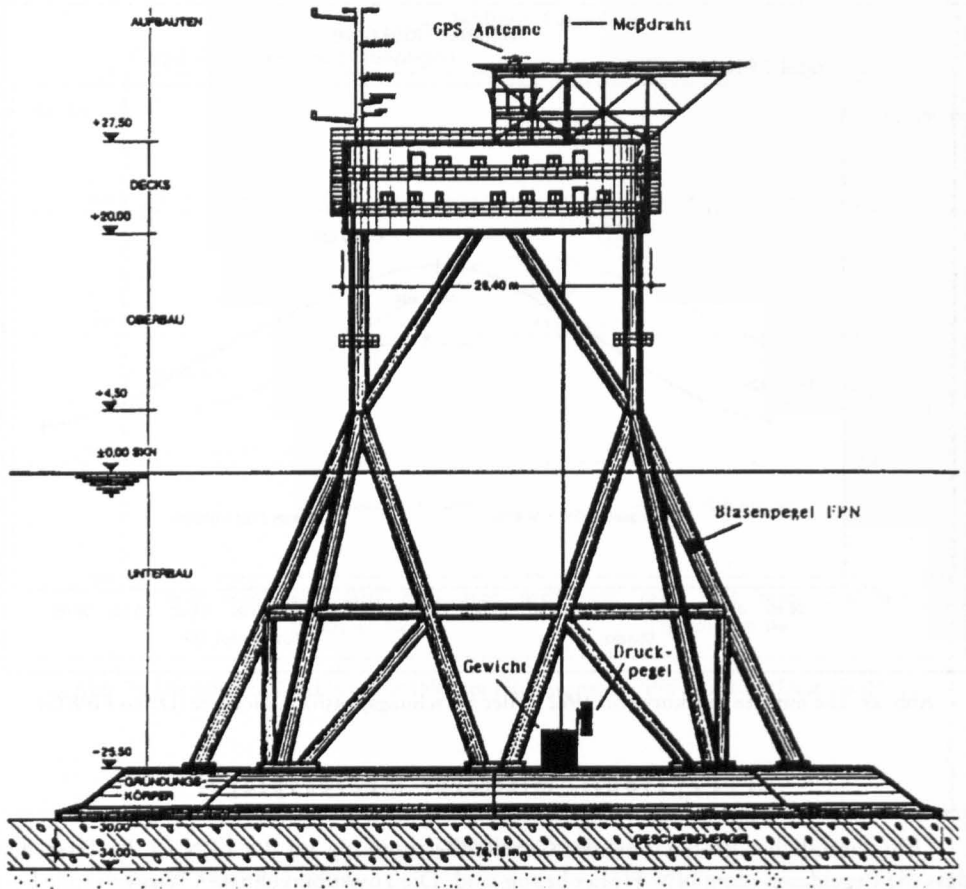


Abb. 3: Forschungsplattform Nordsee (aus: SEEBER et. al. 1995)

Pegel Helgoland und Pegel FPN sind äquivalent, d.h. MSL hat in der s.ö. Nordsee an den Pegelorten Helgoland und FPN nahezu die gleiche Höhe. Mit der Abweichung  $\Delta h$  (MSL Helgoland<sub>[PN]</sub> minus MSL FPN<sub>[relativ]</sub>) lassen sich die vorläufigen Wasserstandshöhen auf PN beschicken.

$$\text{MSL}_{\text{Hel (PN)}} = \text{MSL FPN (vorläufige Höhe)} \pm \Delta h$$

$$\Delta h = \text{MSL}_{\text{Hel}} - \text{MSL FPN (vorläufige Höhe)}.$$

Die vom BSH eingeführten jährlichen MSL-Höhen Helgoland werden mit der Datumsfestlegung  $\text{HN} = \text{NN} + 26 \text{ cm}$  als bekannt vorausgesetzt. Die angenäherten jährlichen MSL-Höhen FPN sind aus den vorliegenden rund 8700 stündlichen Wasserständen des betreffenden Kalenderjahres ermittelt worden. Von Bedeutung sind die Genauigkeiten der zu vergleichenden MSL-Höhen, deren Distanz letztlich die Bestimmtheit der FBWG Tidehöhen beeinflusst. Ausgehend von vorausgegangenen Gezeitenanalysen im Meeresbereich ist hier von einer Genauigkeit der auf MSL bezogenen Höhen um  $\pm 3 \text{ cm}$  bis  $\pm 5 \text{ cm}$  auszugehen, wobei die Unstetigkeiten in der PN-Höhe des Bezugspegels auf das Ergebnis berücksichtigt werden müssen (LASSEN u. SIEFERT, 1996). SEEBER u. TORGE (1997) geben die Ge-



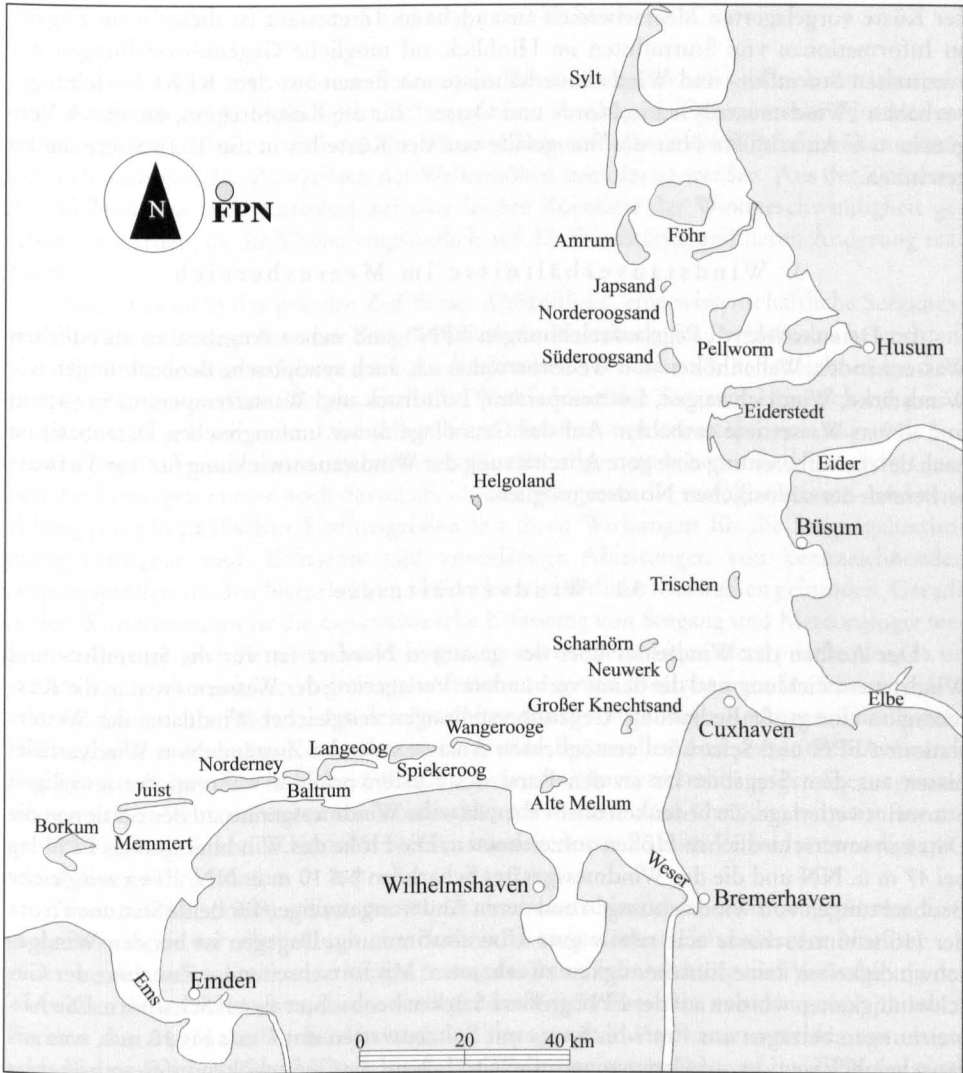


Abb. 4: Lageplan der FPN und ausgewählte Pegelstandorte

naugigkeit für PN Helgoland mit besser als 1 cm an. Diese Toleranz wird für eine PN-Höhe des Hochseepiegels durch die sicher schwierige Höhenübertragung vom GPS-Punkt auf dem Hubschrauberdeck zum Fundament der FPN (ca. 60 cm) nicht erreicht. So wird der Erwartungsbereich für die Genauigkeit der Gezeitenhöhen FBWG nach Auswertung einer großen Anzahl von Gezeitenbeobachtungen mit besser als  $\pm 5$  cm abgeschätzt. Zusammenfassend bleibt nach dieser sehr umfangreichen Datenanalyse von Wasserständen der FBWG festzuhalten, dass die aufgrund der Näherungsformel hergeleiteten und auf MSL (NN Höhe) beschickten Wasserstände die Charakteristik der Gezeitenbewegungen im Seegebiet zuverlässig, wenn auch nicht im 1-cm-Bereich, wiedergeben.

Mit der Verfügbarkeit von Sturmflutdaten aus den aufbereiteten Wasserstandsmessungen des Pegels FPN ist die Chance gegeben, Sturmflut- und Windstauanalysen bis in den

der Küste vorgelagerten Meeresbereich auszudehnen. Interessant ist dieser neue Zugang an Informationen von Sturmfluten im Hinblick auf mögliche Gegenüberstellungen der ermittelten Sturmflut- und Windstauverhältnisse mit denen aus dem KFKI Forschungsvorhaben „Windstauanalysen in Nord- und Ostsee“ für die Küstenregion, um durch Vergleiche u.a. Aufschlüsse über das Staugefälle von der Küste bis in die Tiefwasserzone zu gewinnen.

