

Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen

VON WINFRIED SIEFERT UND HORST LASSEN

Zusammenfassung

Die Ergebnisse eines vom BMFT für 1½ Jahre geförderten KFKI-Projektes werden vorgestellt, in dem Wasserstandsdaten von 133 Pegeln im deutschen Nordsee-Küstenvorfeld analysiert wurden, und zwar hinsichtlich der Thw, Tnw, Flut- und Ebbedauern, Eintrittszeit-Differenzen, mittleren Tidekurven, der Windstauentwicklung und der Veränderungen in den letzten 80 Jahren. Die Übersichten enthalten Abb. 1, 5 bis 10, 22 bis 25 und 28 bis 30. Außerdem konnten erstmals „Momentaufnahmen“ mit Linien gleicher Wasserstände für das Gesamtgebiet hergestellt werden (Abb. 14 bis 19).

Die Dokumentation der Tideverhältnisse 1975/79 führt zu einigen neuen Erkenntnissen, die z. T. praktischer Art sind, z. T. aber auch von hohem wissenschaftlichen Interesse:

- Zur Bestimmung hinreichend genauer mittlerer Tideverhältnisse an einem Außenpegel reichen Korrelationsrechnungen zu einem Bezugspegel über 100 bis 200 Tiden aus (Kap. 2.3).
- Die Tidekurven in der Deutschen Bucht zeigen gleichmäßig kürzere Flut- als Ebbedauern ($T_F/T_E = \text{rd. } 0,84$ nach Abb. 10).
- Die Linien gleicher Thw-Eintrittszeiten weichen von denen bisheriger Darstellungen ab (Abb. 21).
- Der Tideablauf im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht wird durch Flachwasser- und Ästuarinflüsse bestimmt (Abb. 14 bis 19). Dadurch entsteht eine Ablösungszone, in der das Bild der Amphidromie durch örtliche Effekte dominant überlagert wird (Abb. 20).
- Der küstennahe Windstau entwickelt sich in den Wassertiefen über 5 m nicht ausgeprägt umgekehrt proportional zur Wassertiefe, wie eigentlich erwartet wurde (Abb. 23). Der theoretische Ansatz gilt wohl nur in sehr flachem Wasser.

Summary

Results are presented of a project managed by the German Coastal Engineering Board (KFKI) and supported by the Federal Government for 1½ years. The water elevation data of 133 gauges in the German North Sea coastal zone were evaluated with respect to HW, LW, flood and ebb duration, phase lag, mean tidal curves, surge development and changes during the last 8 decades. The basic results are given in Figs. 1, 5 to 10, 22 to 25 and 28 to 30. The first isohypses ever developed for this area are presented in Figs. 14 to 19.

An analysis of the 1975/79 mean tidal situation leads to the following new practical and scientific conclusions:

- *Mean tidal conditions at second order gauges can be adequately determined using correlations based on 100 to 200 tides at first order gauges (chap. 2.3).*
- *Tidal curves for the German Bight show shorter flood than ebb durations ($T_F/T_E \approx 0.84$, Fig. 10).*
- *HW co-tidal curves differ from those previously published (Fig. 21).*
- *The near shore tidal cycle is strongly influenced by shallow water and estuarine effects (Figs. 14 to 19). This results in a separation zone in which the Andromic pattern is dominantly masked by superimposed local phenomena (Fig. 20).*
- *The near coastal wind surge in water depths greater than 5 m is not, as generally expected, inversely proportional to the water depth (Fig. 23). This is due to the fact that the theoretical analysis is only applicable to very shallow water.*

Inhalt

1. Veranlassung	2
2. Methodik und Ziele	3
2.1 Unterlagen	3
2.2 Grundlagen der Bearbeitung	8
2.3 Tide und Windstau	8
2.3.1 Bezugs- und Anschlußpegel	8
2.3.2 Berechnung der MTnw- und MThw-Höhen	13
2.3.3 Berechnung hoher und niedriger Tnw- und Thw-Höhen	14
2.3.4 Konfidenzintervall für den Mittelwert	14
2.3.5 Berechnung der Flut- und Ebbedauern	15
2.3.6 Berechnung der mittleren Tidekurven	19
2.3.7 Berechnung der Windstau-Kennzahlen	19
2.4 Windstau-Kennlinien	20
2.5 Zur Tideentwicklung in diesem Jahrhundert	22
3. Ergebnisse	23
3.1 Mittlere Tideverhältnisse 1975/79	23
3.1.1 Allgemeine Übersicht	23
3.1.2 Regionale Besonderheiten	24
3.1.3 Folgerungen aus den Werten T_F/T_E	38
3.1.4 Eintrittszeiten vor langgestreckten Inseln	39
3.1.5 Mittlere Tidekurven	40
3.2 Der Tideablauf im Küstenvorfeld und in der Deutschen Bucht	44
3.2.1 Darstellung nach der Auswertung der Aufzeichnungen von 133 Pegeln	44
3.2.2 Einbindung in den großräumigen Tideablauf	61
3.3 Windstau-Kennlinien	63
3.4 Zur Tideentwicklung seit 1900	69
3.4.1 Genauigkeit früher Küstennivellements	69
3.4.2 Veränderungen an einzelnen Küstenorten	71
4. Anregungen für zukünftige Arbeiten	75
5. Schriftenverzeichnis	76

1. Veranlassung

In den letzten Jahren häufen sich Arbeiten auf dem Gebiet des Küsteningenieurwesens, die sich mit Auswirkungen von Wasserstandsentwicklungen beschäftigen, deren Ursachen z. T. im Bereich der südlichen Nordsee zu vermuten sind. Die dort möglichen Veränderungen wurden bisher nicht oder nur in geringem Umfang bearbeitet. Das liegt u. a. an dem nur lückenhaft vorhandenen und daher schwierig aufzuarbeitenden Datenmaterial.

Vor der südlichen Nordseeküste stehen eine Reihe von Dauerpegeln, deren Daten in diesem Zusammenhang sehr wertvoll sind (Borkum, Wangerooge, LT Alte Weser, Scharhörn, Trischen, Wittdün, Helgoland, Forschungsplattform Nordsee). Darüber hinaus aber wurden im Rahmen regionaler und überregionaler hydrologischer Untersuchungen und Vermessungsprogramme in den letzten Jahrzehnten an sehr vielen Punkten temporäre Wasserstandsbeobachtungen mit Hilfspegeln durchgeführt, die dann größtenteils – weil für die jeweilige Zielsetzung nicht erforderlich – nicht umfassend aufbereitet wurden. So existierten eine Reihe von Messungen, die bei weiterer Auswertung unseren Kenntnisstand erheblich erweitern helfen konnten.

Diese Überlegungen veranlaßten das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieur-

wesen (KFKI) 1980, eine Projektgruppe zu gründen, die Arbeiten zur Auswertung und Analyse von vorhandenen Messungen begleiten sollte*).

Für das Projekt wurden 1982/83 Mittel des Bundesministers für Forschung und Technologie sowie Eigenmittel der beteiligten Verwaltungen bereitgestellt. Die Projektgruppe betreut ab Mitte 1983 das Anschlußprojekt „Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in den deutschen Tideästuaren“, dessen Arbeiten auf den hier präsentierten Resultaten aufbauen.

2. Methodik und Ziele

2.1 Unterlagen

In der 1980 aufgestellten Konzeption war davon ausgegangen worden, daß zwar für spezielle Untersuchungen auf die – großenteils veröffentlichten – Daten der Pegel I. und II. Ordnung zurückgegriffen werden, im übrigen aber das Schwergewicht auf der Aufbereitung von Daten aus Messungen mit Hilfspegeln liegen sollte. In einer ersten, groben Übersicht konnte mit etwa 100 zusätzlichen Stationen zwischen Sylt und Borkum gerechnet werden. Tatsächlich ergab sich – nach Prüfung auf Brauchbarkeit – ein Kollektiv von 133 Pegeln, und zwar (Abb. 1 und Tab. 1)

- zwischen Hindenburgdamm und Eiderstedt: = 29
(einschl. der beiden von der Projektgruppe in der Osterley von April bis Dez. 1982 betriebenen Stationen)
- zwischen Eiderstedt und Medemsand: = 18
- Außenelbe bis Robinsbalje: = 26
(Ergebnisse großenteils von GÖHREN [1968] und SIEFERT [1973] veröffentlicht)
- Außenweser: = 21
(dazu Berichte des Wasser- und Schiffsamtes Bremerhaven und des Wasserwirtschaftsamtes Brake)
- Jade bis Ems: = 28
- Deutsche Bucht: = 11
(einschl. der Pegel aus dem KFKI-Programm DEBEX '81 [WIESE, 1982])