### 3. Windstauverhältnisse im Meeresbereich

Im Datenkollektiv „Pegelaufzeichnungen FPN“ sind neben Angaben zu stündlichen Wasserständen, Wellenhöhen und Wellenperioden u.a. auch synoptische Beobachtungen wie Windstärke, Windrichtungen, Lufttemperatur, Luftdruck und Wassertemperatur in  $-4,5$  m und  $-19$  m Wassertiefe enthalten. Auf der Grundlage dieser umfangreichen Datenbasis ist nach deren Aufbereitung eine gute Abschätzung der Windstauentwicklung für den Tiefwasserbereich der südöstlichen Nordsee möglich.

#### 3.1 Windverhältnisse

Der Aufbau des Windfeldes über der gesamten Nordsee hat für die Sturmflut- und Windstauentwicklung und die damit verbundene Verlagerung der Wassermassen in die Küstenregion eine große Bedeutung. Gegenüberstellungen zeitgleicher Winddaten der Wetterstationen FPN und Scharhörn ermöglichten Analysen der Ist-Zustände von Windverhältnissen aus dem Seegebiet bis an den Rand des Küstenvorfeldes während der jeweiligen Sturmflutwetterlage. Zu bedenken bleibt aber, dass die Windmessgeräte auf den Stationen die Daten in unterschiedlichen Höhen aufzeichneten. Die Höhe des Windmessgerätes FPN lag bei 47 m ü. NN und die des Windmessgerätes Scharhörn bei 10 m ü. NN. Etwa zeitgleiche Beobachtungen von Windrichtungen und deren Änderungen zeigen für beide Stationen trotz der Höhenunterschiede eine relativ gute Übereinstimmung. Dagegen ist bei den Windgeschwindigkeiten keine Einstimmigkeit zu erkennen. Mit fortschreitender Zunahme der Geschwindigkeiten wurden auf der FPN größere Stärken beobachtet als auf Scharhörn. Die Abweichungen betragen um 4 m/s bis 5 m/s mit Spitzenwerten um 7 m/s bis 10 m/s, was augenscheinlich weniger auf Geräteungenauigkeiten als auf die Gerätehöhendifferenz von etwa 37 m und abweichender Böigkeit des Windes zurückzuführen ist. ANTFANG (1969) weist in seinen Untersuchungen nach, dass die Windgeschwindigkeiten auf dem ehem. Feuerschiff ELBE 1 in 20 m Höhe im Monatsmittel um 1 m/s höher liegen als auf Scharhörn. Die Zusammenstellung der verschiedenen Windfelder bei Sturmfluten vom Seebereich bis an den Rand des Küstenvorfeldes (ca. 12 km vor der Küste) vergegenwärtigt, dass die Zu- und Abnahmen der Windgeschwindigkeiten sowie Windrichtungen im Analysebereich annähernd zeitgleich ablaufen. Die gemessenen Winddaten auf beiden Stationen sind vermutlich auch nicht ganz fehlerfrei, da der Einfluss durch die Trägerkonstruktion für den Anemographen nicht ganz ausgeschlossen werden kann. Dieser kurzgefasste Überblick zur Windentwicklung auf der FPN erfordert noch den Hinweis, dass bei verschiedenen Sturmfluten kurzfristige Windböen mit erheblichen Geschwindigkeiten um 40 m/s (150 km/h) registriert worden sind, die Auswirkungen auf die Wellenhöhen erkennen lassen.

### 3.2 Seegangsverhältnisse

Im Zusammenhang mit Sturmflutanalysen für die Nordsee muss, jedoch nur kurz und ohne Anspruch auf Vollständigkeit, der ungestörte Seegang im Tiefwasser der Nordsee erwähnt werden, da bei Sturmfluten die Wasserstände und damit die Windstauhöhen offensichtlich auch von den Zuwächsen der Wellenhöhen beeinflusst werden. Aus der Zunahme der Wellenhöhen kann durchaus auf eine leichte Zunahme der Windgeschwindigkeit geschlossen werden, da die Wellen empfindlich auf die Windstärke und deren Änderung reagieren.

Nun ist es nicht das primäre Ziel dieser Abhandlung, eine wissenschaftliche Seegangsanalyse zu erstellen, sondern nur die grundsätzliche Bedeutung des Problems zu beleuchten.

Die Bestimmungsverfahren nach der Spektralanalyse und nach kennzeichnenden Seegangsgrößen beschreiben die physikalische Wirklichkeit des Seeganges hinreichend genau und ergänzen sich teilweise. Und selbst, wenn die diesem Auswerteprozess zugrunde liegenden physikalischen und mathematischen Gesetze allgemein bekannt sind, hängt die Qualität der Lösungen immer noch davon ab, ob und wie genau die verfügbaren orts- und zeitabhängigen physikalischen Einflussgrößen mit ihren Wirkungen für die Seegangsbestimmung verfügbar sind. Effiziente und zuverlässige Ableitungen von kennzeichnenden Seegangsgrößen aus den Naturkräften sind an kontinuierliche Messreihen gebunden. Gerade in den Wintermonaten ist die messtechnische Erfassung von Seegang und Meteorologie wegen der seltenen und meist nur kurzfristigen extremen Wetterlagen nicht problemlos, da sie je nach Analysebereich die Vorhaltung und Betreuung von Messstationen im Küstenvorfeld oder im Seegebiet erfordern, um den Sturmflutablauf vollständig zu erfassen. Die Durchführung solcher Messungen erfordert einen großen finanziellen und personellen Aufwand. Das hat zur Folge, dass in vielen Fällen die weitgehenden wetterabhängigen Seegangsmessungen in den Wintermonaten aus technischen oder finanziellen Gründen teilweise nur erheblich eingeschränkt durchgeführt werden können, was u.U. zum Verlust notwendiger Informationen führen kann.

Nach SIEFERT (1969) sollten die an der deutschen Nordseeküste durchgeführten Seegangsmessungen vor allem durch eine Station im ungestörten Tiefwasser der Nordsee ergänzt werden, um weitere zuverlässige Aussagen über die Entstehung und Veränderung der Tiefwasserwellen zu machen, da die vorliegenden Ergebnisse stark von den geographischen Formen der angrenzenden Küsten und der Topographie des Küstenvorfeldes mit unterschiedlichen Wassertiefen abhängig sind. Die Wellenregistrierungen auf der FPN bei einer Wassertiefe von 27 m ergänzen die vorhandenen Seegangsmessungen bei Starkwinden aus der Küstenregion und geben für 10 Sturmtiden im Zeitraum von 1980 bis 1991 einen Überblick über die Strukturen der Tiefwasserwellen. Hieraus lassen sich Größenordnungen der auftretenden Veränderungen des auf die Küste zulaufenden Seeganges bei Annäherung an die Flachwasserzone des Küstenvorfeldes abschätzen. In diesem Bereich erfolgt ein deutlicher Zerfall der Wellenhöhen, der sich durch Beugung und Reflexion erklären lässt. Im Hinblick auf den Umfang einer Wellenanalyse für den Tiefwasserbereich kann eine vollständige Seegangsbestimmung in dieser Arbeit nicht erstellt werden. Angesichts der Problemstellung der vorliegenden Ausführungen erscheint es jedoch sinnvoll, eine Zusammenfassung über das vorhandene Datenmaterial „Sturmfluten FPN“ zu geben, um deren Einfluss auf das Geschehen zu erkennen. Zur Übersicht enthalten die Tab. 2 bis 12 beobachtete Wetterdaten und Wellenhöhen auf der FPN in Abständen von drei Stunden. Als kennzeichnende Wellenhöhe wird das Mittel aus einem Drittel der höchsten aller in einem zeitlich und örtlich begrenzten Bereich auftretenden Wellenhöhen (gemessen von Wellenberg zu Wellental) bezeichnet und

Tab. 2: Mittlere Wasserstände (Jahresmittel) für FPN, Helgoland und Cuxhaven

## 2.1 Luftdruck: langjähriger Mittelwert für die Nordsee nach BSH

1015 hpa

## 2.2 Mittlere Abweichungen der Scheitelwerte der Gezeiten von denen des Pegels Helgoland

Pegel	mittlere Eintrittszeitdifferenz		mittlere Höhendifferenz	
	dzF	dzE	Thw	Tnw
FPN	- 5 <sup>m</sup>	- 10 <sup>m</sup>	- 50 cm	+ 60 cm
Helgoland	0	0	0	0
Cuxhaven	+ 1 <sup>h</sup> 20 <sup>m</sup>	+ 1 <sup>h</sup> 20 <sup>m</sup>	+ 40 cm	- 20 cm

## 2.3 Jahreswerte GWJ (PN = NN - 5 m; HN = NN + 26 cm)

Jahr	Pegel			
	MTnw MThw MSL	FPN (cm)	Helgoland (cm)	Cuxhaven (cm)
1980	MTnw	426	366	341
	MThw	555	607	651
	MSL	492	492	506
1981	MTnw	432	372	348
	MThw	560	611	656
	MSL	497	497	512
1982	MTnw	431	372	347
	MThw	557	611	655
	MSL	495	497	511
1983	MTnw	440	381	360
	MThw	565	617	660
	MSL	504	504	520
1990	MTnw	442	383	363
	MThw	568	619	656
	MSL	506	506	519
1991	MTnw	428	367	349
	MThw	556	606	641
	MSL	492	492	504
1992	MTnw	433	371	353
	MThw	555	609	646
	MSL	495	495	509