Die Unterlagen wurden – teilweise als Rohdaten auf Pegelbögen, mit und ohne Prüfungsvermerken – von folgenden Dienststellen zur Verfügung gestellt:

Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum
 Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide
 Wasser- und Schiffsamt Tönning
 Wasser- und Schiffsamt Cuxhaven
 Strom- und Hafenausbau Hamburg
 Wasserwirtschaftsamt Stade
 Wasser- und Schiffsamt Bremerhaven

* Der Gruppe gehören an: Dipl.-Oz. ANNUTSCH, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg; Dipl.-Ing. DIETZE, Wasser- und Schiffsamtsdirektion Nordwest, Aurich; Dr. DUENSING, Seewetteramt, Hamburg; Dr. HOFFMANN, Seewetteramt, Hamburg (Nachfolger für Dr. DUENSING); Dipl.-Ing. SCHULZ-KOSEL, Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel; Prof. Dr.-Ing. SIEFERT, Strom- und Hafenausbau Hamburg, Cuxhaven (als Obmann); Dipl.-Ing. WÖBKEN, Wasserwirtschaftsamt Brake; Dr.-Ing. WUNDES, Wasserwirtschaftsamt Bremen. Als Gäste: Dipl.-Ing. LASSEN, Strom- und Hafenausbau Hamburg, Cuxhaven (als ständiger Mitarbeiter); Dr.-Ing. STRÖHMER, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

Wasserwirtschaftsamt Brake
 Wasser- und Schiffsamt Wilhelmshaven
 Wasserwirtschaftsamt Wilhelmshaven
 Wasserwirtschaftsamt Aurich
 Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney
 Wasser- und Schiffsamt Emden

Für die erfolgreiche Zusammenarbeit sei allen Kollegen herzlich gedankt.

Die Ziele der Untersuchungen waren wie folgt formuliert worden:

- Hinweise auf mögliche Änderungen der Tideverhältnisse in der südlichen Nordsee, vor allem Hinweise auf exakte Messung und geeignete Auswertung.
- Normierung und Parametrisierung der Windstaucharakteristik.
- Möglichkeiten zur Abschätzung der Windstauänderungen bei bestimmten theoretischen meteorologischen Annahmen sowie über maximale Sturmfluthöhen bei vorgegebenen meteorologischen Randbedingungen.
- Herstellung synoptischer Unterlagen über
 - MThw-, MTnw-Höhen
 - MThw-, MTnw-Eintrittszeiten
 - MSpThw, MSpTnw
 - MNpThw, MNpTnw
 - „Laufzeiten“ von Thw, Tnw
 - Flut-, Ebbedauern
 - im Küstenvorfeld, z. B. als Eingangs- und Kontrolldaten für morphologische Analysen, Modellversuche oder -rechnungen.

Im Laufe der Arbeiten erwies es sich als sinnvoll, einige Akzente anders zu setzen, worauf dann im weiteren Text jeweils hingewiesen wird.

Tab. 1. Koordinaten der Pegelstandorte

Nr.	Name des Pegels	Gauß-Krüger Koordinaten		Nr.	Name des Pegels	Gauß-Krüger- Koordinaten	
		Rechts	Hoch			Rechts	Hoch
1	Borkum-Südstrand	25 43910	59 38640	1.18	Leybucht	69000	35630
1.0	Emden Neue Seeschleuse	79060	12320	1.19	Pogum	33950	10600
1.1	Borkum-Fischerbalje	49600	36480	2	Wilhelmshaven Alter Vorhafen	34 43360	59 31780
1.2	Lütje Hörn	58100	40900	2.1	Voslapp	34 41881	59 42470
1.3	Westerbalje	59942	37120	2.2	Hooksielplate	34 50602	59 48785
1.4	Leybuchtziel	75790	35070	2.3	Wangersiel	34 35330	59 50700
1.5	Norddeich	76660	44280	2.4	L.T. Mellum-Plate	34 40237	59 60449
1.6	Norderney Riffgat	76280	52300	2.5	Wangerooge-Ost	34 32020	59 60598
1.7	Norderneyer Watt	87263	52815	2.6	Wangerooge-Nord	34 29448	59 64247
1.8	Wichter Ee	89065	55665	2.7	Wangerooge-West	34 25437	59 61167
1.9	Baltrumer Watt	93861	52359	2.8	Delpier	34 44903	59 36668
1.10	Langeoog Ostmole	99152	55722	2.9	Eckwardersiel	34 51990	59 32370
1.11	Bensersiel	34 05900	59 50160	3	Bremerhaven-Doppel- schleuse	34 72075	59 33556
1.12	Spiekeroog	13125	58427	3.1	Fedderwardersiel	34 57590	59 41040
1.13	Neuharlinger Siel	14430	52820	3.2	Imsum	65910	43502
1.14	Harlesiel	21420	53660	3.3	Wremerloch	63728	44075
1.15	Baltrum	25 70020	59 55430	3.4	Wremertief	34 66690	59 46510
1.16	Rysum	67084	13849				
1.17	Emshörn	55869	29434				

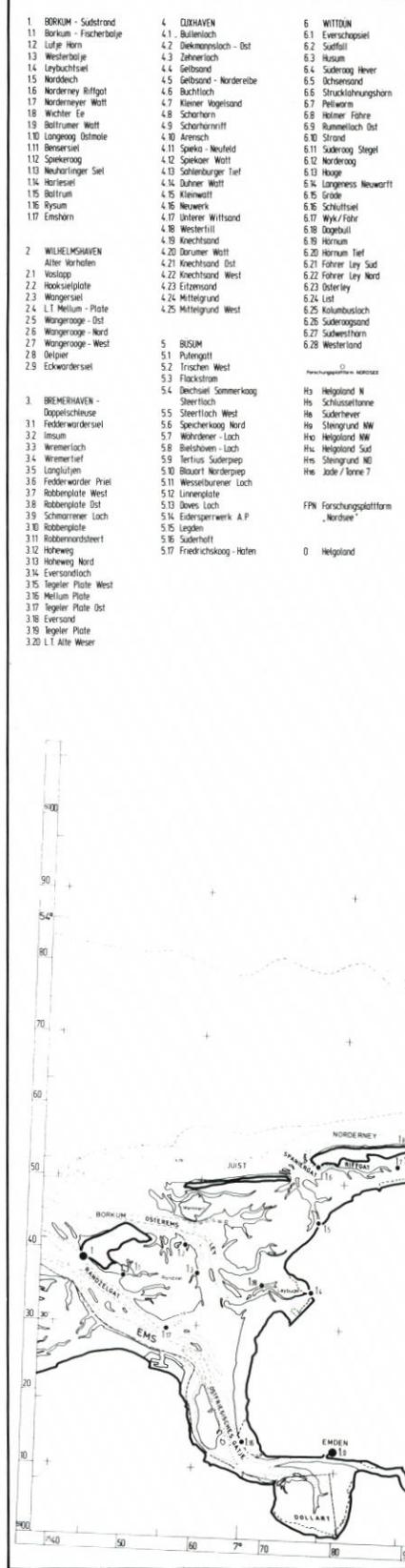


Abb. 1. Lageplan mit den Positionen der untersuchten Pegel



Lageplan

- Bezugspunkt
- Anschlußpegel
- mit Höhenanschluß (außer Heigland)
- ohne Höhenanschluß

Skala
1:100000
Ausgewählte Punkte der 1000-Meter- und 2000-Meter-Tiefenlinie
© 1985 DEUTSCHE HYDROGRAPHISCH-UNTERSUCHUNGS-UND MEßDIENSTSTELLE
Die Höhen sind in Metern über NN angegeben.

Wg 177
1:100000

2.2 Grundlagen der Bearbeitung

Die Notwendigkeit zur einheitlichen Bearbeitung und Auswertung von Wasserstandsaufzeichnungen aller zur Untersuchung anstehenden Pegel entsprechend Punkt a) und d) der og. Ziele erfordert ein wirtschaftliches und zuverlässiges Rechenmodell, das die mathematisch-naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeit möglichst gut beschreibt. Die Auswertung wurde daher nach dem von GÖHREN (1964) vorgeschlagenen Verfahren der Regressions- und Korrelationsrechnung durchgeführt.