Tab. 3a: Die Sturmflut (Nr. 138) vom 17.-19.11.1980: Beobachtete Wetter- und Wellendaten im zeitlichen Abstand von 3 h an der FPN

Datum	Uhrzeit	Wind		Wellen		Luft °C	Temperatur		Barograph mbar	Bemerkungen
		Richtg. °	Geschw. m/s	H1/3 m	Hmax m		Wasser°C	Wasser°C		
17.	21.00	205	21,0	2,7	5,1	11,2	8,8	-4,5 m	8,6	989,4
	00.00	200	20,0	2,7	5,2	10,8	8,9	-19 m	8,6	986,6
	03.00	210	20,0	2,7	5,5	10,8	8,9		8,6	984,9
	06.00	210	20,0	2,7	5,5	10,1	8,9		8,6	983,3
	09.00	220	25,2	2,8	6,0	10,1	9,0		8,7	992,4
	12.00	245	20,6	2,8	6,0	9,4	8,9		8,7	984,2
	15.00	260	26,2	3,0	7,0	8,4	9,0		8,7	985,2
	18.00	290	25,1	2,8	5,5	7,7	9,1		8,8	990,4
	21.00	305	24,1	3,0	7,5	8,4	9,1		8,8	997,6
	00.00	300	20,1	3,0	7,0	6,6	9,3		8,7	1002,1
19.	03.00	300	20,1	3,0	6,8	7,5	8,9		8,7	1005,5

Wetterdaten:

Tab. 3b: Die Sturmflut (Nr. 138) vom 17.-19.11.1980: Scheitelwasserstände und Eintrittszeiten FPN, Helgoland und Cuxhaven

Datum		FPN		Helgoland		Cuxhaven		Bemerkungen
		Eintrittszeit	Scheitelhöhe cm	Eintrittszeit	Scheitelhöhe cm	Eintrittszeit	Scheitelhöhe cm	
17.	Tnw	12.47	468	13.09	411	14.16	385	
	Thw	19.40	564	19.03	589	20.22	619	
18.	Tnw	0.57	496	1.18	451	2.55	425	Scheitelwasserstände in PN
	Thw	8.33	616	7.58	649	9.08	691	PN = NN - 5 m
	Tnw	13.49	453	13.50	522	15.12	543	HN = NN + 26 cm
	Thw	20.09	642	20.02	704	19.46	800	
19.	Tnw	2.46	543	3.00	492	4.30	491	
	Thw	8.03	629	8.25	643	9.32	743	

Tab. 4a: Die Sturmflut (Nr. 141) vom 3. 2. 1981: Beobachtete Wetter- und Wellendaten im zeitlichen Abstand von 3 h an der FPN

Datum	Uhrzeit	Wind		Wellen		Temperatur		Barograph	Bemerkungen
		Richtg. °	Geschw. m/s	H1/3 m	Hmax. m	Luft °C	Wasser °C		
Wetterdaten:									
2.	21.00	210	10,0	2,2	3,8	5,1	3,1	3,0	1006,7
3.	00.00	210	21,1	2,4	3,8	6,0	3,1	3,0	1003,0
	03.00	210	22,6	2,8	5,0	5,7	3,1	3,0	996,4
3.	06.00	230	26,8	3,8	7,6	6,6	3,1	3,1	985,0
	09.00	300	25,2	4,6	7,8	4,6	3,2	3,1	987,5
3.	12.00	290	14,4	2,4	4,8	5,5	3,2	3,2	994,3
	15.00	250	14,4	2,2	4,8	5,9	3,2	3,2	992,6
3.	18.00	250	14,9	2,0	3,2	5,6	3,2	3,2	990,6
	21.00	260	14,9	1,2	2,8	5,9	3,3	3,2	988,4
4.	00.00	260	14,4	1,9	3,2	4,5	3,3	3,2	984,5
	03.00	280	10,8	1,9	3,2	4,5	3,3	3,2	984,5

Tab. 4b: Die Sturmflut (Nr. 141) vom 3. 2. 1981: Scheitelwasserstände und Eintrittszeiten FPN, Helgoland und Cuxhaven

Datum	FPN			Helgoland			Cuxhaven			Bemerkungen
	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)		
2.	Tnw	16.05	454	16.30	401	17.40	388			
	Thw	22.27	564	22.31	608	23.14	650			
3.	Tnw	03.56	491	04.25	440	05.40	426			
	Thw	10.25	612	10.25	714	10.59	849			
4.	Tnw	17.00	494	17.20	432	18.20	414			
	Thw	22.56	621	22.56	668	-	-			
	Thw					00.09	723			

Scheitelwasserstände in PN  
PN = NN - 5 m  
HN = NN + 26 cm

Tab. 5a: Die Sturmflut (Nr. 146/147/148) vom 23. - 25. 11. 1981: Beobachtete Wetter- und Wellendaten im zeitlichen Abstand von 3 h an der FPN

Datum	Uhrzeit	Wind		Wellen		Temperatur		Barograph	Bemerkungen
		Richtg. °	Geschw. m/s	H1/3 m	Hmax. m	Periode sec	Luft °C		
23.	15.00	200	22	3,1	4,6	-	9,2	8,7	998,3
	18.00	190	22	3,7	5,9	-	10,2	8,7	990,9
	21.00	290	22	4,5	6,5	-	6,8	8,7	991,6
	00.00	280	28	4,8	7,0	-	4,6	8,7	996,0
	03.00	260	27	6,1	8,6	-	6,8	8,4	995,4
	06.00	270	29	6,5	8,7	-	6,7	8,5	994,6
24.	09.00	260	32	7,4	12,5	-	6,7	8,5	993,5
	12.00	270	34	7,3	11,1	-	7,0	8,5	992,9
	15.00	290	28	7,9	14,4	-	5,9	8,3	996,3
	18.00	300	31	7,6	10,8	-	5,0	8,2	999,9
	21.00	300	27	7,1	12,3	-	6,4	8,2	1002,4
	00.00	300	26	6,2	11,9	-	4,4	8,3	1004,1
25.	03.00	300	25	6,2	11,0	-	5,6	8,2	1007,7
	06.00	300	23	5,6	8,9	-	5,0	8,1	1005,1
	von 13.00-16.00 Uhr mit Spitzenböen um 41 m/s								

Tab. 5b: Die Sturmflut (Nr. 146/147/148) vom 23. - 25. 11. 1981: Scheitelwasserstände und Eintrittszeiten FPN, Helgoland und Cuxhaven

Datum	FPN			Helgoland			Cuxhaven			Bemerkungen
	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)		
23.	Tnw	16.12	468	16.27	403	17.50	371			
	Thw	23.02	630	22.20	700	23.40	825			
24.	Tnw	03.11	611	03.58	599	05.50	655		Scheitelwasserstände in PN	
	Thw	11.03	770	10.30	846	10.31	951		PN = NN - 5	
25.	Tnw	16.54	653	17.15	600	18.59	635		HN = NN + 26 cm	
	Thw	22.20	743	22.39	796	23.41	903			
	Thw	05.50	588	05.24	535	06.56	544			
	Thw	10.28	655	11.20	711	11.56	794			

Tab. 6a: Die Sturmflut (Nr. 151/152) vom 16. 12. 1982: Beobachtete Wetter- und Wellendaten im zeitlichen Abstand von 3 h an der FPN

Datum	Uhrzeit	Wind		Wellen		Luft °C	Temperatur		Barograph	Bemerkungen
		Richtg. °	Geschw. m/s	Hmax. m	Periode sec		-4,5 m	Wasser °C		
Wetterdaten:										
15.	18.00	250	23,7	5,0	7,1	10,8	7,6	7,4	975,8	
	21.00	260	23,2	4,8	7,1	10,1	7,6	7,4	973,7	
16.	00.00	300	25,7	5,2	7,4	5,9	7,4	7,7	974,9	
	03.00	280	24,7	5,7	7,9	6,0	7,6	7,4	977,4	
	06.00	280	24,7	7,6	9,8	6,7	7,6	7,4	979,5	
	09.00	280	22,6	6,6	9,8	6,7	7,5	7,3	981,5	mit Spitzenböen um 31 m/s
17.	12.00	270	22,6	5,8	9,2	4,5	7,5	7,3	983,1	
	15.00	260	21,6	4,6	7,8	6,4	7,5	7,3	982,5	
	18.00	280	15,9	5,3	8,5	5,7	7,3	7,1	980,8	
	21.00	270	22,6	5,3	7,4	3,4	7,3	7,1	980,1	
	00.00	300	19,5	6,0	10,0	5,3	7,5	7,2	981,1	
	03.00	290	14,9	4,4	7,6	6,1	7,5	7,3	983,8	

Tab. 6b: Die Sturmflut (Nr. 151/152) vom 16. 12. 1982: Scheitelwasserstände und Eintrittszeiten FPN, Helgoland und Cuxhaven