Aufgrund problembezogener Fachkenntnisse und unter Benutzung statistischer Methoden zur Genauigkeitsabschätzung sind Einzelheiten für die Stichprobenentnahme bestimmt worden, um den Rechenaufwand (sehr eingabeintensiv), der bei Einbeziehung sämtlicher vorhandener Daten sehr groß wäre, möglichst klein zu halten, ohne dabei die Schätzwerte mit ihren statistischen Eigenschaften als Zufallsergebnisse bemerkenswert zu verfälschen.

Von der Aufgabenstellung her werden folgende kennzeichnende Größen eingeführt:

als Lageparameter die „Mittelwerte \bar{x} und \bar{y} “

als Streuparameter die „Standardabweichung S“

als Maß der gegenseitigen linearen Abhängigkeit der „Korrelationskoeffizient r“

als Summe der Quadrate auf der Regression das „Bestimmtheitsmaß B“

als Maß der Funktion der Variablen y von der Variablen x die „Regression“ und der „Vertrauensbereich des Mittelwertes V“

Weil in der Literatur für dieselbe statistische Formel häufig unterschiedliche mathematische Bezeichnungen zugrundeliegen, werden die og. Parameter in Anlehnung an die DIN-Vorschriften 1319 (Grundbegriffe der Meßtechnik) und 55302, Blatt 1 und 2 (Häufigkeitsverteilung, Mittelwert und Streuung), erläutert (s. S. 9).

Mit den Ergebnissen aus dem aufbereiteten Datenmaterial ließen sich die für die Konstruktion der mittleren Tidekurven erforderlichen Jahresmittelwerte und fünfjährigen Mittelwerte der T_{nw} und Th_w für alle Pegelstandorte in Abhängigkeit von einem Bezugspegel mit hinreichender Genauigkeit bestimmen, auch wenn das Datenmaterial eines Pegels aus zeitlich begrenzten oder unterbrochenen Meßreihen stammt. Die Berechnungen wurden mit einem Taschenrechner HP 41CV durchgeführt.

Zur Vermeidung von Einflüssen durch unterschiedliches Vergleichsmaterial sind alle in diesem Bericht genannten Wasserstände und die geometrischen Formen der mittleren Tidekurven auf den Horizont NN – 5 m bezogen. Dabei ist bei älteren Wasserstandsangaben, soweit erforderlich, die Differenz NN (altes System) – NN (neues System) der ehemaligen preußischen Landesaufnahme berücksichtigt worden.

Hinsichtlich der Windstauentwicklung (Pkt. b) und c) der og. Ziele) basieren die Untersuchungen vor allem auf den Arbeiten von GRAFF und BLACKMAN (1979), PUGH und VASSIE (1979) sowie SIEFERT (1978), die alle neben der Analyse der Hochwasserscheitel (HTh_w)^{*)} besonderes Gewicht auf die Windstaukurven legen, eine Methode, die im deutschen Küsteningenieurwesen bisher noch keine ausreichende Verbreitung gefunden hat.

2.3 Tide und Windstau

2.3.1 Bezugs- und Anschlußpegel

Die Tide- und Windstauverhältnisse im stark gegliederten deutschen Küstenvorfeld sind bisher nur in groben Zügen bekannt, soweit dies eben durch Auswertung weniger Pegel möglich ist. Eine generelle Übersicht über die Springtideverhältnisse gibt Abb. 2 (nach

*) Als HTh_w werden im folgenden die Scheitel einzelner Sturmfluten bezeichnet, deren Eintrittsdatum dann jeweils angegeben wird.

Variable	x	y
Fallzahl	n	n
Mittelwert	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_j x_j$	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_j y_j$
Summe der Abweichungsquadrate	$S_{xx} = \sum_j (x_j - \bar{x})^2$ $= \sum x_j^2 - \frac{(\sum x_j)^2}{n}$	$S_{yy} = \sum_j (y_j - \bar{y})^2$ $= \sum y_j^2 - \frac{(\sum y_j)^2}{n}$
Varianz	$s_x^2 = \frac{S_{xx}}{n-1}$	$s_y^2 = \frac{S_{yy}}{n-1}$
Standardabweichung	$s_x = \sqrt{\frac{S_{xx}}{n-1}}$	$s_y = \sqrt{\frac{S_{yy}}{n-1}}$
Summe der Abweichungsprodukte	$S_{xy} = \sum_j (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y}) = \sum_j x_j y_j - \frac{\sum x_j \cdot \sum y_j}{n-1}$	
Kovarianz	$s_{xy} = \frac{S_{xy}}{n-1}$	
Korrelationskoeffizient	$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} \cdot S_{yy}}} = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y}$	
Regressionsgerade von x auf y	$y = bx + a; b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}; a = \bar{y} - b \cdot \bar{x}$	
Bestimmtheitsmaß	$B = r^2 = \frac{S_{xy}^2}{S_{xx} \cdot S_{yy}}$	
Vertrauensbereich des Mittelwertes	$V = \bar{x} \pm \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s$ + = obere Grenze - = untere Grenze	Integralgrenzen der t-Verteilung in Abhängigkeit vom Freiheitsgrad und der statistischen Sicherheit 5 %; Tafelwerte

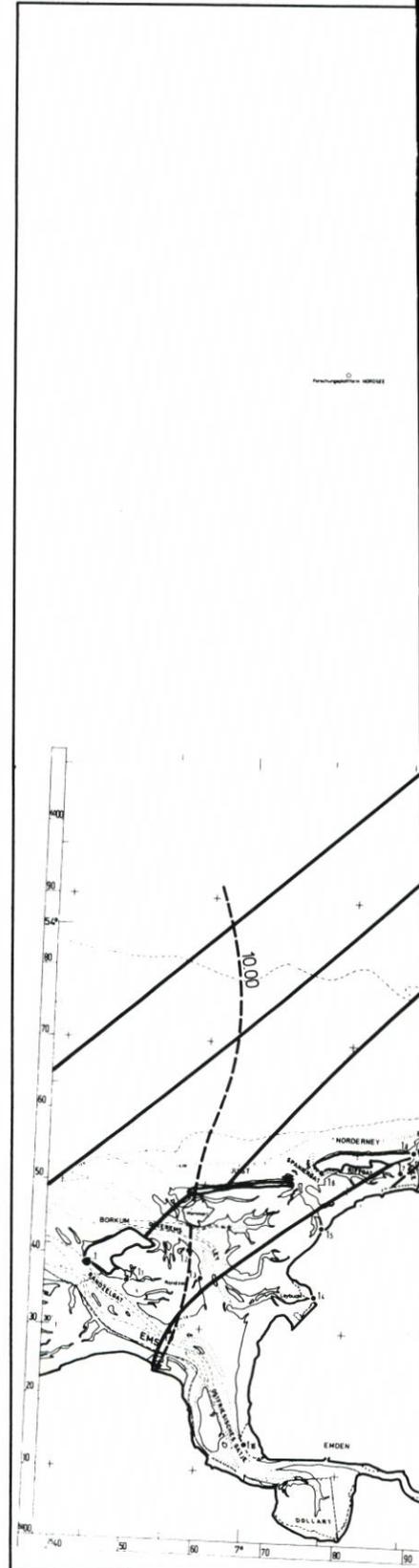
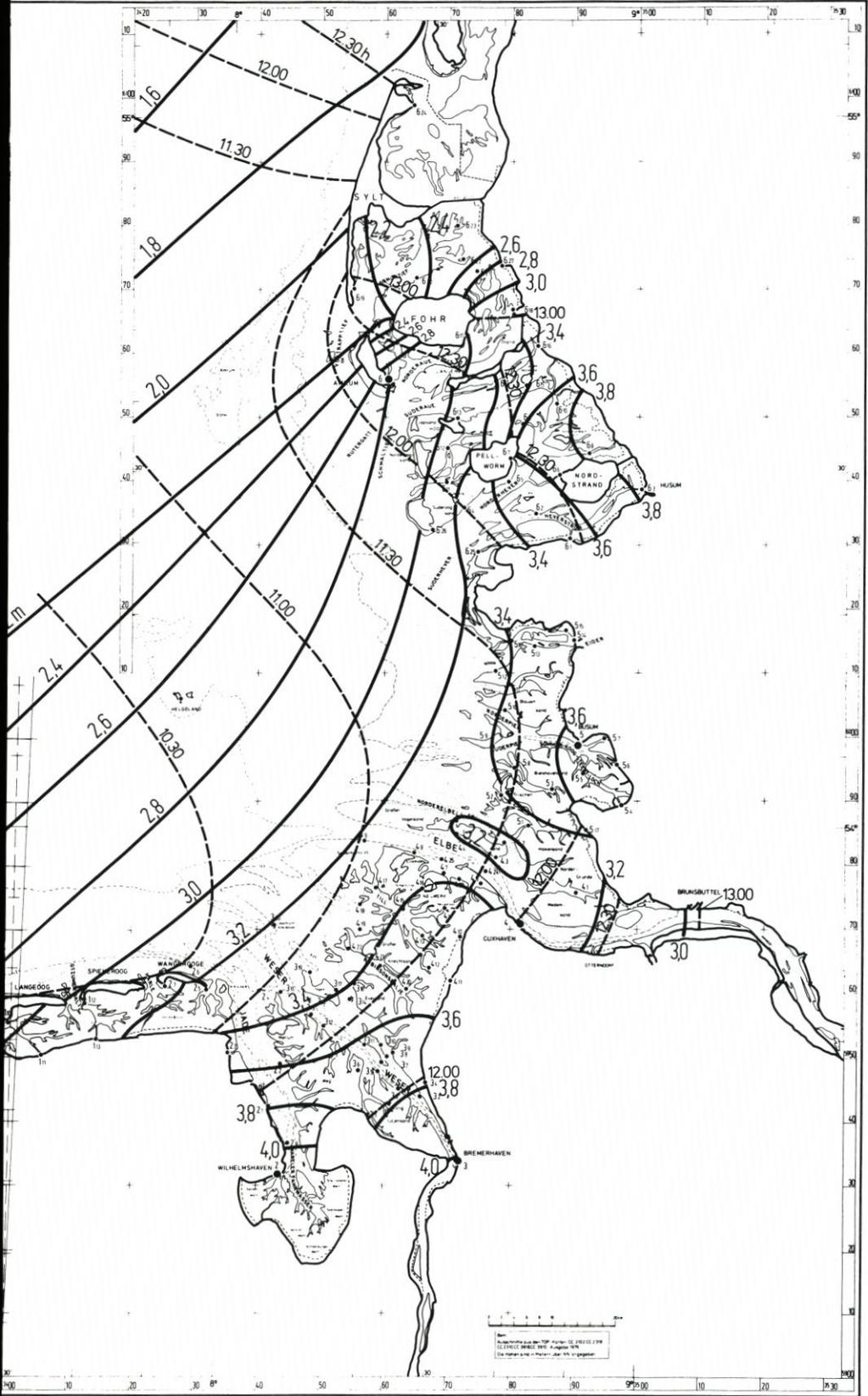