Datum	FPN			Helgoland			Cuxhaven			Bemerkungen
	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)		
15.	Tnw	17.35	538	18.05	505	19.31	516			
	Thw	00.38	682	00.54	755	02.17	829			Scheitelwasserstände in PN
16.	Tnw	06.12	614	06.39	592	08.18	629			PN = NN - 5 m
	Thw	12.10	715	12.23	778	12.59	863			HN = NN + 26 cm
17.	Tnw	18.58	581	18.39	525	20.20	526			
	Thw	00.02	649	00.30	711	01.31	797			
	Tnw	08.18	488	07.30	428	08.52	397			



Tab. 7a: Die Sturmflut (Nr. 153) vom 4. 1. 1983: Beobachtete Wetter- und Wellendaten im zeitlichen Abstand von 3 h an der FPN

Datum	Uhrzeit	Wind		Wellen		Temperatur		Barograph	Bemerkungen	
		Richtg. °	Geschw. m/s	H1/3 m	Hmax. m	Luft °C	Wasser °C			
Wetterdaten:										
3.	21.00	210	12,3	2,4	3,7	5,2	8,3	5,8	5,6	1007,0
	00.00	230	11,3	2,2	3,2	4,8	8,3	5,8	5,6	1006,4
4.	03.00	240	13,4	2,3	4,3	5,5	8,1	5,8	5,6	1005,1
	06.00	230	12,3	2,1	3,2	4,8	8,3	5,8	5,6	1002,9
	09.00	190	15,4	1,8	3,1	4,7	7,7	5,7	5,6	997,7
	12.00	200	21,6	2,6	4,6	4,4	8,1	5,8	5,5	990,8
	15.00	330	24,2	3,1	5,0	6,0	5,6	7,1	6,0	990,6
	18.00	310	18,0	4,1	6,1	7,1	6,8	7,1	6,0	1002,4
5.	21.00	290	19,5	3,9	6,0	7,1	6,7	5,9	5,7	1004,1
	00.00	280	13,4	2,1	5,5	5,7	6,2	5,9	5,7	1011,4
	03.00	260	11,3	2,9	4,3	6,6	6,0	5,9	5,6	1012,5

Tab. 7b: Die Sturmflut (Nr. 153) vom 4. 1. 1983: Scheitelwasserstände und Eintrittszeiten FPN, Helgoland und Cuxhaven

Datum	FPN		Helgoland		Cuxhaven		Bemerkungen
	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	
3.	Thw	527	14.57	574	16.14	606	Scheitelwasserstände in PN PN = NN - 5 m HN = NN + 26 cm
	Tnw	419	21.20	348	22.46	327	
4.	Thw	601	03.19	652	04.27	696	
	Tnw	489	09.47	420	11.26	388	
	Thw	644	15.45	712	17.02	866	
	Tnw	536	22.11	482	23.58	466	
5.	Thw	625	03.43	672	04.48	718	
	Tnw	432	10.55	353	12.00	332	

Tab. 8a: Die Sturmflut (Nr. 154/155) vom 17./18. und 19. 1. 1983: Beobachtete Wetter- und Wellendaten im zeitlichen Abstand von 3 h an der FPN

Datum	Uhrzeit	Wind		Wellen		Temperatur		Barograph	Bemerkungen
		Richtg. °	Geschw. m/s	H1/3 m	Hmax. m	Periode sec	Luft °C		
Wetterdaten:									
17.	21.00	250	18,0	3,5	5,2	6,2	6,8	5,3	1003,3
18.	00.00	240	21,6	3,9	7,9	6,1	6,8	5,3	998,7
	03.00	250	23,2	4,6	7,0	7,0	7,2	5,4	992,8
	06.00	290	28,9	6,6	10,5	8,8	5,1	5,4	991,4
	09.00	300	28,9	7,2	12,1	9,8	5,1	5,3	993,7
	12.00	300	25,2	6,5	9,9	8,9	3,5	5,3	996,0
	15.00	300	25,2	6,9	11,9	9,3	4,1	5,3	997,6
	18.00	310	24,1	6,0	9,4	8,6	2,1	5,2	999,0
19.	21.00	300	20,1	4,9	8,4	7,6	3,1	5,2	999,0
	00.00	310	19,0	4,7	7,4	7,5	3,7	5,2	1005,1
	03.00	310	17,0	4,6	7,4	7,3	5,3	5,2	1004,7

Tab. 8b: Die Sturmflut (Nr. 154/155) vom 17./18. und 19. 1. 1983: Scheitelwasserstände und Eintrittszeiten FPN, Helgoland und Cuxhaven

Datum	FPN			Helgoland			Cuxhaven			Bemerkungen
	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)		
17.	Tnw	14.05	599	14.05	646	15.00	701			
	Tnw	19.57	494	20.23	434	21.44	403			
	Thw	04.03	634	02.40	681	03.33	749		Scheitelwasserstände in PN	
18.	Tnw	08.49	558	08.38	604	09.38	664		PN = NN - 5 m	
	Thw	17.46	631	15.00	775	15.57	869		HN = NN + 26 cm	
	Thw	20.57	612	20.55	568	22.38	581			
19.	Thw	01.40	678	02.23	738	02.45	810			
	Thw	09.32	504	09.40	441	10.02	420			

Tab. 9a: Die Sturmflut (Nr. 156 und 157) vom 1. und 2. 2. 1983: Beobachtete Wetter- und Wellendaten im zeitlichen Abstand von 3 h an der FPN

Datum	Uhrzeit	Wind		Wellen		Temperatur		Barograph	Bemerkungen	
		Richtig. °	Geschw. m/s	H1/3 m	Hmax. m	Luft °C	Wasser °C			
Wetterdaten:										
1.	06.00	260	17,0	3,4	5,2	5,3	4,5	4,3	978,0	Spitzen- böen um 40 m/s
	09.00	250	20,6	3,9	6,4	6,7	4,5	4,3	975,9	
	12.00	240	23,7	5,1	8,4	7,2	4,4	4,3	974,0	
	15.00	240	31,4	7,0	11,1	9,1	4,4	4,2	969,2	
	18.00	270	26,2	7,0	11,2	8,9	4,5	4,3	967,9	
	21.00	310	24,2	8,2	14,4	10,9	4,4	4,2	977,8	
2.	00.00	300	21,6	7,0	10,8	9,3	4,4	4,2	985,6	Spitzen- böen um 30 m/s
	03.00	310	20,6	6,2	9,9	7,9	4,5	4,3	991,5	
	06.00	320	25,7	5,7	9,6	8,4	4,7	4,4	995,4	
	09.00	330	21,6	6,0	9,7	9,1	4,7	4,4	1001,4	
	12.00	350	17,5	5,1	7,6	7,8	4,7	4,4	1009,0	
	15.00	320	16,5	4,2	7,0	6,3	4,7	4,4	1013,1	
3.	18.00	310	13,4	3,5	5,6	5,4	4,7	4,4	1015,5	
	21.00	280	15,4	3,3	5,7	6,2	4,6	4,2	1015,2	
	00.00	280	15,4	3,1	5,5	5,0	4,5	4,3	1013,9	

Tab. 9b: Die Sturmflut (Nr. 156 und 157) vom 1. und 2. 2. 1983: Scheitelwasserstände und Eintrittszeiten FPN, Helgoland und Cuxhaven

Datum		FPN			Helgoland			Cuxhaven			Bemerkungen
		Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)				
1.	Tnw	08.22	458	08.45	402	10.15	385	Scheitelwasserstände in PN PN = NN - 5 m HN = NN + 26 cm			
	Thw	16.46	630	16.01	711	17.23	808				
2.	Tnw	20.51	534	20.48	595	22.50	673				
	Thw	02.40	718	03.10	796	03.48	903				
3.	Tnw	09.40	598	09.25	569	11.07	583				
	Thw	14.16	674	15.16	711	16.06	771				
	Tnw	21.57	484	21.59	402	23.04	369				
	Thw	02.55	593	03.32	646	04.34	709				

Tab. 10a: Die Sturmfluten (Nnr. 187, 188, 189, 190, 191) vom 26. - 28. 2. 1990: Beobachtete Wetter- und Wellendaten im zeitlichen Abstand von 3 h an der FPN

Datum	Uhrzeit	Wind		Wellen		Temperatur			Barograph	Bemerkungen	
		Richtg. °	Geschw. m/s	H1/3 m	Hmax. m	Periode sec	Luft °C	Wasser °C			-4,5 m
Wetterdaten:											
26.	06.00	200	16,4	3,4	6,5	-	6,5	7,5	6,5	981,7	Spitzen- böen um 40 m/s
	09.00	210	24,4	4,8	6,8	-	8,0	7,5	6,5	969,2	
	12.00	260	20,6	4,2	6,7	-	6,2	7,9	6,7	963,9	
	15.00	270	21,8	9,6	11,8	-	5,1	7,9	6,8	960,7	
	18.00	290	28,3	10,8	15,4	-	6,5	7,9	6,8	969,2	
	21.00	280	24,7	10,0	14,0	-	5,9	7,8	6,8	974,0	
27.	00.00	280	23,7	9,6	13,7	-	5,3	7,8	6,7	975,8	
	03.00	260	24,2	8,3	11,5	-	2,9	7,6	6,7	974,5	
	06.00	280	20,6	5,0	8,2	-	4,8	7,4	6,5	972,3	
	09.00	290	17,0	5,1	8,3	-	3,4	7,2	6,3	970,9	
	12.00	290	17,5	6,0	8,9	-	3,8	7,1	6,2	971,0	
	15.00	290	18,5	4,6	8,3	-	5,1	6,9	6,0	972,9	
28.	18.00	280	17,5	4,2	8,1	-	5,6	6,9	5,9	974,0	
	21.00	290	20,6	4,3	8,3	-	6,2	6,9	5,9	916,0	
	00.00	290	21,6	4,9	8,7	-	6,5	6,8	5,9	978,1	
	03.00	300	21,1	7,2	11,5	-	3,7	6,8	5,9	988,3	
	06.00	290	20,5	7,1	11,4	-	5,3	6,8	5,9	981,7	
	09.00	290	20,5	7,1	11,4	-	5,6	6,9	5,9	982,5	
29.	12.00	290	20,1	7,0	11,0	-	5,7	6,9	5,9	984,3	
	15.00	280	16,5	5,5	9,3	-	5,3	6,8	5,8	984,8	
	18.00	270	11,8	3,3	7,8	-	5,0	6,9	5,9	982,0	
	21.00	250	8,2	2,7	6,7	-	3,6	6,9	5,9	978,1	

Tab. 10b: Die Sturmfluten (Nr. 187, 188, 189, 190, 191) vom 26.-28.2.1990: Scheitelwasserstände und Eintrittszeiten FPN, Helgoland und Cuxhaven

Datum	FPN			Helgoland			Cuxhaven			Bemerkungen
	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)		
26.	Tnw	06.45	452	07.02	385	08.38	346	Scheitelwasserstände in PN PN = NN - 5 m HN = NN + 26 cm		
	Thw	14.12	672	13.48	724	16.50	828			
27.	Tnw	17.22	599	19.34	639	21.12	687			
	Thw	02.54	758	01.18	850	01.42	944			
28.	Tnw	07.37	641	07.28	543	08.55	559			
	Thw	13.45	726	13.29	761	14.17	852			
	Tnw	19.25	616	19.24	517	21.06	527			
	Thw	02.20	767	01.48	827	02.30	934			
	Tnw	08.12	642	8.03	549	09.48	577			
	Thw	13.24	715	13.50	751	14.08	835			
	Tnw	20.37	480	20.49	369	22.07	326			

Tab. 11a: Die Sturmflut 193 vom 21.9.1990: Beobachtete Wetter- und Wellendaten im zeitlichen Abstand von 3 h an der FPN

Datum	Uhrzeit	Wind		Wellen		Luft °C	Temperatur		Barograph	Bemerkungen
		Richtg. °	Geschw. m/s	H1/3 m	Hmax. m		Wasser °C	-4,5 m -19 m		
<i>Wetterdaten:</i>										
20.	18.00	280	11,8	2,3	3,9	12,1	17,3	15,3	1000,8	
	21.00	270	15,4	2,3	3,8	9,4	17,4	15,4	997,3	
21.	00.00	250	11,8	2,3	3,7	10,9	17,1	15,2	992,1	
	03.00	210	17,5	3,0	4,6	12,1	17,1	15,2	981,3	
	06.00	320	17,5	3,2	5,4	11,1	17,1	15,2	978,1	Böen mit Spitzenwerten
	09.00	310	21,6	3,8	5,8	9,8	17,1	15,2	983,0	
	12.00	310	22,6	4,3	6,8	8,5	17,0	15,1	985,6	
	15.00	300	25,2	4,5	7,9	7,7	17,0	15,1	985,2	28 m/s
22.	18.00	300	24,2	4,4	7,8	11,0	17,0	15,1	987,0	
	21.00	310	20,1	4,1	7,2	10,8	16,9	15,1	990,5	
	00.00	310	19,0	4,1	7,2	11,4	16,9	15,6	991,9	
	03.00	310	14,9	2,8	4,8	11,1	16,8	15,0	993,7	
	06.00	300	9,3	2,2	3,8	11,9	16,8	14,9	993,6	

Tab. 11b: Die Sturmflut 193 vom 21.9.1990: Scheitelwasserstände und Eintrittszeiten FPN, Helgoland und Cuxhaven

Datum	FPN			Helgoland			Cuxhaven			Bemerkungen
	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)		
20.	Tnw	19.27	502	19.24	421	20.58	401			
	Thw	01.18	619	00.55	657	01.53	708			
	Tnw	07.24	498	07.22	457	08.46	501			
	Thw	14.06	692	14.23	756	15.02	864			
22.	Tnw	20.06	611	19.58	542	21.47	570			Scheitelwasserstände in PN PN = NN - 5 m HN = NN + 26 cm
	Thw	00.37	679	01.24	716	02.02	779			
Tnw	08.12	492	08.14	412	09.28	379				

Tab. 12a: Die Sturmflut 202 vom 20.12.1991: Beobachtete Wetter- und Wellendaten im zeitlichen Abstand von 3 h an der FPN

Datum	Uhrzeit	Wind		Wellen		Temperatur		Barograph	Bemerkungen
		Richtg. °	Geschw. m/s	H1/3 m	Hmax. m	Luft °C	Wasser °C		
<i>Wetterdaten:</i>									
19.	21.00	270	11,3	3,0	4,8	7,9	7,9	984,6	
20.	00.00	290	17,5	2,4	4,2	7,2	7,3	984,0	
	03.00	290	21,1	3,5	5,5	5,2	7,9	985,2	
	06.00	280	18,0	5,1	7,3	5,5	7,9	985,9	
	09.00	280	18,0	5,4	8,1	5,9	7,3	986,5	
	12.00	290	17,5	5,5	9,2	4,5	8,0	987,8	
	15.00	290	17,0	5,2	8,6	5,0	7,8	988,2	
	18.00	280	17,5	4,9	8,0	4,2	7,2	989,9	
	21.00	300	20,1	5,0	8,6	6,4	7,9	992,1	
21.	00.00	310	15,4	4,5	7,3	4,9	7,9	994,9	
	03.00	310	15,4	4,1	6,7	3,6	7,7	996,4	

Tab. 12b: Die Sturmflut 202 vom 20.12.1991: Scheitelwasserstände und Eintrittszeiten FPN, Helgoland und Cuxhaven

Datum		FPN		Helgoland		Cuxhaven		Bemerkungen
		Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	Eintrittszeit	Scheitelhöhe (cm)	
19.	Thw	23.07	602	23.11	635	23.59	678	Scheitelwasserstände in PN PN = NN - 5 m HN = NN + 26 cm
20.	Tnw	02.40	573	03.57	538	05.47	552	
	Thw	10.23	727	10.54	804	11.19	864	
	Tnw	17.00	614	17.14	547	18.41	550	
21.	Thw	22.22	696	22.53	762	23.34	826	
	Tnw	05.46	532	05.49	456	07.23	458	

mit H1/3 gekennzeichnet. Von Interesse sind außerdem die größten Wellenhöhen Hmax sowie die Wellenperioden. Die verfügbaren Seegangsmessungen „FPN“ lassen folgende Größenordnungen für die kennzeichnende Wellenhöhe H1/3 im Tiefwasserbereich bei unterschiedlichen Starkwinden aus überwiegend westlichen Richtungen erkennen, über die bisher nur wenig Material vorliegt (Tab. 13 u. 14)

Tab. 13: Überblick über durchschnittlich zu erwartende kennzeichnende Wellenhöhe H1/3 bei Starkwinden aus westlichen Richtungen im Tiefwasserbereich der s.ö. Nordsee

Wellenhöhe H1/3 cm	100 bis 199	200 bis 499	500 bis 899	900 bis 1500
Häufigkeit %	8	77	13	2
mittlere Windstärke FPN m/s	2 bis 6	10 bis 20	25 bis 30	bis 40
mittlere Wellenperiode sec	4.5	6.3	8.4	max 12*

\*Anmerkung: max 12 sec Einzelwert

Tab. 14: Einzeln auftretende Wellenhöhe Hmax

Datum Uhrzeit Std.	vorherrschende Windrichtung Grad	mittlere Windstärke m/s	Windböen m/s	Hmax m
24. 11. 1981 14 bis 16	290	25	40	14,8
18. 1. 1983 14	300	25	38	14,9
1. 2. 1983 20 bis 21	300	28	38	14,4 u. 15,4
26. 2. 1983 17 bis 18	290	30	42	14,6 u. 15,4
Ostwindperiode vom 16. 3. – 22. 3. 1980				
18. 3. 1980, 20.00 Uhr– 20. 3. 1980, 5.00 Uhr	60 bis 90	17,5	20	4,5 bis 5,0

Aus den Vergleichen kennzeichnender Seegangsgrößen H1/3 und Hmax zwischen dem Meeresbereich und der Küstenregion bei 8 m Wassertiefe um Thw lassen sich Schlüsse über Veränderungen des Seeganges beim Einlaufen in die Flachwasserzone ziehen. Nach einer Abschätzung ist der Tiefwasserseegang in erster Näherung um das 2,5 bis 3fache größer als der von SCHRADER (1968) und SIEFERT (1971) angegebene Flachwasserseegang im Küstenvorfeld des Elbe-Weser-Dreiecks (Wassertiefe bei Thw um 8 m). Es wird also ein erheblicher Teil der Wellenenergie umgewandelt, was sich u.a. darin zeigt, dass die Wellen an Höhe verlieren. Diese Aussage ist aber auf den angegebenen Bereich des Küstenvorfeldes beschränkt. Während der Flachwasserseegang bei Starkwinden hauptsächlich von dem Wasserstand der Tidephase und der Windrichtung sowie der Windstärke geprägt wird, treffen diese Bedin-



gungen für das Seegebiet nicht zu. Der Tiefwasserseegang ist nur von der Dauer der Windrichtung sowie deren Stärke abhängig. Die größten Wellenhöhen lassen sich sowohl dem Scheitelpunkt des Thw wie auch dem des Tnw zuordnen, da hier das Verhältnis vom Thb zur Wassertiefe ohne Bedeutung ist.

### 3.3 Windstau im Tiefwasserbereich der südöstlichen Nordsee

Einen aufschlussreichen Einblick zum Windstauverhalten im Küstenbereich der s.ö. Nordsee einschließlich der Insel Helgoland bei vorwiegend westlichen Starkwinden vermittelt GÖNNERT (1999) im Abschlussbericht zum KFKI-Projekt „Windstauanalysen in Nord- und Ostsee“. Es stellt sich aber die Frage zur Windstaustruktur für den Tiefwasserbereich der südöstlichen Nordsee, die sich aufgrund der sich in vielfältiger Form überlagernden und beeinflussenden Vorgänge besonders bei Sturmfluten nicht mit den für Helgoland gefundenen Windstauverhältnissen allein beantworten lässt. Das auf der FPN beobachtete und aufbereitete Datenmaterial von 10 Sturmtiden (1980 bis 1991) ergänzt so die vorliegende Untersuchung und erweitert die Erkenntnisse zur Entwicklung des Windstaus bei Sturmfluten für die Nordsee. Aufgrund der geringen Datenbasis sind die Ergebnisse aber als begrenzt allgemeingültig anzusehen. Es lassen sich vielmehr zusammenhängende Wirkungen von Windstauparametern bewerten. Es muss darauf hingewiesen werden, dass bis zur Lösung aufgezeigter Zusammenhänge eine Fülle von Datenmaterial aufzubereiten war. (Anm.: Die Sturmflutnummern beziehen sich auf die entsprechende Sturmflut im „Hamburger Sturmflutverzeichnis“, in: SIEFERT, 1985; FERK, 1993 und GÖNNERT u. SIEFERT, 1998.)

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 Gezeiteneinwirkungen und Fernwellen können die Windstauwirkung noch zusätzlich messbar beeinflussen. Hier wird der Windstau als Summe all dieser Erscheinungen definiert und über die Windstaukurve ermittelt. Die Windstaukurve wird als Differenzkurve zwischen der eingetretenen und der für diese Zeit vorausgerechneten mittleren Tidekurve entwickelt. (SIEFERT, 1978). Ergänzende Hinweise zum Windstau finden sich u.a. in Beiträgen von TOMCZAK (1952), SIEFERT (1968 u. 1978), LASSEN u. SIEFERT (1992), und bei GÖNNERT (1999), so dass hier nicht weiter vertieft darauf eingegangen werden muss.

Aufgrund der amphidromischen Gezeitenbewegung in der südöstlichen Nordsee nimmt der Thb von ~ 20 cm im Knotenbereich der Amphidromie bis auf 350 cm an der Küste zu. Daher ist der Thb bei der FPN um den Faktor 2,5 kleiner als in Cuxhaven. Somit können die für die Küstenregion entwickelten Auswahlkriterien zur Definition einer Sturmflut, veröffentlicht bei GÖNNERT (1999), für den Tiefwasserbereich nicht schematisch übernommen werden, da hier das Kriterium Windstauhöhe > 2 m kaum erreicht bzw. überschritten wird. Für den Meeresbereich orientiert sich die Sturmflutauswahl daher an den Wasserständen, die in Cuxhaven erreicht werden. Angesichts der Problemstellung in dieser Arbeit, bei der es im Wesentlichen darum geht, den Sturmflutablauf von der See (FPN) über Helgoland bis zur Küste (Cuxhaven) aufzuzeigen, kommt hier mit der Verwendung von Windstaukennwerten eine weitere Lösungsstrategie zur Anwendung, um das Sturmflutgeschehen zu beurteilen. Erheblich erweiterte Informationen zum Windstau ergeben sich aus der Interpretation von Windstaukennlinien (SIEFERT u. LASSEN, 1985). Die Höhe des Windstaus ist theoretisch in erster Näherung bei gleichem Wind umgekehrt proportional zur Wassertiefe zu erwarten und

wäre dann über die Tide wegen des kaum veränderten Wasserstandes im Meeresbereich konstant, während der Windstau im Flachwasser vor den Küsten durch die geringe Wassertiefe und zusätzlich vom Tideverlauf beeinflusst wird. Somit ergeben sich in dieser Zone örtlich stark voneinander abweichende Windstaucharakteristika. Mit Hilfe von Windstaukennlinien lassen sich diese speziellen Unterschiede deutlich darstellen. Die Windstaukennlinie ist die Verbindungslinie der Windstaukennzahlen. Die Windstaukennzahl wird als Funktion relativ, etwa phasengleicher Änderungen an einer Station A zu einem Referenzpegel B berechnet (LASSEN u. SIEFERT, 1992).

$$K_{(t)} = \frac{W_{(t), A}}{W_{(t), B}}$$

wobei

$K_{(t)}$  = Kennzahl zum speziellen Zeitpunkt

$W_{(t), A}$  = Windstau zum speziellen Zeitpunkt an der Station A

$W_{(t), B}$  = Windstau zum speziellen Zeitpunkt an der Station B ist.

Für die Vorgehensweise bei jetzigen und zukünftigen Windstauanalysen spielt der Bezugsort bei Gegenüberstellungen der Wasserstandshöhen eine wichtige Rolle, um die Windstaucharakteristik erkennen und quantifizieren zu können und um die Beschreibung der Sturmflut von der See bis zur Küste zu erfassen. In diesem Fall wird der Pegel FPN aufgrund seiner geographischen Lage im Untersuchungsgebiet als Referenzpegel für die Windstauanalysen gewählt und enthält als Windstaukennwert die Größe 1. So lässt sich aus dem tidephasengleichen Quotienten Windstau A (Helgoland bzw. Cuxhaven)/ Windstau B (FPN) die prozentuale Windstauabweichung von der FPN bis zur Küste über die Tidedauer berechnen und als Windstaukennlinie darstellen.

### 3.4 Auswertung

Stürme mit hohen Windgeschwindigkeiten müssen im Meer nicht immer zwangsläufig zu wesentlich erhöhten Wasserständen führen, was z.B. die Sturmfluten Nr. 141 vom 3.2.1981 und Nr. 153 vom 4.1.1983 erkennen lassen. In Cuxhaven laufen die Sturmfluten bei einem maximalen Windstauanteil von 220 cm und 215 cm zu Höhen von 849 cm und 866 cm auf. Der entsprechende Windstau beträgt an der FPN nur kurzfristig um 100 cm und weist damit einen anderen, kürzeren Verlauf auf, und das Thw erhöht sich um etwa 60 cm. In beiden Fällen handelt es sich um den Durchzug eines Sturmtiefs, in Verlauf und Stärke typisch für die Nordseeregion. Beide Sturmfluten zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf. Starke auflandige Winde mit Zunahme der Windgeschwindigkeit von 10 m/s auf 28 m/s innerhalb von ungefähr 5 Std. und von SW auf NW (300°) drehende Richtungen führen nur an der Küste zu den o.g. Sturmfluten. Damit zeigt der Wind eine sehr rasche Windgeschwindigkeitsänderung, was dementsprechend zu einem steilen Anstieg der Windstaukurve von 33 cm/h bzw. 3 h/m für die Sturmflut vom 4.1.1983 und mit 29 m/s bzw. 3,5 h/m für den 3.2.1981 in Cuxhaven führte. Die Wellenhöhe  $H_{1/3}$  zeigt ähnliche Tendenz mit einer kurzfristigen Erhöhung von 2 m auf 4 m, später stark fallend auf 1,5 m. Die Phasenverschiebung zwischen den maximalen Windstauhöhen und der maximalen Windgeschwindigkeiten lag bei 3 Std. An der Sturmflut vom 4.1.1983 war eine Fernwelle in Höhe von 51 cm in Cuxhaven beteiligt.

Die kurze Entwicklungszeit der Windgeschwindigkeit bzw. die schnelle Windgeschwindigkeitsänderung bis zur maximalen Windgeschwindigkeit ist als Grund dafür anzusehen, dass der Sturm den Wasserstandsverlauf in der offenen See nur unwesentlich beein-

flusste und der Windstau erst an der Küste zu beobachten war. Orte, die im Tiefwasserbereich oder in den vorgelagerten Inseln liegen, benötigen für eine ausgeprägte und hohe Stauentwicklung einen langsamen Anstieg der Windgeschwindigkeit.

Im Tiefwasserbereich der südöstlichen Nordsee wird der Windstau einer Sturmflut nur von der Entwicklung des Starkwindfeldes mit unterschiedlichen Auswirkungen auf die Stauhöhe beeinflusst. Die Auswertungen verschiedener Sturmfluten lassen dies deutlich erkennen. Stabile Windverhältnisse ohne große Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen führen über die gesamte Tide zu fast konstantem lokalen Windstau, während bei instabilen Windverhältnissen ein zeitlich veränderlicher Stau über die Tide zu erwarten ist.

Die Sturmfluten Nr. 147/148 vom 23.11.1981, Nr. 151/152 vom 16. 11. 1982 und Nr. 202 vom 20.12.1991 mit stabilen Starkwinden jeweils zwischen 18 m/s und 26 m/s, Windrichtungen um 270° bis 300° und Wellenhöhen H1/3 von 5 m bis 7 m (FPN) verdeutlichen, dass die Windstauentwicklung unter den genannten Verhältnissen zu annähernd gleichen ortsabhängigen Stauhöhen führt, die sich im **HW und NW nur geringfügig unterscheiden**. Der Windstaukoeffizient K gibt Hinweise auf den großräumigen Windstauanstieg von der FPN bis zur Küste. Danach steigt der Stau unter diesen meteorologischen Bedingungen von der **FPN bis Helgoland um 10 %** und bis **Cuxhaven um 30 % bis 40 %** an. Die mittleren Windstauhöhen ergeben bei der FPN Werte zwischen 170 cm und 210 cm mit max. Stauhöhen von 200 cm bis 229 cm. In Cuxhaven steigt der maximale Stau bis auf 350 cm an.

Einen völlig anderen Ablauf nimmt die Windstauentwicklung der Sturmfluten Nr. 154/155 vom 18.3.1983. Trotz kontinuierlicher Wetterverhältnisse mit Starkwinden von 24 m/s ansteigend auf 28 m/s, später abnehmend auf 22 m/s, und Windrichtungen von 270° bis 300° einschließlich Wellenhöhen H1/3 um 7 m bei der FPN, ist der Stauablauf instabil. Cuxhaven und Helgoland registrieren einen Windstauanstieg zur Sturmflut Nr. 154 von 25 cm/Std. und maximalen Windstauhöhen von 323 cm (Cuxhaven) bzw. 235 cm (Helgoland). Dagegen erhöht sich der Windstau FPN in 6 Std. nur bis auf 120 cm. Im Vergleich zu Helgoland und Cuxhaven fällt das HThw Nr. 154 bei der FPN niedrig aus. Dies ist damit zu begründen, dass der Wind eine relativ schnelle Windgeschwindigkeitsänderung vorzuweisen hat, was in Cuxhaven zu hohen Windstau maxima führt und im Tiefwasserbereich eher zu flacheren Maxima. Da der Windstau FPN erst nach dem HW Nr. 154 durch die starke Stauzunahme mit 25 cm/Std. ansteigt, tritt das folgende NW bei der FPN nicht in Erscheinung. Die Tide verläuft hier bei der FPN diametral zu Helgoland und Cuxhaven nahezu acht Stunden fast horizontal und steigt danach bis zum HThw Nr. 155 an. Sehr deutlich ist diese unbeständige Windstauentwicklung bei Vergleichen der Windstaukoeffizienten K erkennbar. Um astronomisch Tnw FPN am Morgen des 18.3.1983 ist der Stau bei **Helgoland um 100 % und Cuxhaven um 150 %** größer als bei der FPN. Trotz Abnahme der Windstauhöhe vergrößert sich die Stauabweichung bis HThw Nr. 154 auf 180 % bzw. 290 %. Erst vor der folgenden Sturmflut Nr. 155 stabilisieren sich die Windstauverhältnisse. Die maximalen Windstauhöhen sind in Tab. 15 aufgelistet. Insgesamt weist diese Sturmflut mit ihren Windstaukurven im Vergleich einen schönen gleichmäßigen Verlauf auf, der den generellen Anstieg des Windstaus von der Nordsee bis zur Küste gut veranschaulicht. Der relativ steile Anstieg der Windgeschwindigkeit führt zu einem überproportionalen Anstieg des Windstaus von dem tiefen Bereich der Nordsee zur Küste.

Anlass für die Aufbereitung der Sturmtiden Nr. 187 bis Nr. 191 vom 26. bis 28.2.1990 ist das Auftreten einer Kettentide mit fünf Scheiteln. Während der Sturmflutperiode kam der Stau erzeugende Starkwind ohne größere Veränderungen aus westlichen Richtungen zwischen 270° und 290°. Die Windgeschwindigkeiten von anfänglichen 28 m/s bis 30 m/s am 26. fallen am 27. auf gleichbleibende 17 m/s bis 20 m/s ab. Mit anwachsenden Windgeschwin-

Tab. 15: max. Windstauhöhe der Sturmfluten Nr. 154 und 155

Sturmflut Nr.	maximale Windstauhöhe (cm)			Abweichung % gegen FPN		
	FPN	Helgoland	Cuxhaven	Helgoland	Cuxhaven	
154	144	236	325	64	126	instabil
155	178	200	250	12	40	stabil

digkeiten auf 30 m/s am späten Abend des 26. nehmen die Wellenhöhen H1/3 bei der FPN bis auf 10 m zu. Nach ca. 9 Std. nehmen die Wellenhöhen auf konstante 5 m ab (die beobachteten Wetterdaten auf der FPN am 26. bis 28.2.1990 sind nach einer Mitteilung des BSH auch von den zur damaligen Zeit stationierten Feuerschiffen in der Deutschen Bucht in näherungsweise gleicher Größenordnung beobachtet worden). Es ist leicht nachvollziehbar, dass abweichende Windgeschwindigkeiten relevante Auswirkungen auf Windstauhöhen haben. Die auflandigen Starkwinde bis zum Abend des 26. führen zur Bildung einer Windstaukurve, in deren Entwicklungsphase die Sturmflut Nr. 187 nur in Cuxhaven mit 828 cm einschließlich einem Windstauanteil von 320 cm eintritt. Im Meeresbereich werden nur erhöhte Thw bei einem Windstau von 155 cm registriert. Bis zum folgenden Tnw stellen sich maximale Stauhöhen bei der FPN und Helgoland von 235 cm bzw. 284 cm und in Cuxhaven von 360 cm ein. Das Tnw FPN tritt eine Stunde früher ein und ist wegen nicht erfassbarer Einflüsse in der Höhe um einen Meter niedriger als das Cuxhavener Tnw, was jedoch wegen amphidromischer Beeinflussung auf die Gezeiten in der südöstlichen Nordsee eigentlich nicht der Fall sein kann. (Bei einer mittleren Tide ist das  $T_{nw, FPN}$  um 80 cm höher als an der Küste). Mit nachlassenden Windgeschwindigkeiten nach Tnw und bei ansteigenden Wasserständen sinken die Stauhöhen in Cuxhaven innerhalb von sieben Stunden auf 2 m, bei Helgoland und der FPN binnen sechs Stunden auf Höhen zwischen 140 cm und 190 cm, d.h., sie nähern sich in der Größenordnung deutlich an. Die Stauhöhen verändern sich in den nächsten achtzehn Stunden nur unwesentlich. In dieser Windstauphase treten die Sturmfluten Nr. 188 und 189 ein. Mit der erneuten Zunahme der Windgeschwindigkeit in der Nacht vom 27. auf den 28. erreicht der Windstau in Cuxhaven wieder eine Höhe um 3 m. Bei Helgoland und der FPN ergeben sich Höhen um 2 m. Die Wasserstandserhöhungen führen zur Sturmflut Nr. 190 mit Scheitelhöhen, die in Cuxhaven und Helgoland um 1 dm bis 2 dm niedriger eintreten als bei der Sturmflut Nr. 188. Im Meeresbereich um die FPN ist das HThw dagegen 1 dm höher. Die folgenden Tab. 16 und 17 enthalten einmal Angaben zu HThw-Höhen mit zeitgleichen Stauhöhen und ferner Mittelwerte für stündliche und tidenphasengleiche Windstauhöhen mit dem Windstaukoeffizienten K der Sturmfluten Nr. 188, 189 und 190.

Die Windstaukoeffizienten K liefern zusätzliche Informationen zur unterschiedlichen Windstaucharakteristik zwischen der See und der Küste. Bei anhaltenden westlichen Starkwinden mit Geschwindigkeiten um 30 m/s während der Sturmflut Nr. 188 ist der mittlere tidephasengleiche Stau an der Küste um rd. 50 % größer als im Meeresbereich. Mit den sinkenden und wieder leicht ansteigenden Windgeschwindigkeiten in den Sturmflutverläufen Nr. 189 und 190 ändern sich auch die Stauabweichungen zwischen der FPN und Cuxhaven um 15 % und 40 %. Im Seegebiet bei Helgoland und der FPN stimmen die Stauhöhen näherungsweise überein.

Der beschriebene Windverlauf in Verbindung mit den genannten Höhenveränderungen des Windstaus lässt auf einen Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeitsänderung und Windstauhöhe schließen. Die Sturmflut 187–189 vom 26. 2. bis 28. 2. 1990 hatte mehrere

Tab. 16: HThw-Höhen und zeitgleiche Windstauhöhen der Sturmfluten 188, 189, 190

Sturmflut	FPN	Helgoland	Cuxhaven	Abweichung % gegen FPN	
				Helgoland	Cuxhaven
188 HThw (cm)	758	850	944	12	20
Windstau (cm)	209	248	301	18	44
189 HThw (cm)	726	761	852	5	17
Windstau (cm)	160	161	208	0	30
190 HThw (cm)	767	827	934	8	22
Windstau (cm)	207	225	288	9	39

Tab. 17: Mittlere tidephasengleiche Windstauhöhen und Windstaukoeffizienten K der Sturmfluten 188, 189 und 190

Sturmflut	FPN		Helgoland		Cuxhaven	
	Windstau (cm)	K	Windstau (cm)	K	Windstau (cm)	K
188	197	1	216	1,06	293	1,52
189	171	1	167	0,99	195	1,15
190	198	1	206	1,04	256	1,38
Mittel	189	1	196	1,04	248	1,35

Windstaumaxima. Während der rasche Anstieg der Windgeschwindigkeit zunächst ein sehr hohes Windstaumaximum produzierte, führte nach kurzem Abflauen des Windes der zweite, deutlich langsamere Anstieg der Windgeschwindigkeit bei dafür längerer Dauer der höchsten Windgeschwindigkeit zu einem deutlich geringeren Windstaumaximum. Erst bei erneutem kurzfristig raschem Anstieg der Windgeschwindigkeit zum Windstaupeak bei der Sturmflut 190 vergrößern sich die Höhendifferenzen erneut.

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse werfen auch die Frage auf, ob und in welchem Ausmaß bei ablandigen Starkwinden sich Änderungen der Windstaustruktur im Seebereich vollziehen. Die östlichen Starkwindperioden treten verhältnismäßig selten auf, so dass im Untersuchungszeitraum nur eine Ostwindwetterlage vom 16. 3. bis 22. 3. 1980 mit stetigen Windrichtungen zwischen  $70^\circ$  und  $100^\circ$  und Wellenhöhen  $H_{1/3}$  von 1 m bis 3 m bei der FPN zur Analyse herangezogen werden konnte. Die Windgeschwindigkeiten gehen von anfänglichen 10 m/s auf allmählich gleichbleibende 25 m/s. Am 16. und 17. ist kein bemerkenswerter negativer Windstau erkennbar. Erst am 18. mit Zunahme der Windgeschwindigkeit sinken die Wasserstände und es kommt zum negativen Stau. Unabhängig vom Steigen und Fallen der Tide verläuft der resultierende negative Stau über 45 Std. fast gradlinig ohne große Höhenunterschiede zwischen der Tiefwasserzone und der Küste. Am 19. betragen die maximalen negativen Stauhöhen an der FPN - 141 cm, um Helgoland - 126 cm und an der Küste bei Cuxhaven -141 cm. Während der Ostwindperiode treten folgende mittlere negative Windstauhöhen ein FPN: - 66 cm, Helgoland: - 68 cm, Cuxhaven: - 81 cm.

Als ergänzende Hinweise zum Sturmflutgeschehen in der Nordsee folgen noch einige Angaben über Abweichungen zwischen **vorausberechnetem und beobachtetem Eintritt der Sturmflutscheitel**. Danach liegen die aus dem vorhandenen Beobachtungsmaterial FPN

ermittelten Zeitdifferenzen (+ später, – früher) bei **HThw zwischen + 3h25m und – 1h10m, bei HTnw zwischen + 2h40m und –1 h50m**. Die größeren zeitlichen Abweichungen resultieren aus dem Einfluss der jeweils eingetretenen HTnw-Höhe und den unterschiedlichen Anstiegsneigungen der Windstaukurven. Es muss darauf hingewiesen werden, dass **ein kleiner Thb (hier 120 cm) beachtliche Auswirkungen auf die Bestimmung der Eintrittszeiten von HThw und HTnw hat**. So erschweren einmal meteorologisch bedingte Wasserstandsänderungen in einem flachen Scheitel der Windstaukurve FPN die exakte Festlegung des Scheiteleintritts und der Scheiteldauer, und zum andern führt die Beeinflussung des Sturmflutgeschehens auf den mittleren Tideablauf zu Abweichungen gegenüber den astronomischen Eintrittszeiten.

Gesonderte Untersuchungen der Beziehungen zwischen westlichen Starkwinden und dem Windstau ermöglichen die hier nicht weiter ausführlich diskutierten übrigen Sturmfluten. Es ist zunächst festzustellen, dass die zusätzlichen Auswertungen des Beobachtungsmaterials keine erwähnenswerten Unterschiede zu den vorliegenden Ergebnissen der Windstautwicklung bei westlichen Starkwinden erkennen lassen.

#### 4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Unter Zusammenfassung aller Untersuchungsergebnisse ergibt sich die Vermutung, dass sich kaum Gesetzmäßigkeiten für Windstauverhältnisse in Abhängigkeit von westlichen Starkwinden zwischen dem Tiefwasserbereich der südöstlichen Nordsee und der Küste ableiten lassen, da die Windverhältnisse selten über längere Zeit konstant sind. Wie weit tatsächlich Zusammenhänge vorhanden sind, lässt sich aus dem zeitlich beschränkten Datenumfang von nur zehn Sturmtiden nicht zuverlässig deuten. Die Ergebnisse lassen aber Zusammenhänge zwischen dem Windverlauf und der Stauerhöhung erkennen. So führen starke auflandige Winde bei Durchzug eines Sturmtiefes über der s.ö. Nordsee an der Küste zu einem rasanten Anstieg des Windstaus, während der Einfluss auf die Stautwicklung im Tiefwasserbereich ohne Bedeutung bleibt. Dagegen führen lang anhaltende hohe Windgeschwindigkeiten und langsame Windgeschwindigkeitsänderungen im Anstieg der Windgeschwindigkeit zu vergleichbar höheren Windstaumaxima im Tiefseebereich und vor Helgoland, die sich bis zur Küste nicht mehr so stark erhöhen wie bei schnellen Windgeschwindigkeitsänderungen. Dies erklärt die Höhendifferenzen, die sich in der vorliegenden Untersuchung ergeben. Grundsätzlich ist der Anstieg der Windstaumaxima von der FPN bis Helgoland geringer als von Helgoland bis Cuxhaven.

#### 5. Danksagung

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Oz. Annutsch für Denkanstöße und Anregungen zur Windstautwicklung in der südöstlichen Nordsee.

#### 6. Schriftenverzeichnis

- ANNUTSCH, R.: Wasserstandsvorhersage und Sturmflutwarnung. In: Der Wetterlotse, 393/394: 122–141, 1977.
- ANTFANG, H.: Die Wind- und Nebelverhältnisse im Elbmündungsgebiet. In: Hamburger Küstenforschung, Heft 18, 1971.

- EGGE, D.: Ellipsoidische Höhenübertragung vom Dopplerpunkt auf der Forschungsplattform Nordsee zur umgebenden Meeresoberfläche. Institut für Theor. Geodäsie Hannover, In: interner Bericht, unveröff., 1977.
- FERK, U.: Zur Definition einer Sturmflut. Änderungen der Hamburger Sturmflutkartei. Interner Vermerk, Strom- und Hafенbau (unveröff.).
- GÖNNERT, G.: The analysis of storm surge climate change along the German coast during the 20th century. In: Journal of Quaternary International, Heft 48, 1997.
- GÖNNERT, G.: Windstauanalysen in Nord- und Ostsee. Abschlussbericht zum KFKI Forschungsvorhaben, (unveröff.), 1999.
- GÖNNERT, G.: Veränderung des Charakters von Sturmfluten in der Nordsee aufgrund von Klimaänderung in den letzten 100 Jahren. In: Marburger Geographische Schriften, Heft 134, 1999.
- GÖNNERT, G. u. SIEFERT, W.: Sturmflutatlant Cuxhaven. Studie Nr. 92, 1998, Strom- und Hafенbau.
- LASSEN, H. u. SIEFERT, W.: Zur Windstauentwicklung in der südöstlichen Nordsee. Die Küste, H. 53, 1992.
- LASSEN, H. u. SIEFERT, W.: Tideablauf und Meeresspiegel im Bereich der südöstlichen Nordsee Amphidromien. In: Die Küste, H. 58, 1996.
- ROLL, H. U.: Über die Ausbreitung der Meereswellen unter der Wirkung des Windes (Aufgrund von Messungen im Wattenmeer) In: Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Heft 6, 1949.
- ROLL H.U.: Die Meereswellen in der südlichen Nordsee (Aufgrund von Wellenbeobachtungen deutscher Feuerschiffe). Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Einzelveröffentlichung Nr. 8, Hamburg 1956.
- SEEBER, G. u. TORGE, W.: Eine GPS/Geoid-Höhenübertragung zum Meerespegel in Helgoland. In: Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 10, 1997.
- SEEBER, G.; Torge, G. u. GOLDAN, U. J.: Präziser Höhenanschluss des Helgoländer Pegels. Schlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben (unveröffentlicht), 1995.
- SCHRADER, J. P.: Kennzeichnende Seegangsrößen für drei Messpunkte in der Elbmündung. In: Hamburger Küstenforschung, H. 4, 1968.
- SIEFERT, W.: Sturmflutvorhersage für den Tidebereich der Elbe aus dem Verlauf der Windstaukurve Cuxhaven. In: Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der TU Hannover, H.30, 1968.
- SIEFERT, W.: Seegangbestimmungen mit Radar und nach Luftbildern. In: Hamburger Küstenforschung, H. 7, 1969.
- SIEFERT, W.: Die Seegangsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. In: Hamburger Küstenforschung, H. 18, 1971.
- SIEFERT, W.: Über das Sturmflutgeschehen in den Tideflüssen. In: Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig, H. 63, 1978.
- SIEFERT, W.: Sturmfluten von 1901–1984 vor der südlichen Nordseeküste und in Hamburg (Ganglinien). Erarbeitet bei Strom- und Hafенbau. (Hamburger Küstenforschung, 44).
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. In: Die Küste, H. 42, 1985.
- TOMCZAK G.: Der Einfluss der Küstengestalt und des vorgelagerten Meeresbodens auf den windbedingten Anstau des Wassers. In: Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Bd. 5, 1952.