Abb. 2. Linien gleichen mittleren Springtidehubs (in m) und Linien gleicher mittlerer Zeitdifferenz (in Std.) zwischen Thw-Eintritt und Meridiandurchgang des Mondes bei Greenwich (nach Berechnungen des Deutschen Hydrographischen Instituts für 1978)



Unterlagen des DHI). Einige regionale Arbeiten beschäftigen sich mit den Mündungsgebieten von Ems, Weser und Elbe, und in verschiedenen Ämtern an der Küste wurden regional bezogene Arbeitsberichte zusammengestellt oder das Wissen auf andere Weise festgehalten. Es steht damit nicht allgemein zur Verfügung, und entsprechend gibt es auch keine Arbeit etwa über den Vergleich der Tideverhältnisse in den vielen Wattströmen, heißen sie nun Gat, Ee, Balje oder Loch. Versuche in dieser Richtung wurden hinsichtlich der Strömungsverhältnisse – ebenfalls im Rahmen eines KFKI-Projektes – bereits unternommen (SIEFERT et al., 1980 und 1983). Eine entsprechende, gar erweiterte Untersuchung der Wasserstände liegt bisher nicht vor. Daher wurde es als eines der wichtigsten Ziele angesehen, synoptische Angaben über die mittleren Tideverhältnisse machen zu können. Weil die meisten Hilfspegelaufzeichnungen – vor allem im Zusammenhang mit den KFKI-Vermessungsprogrammen 1974/76 und 1979/80 – in diese Zeit fallen, wurde mit dem

Bezugszeitraum 1975/79

ein Fünfjahresmittel gewählt. Nur von den Pegeln früherer I. Ordnung wurden diese Mittel den Gewässerkundlichen Jahrbüchern entnommen; für alle anderen genannten Pegel wurden sie berechnet. Entsprechend dem Verfahren von GÖHREN (1964) waren dazu Bezugspegel zu wählen. Nach Prüfung der Verlässlichkeit der Pegel wurden folgende Pegel als „Gerüst“ festgelegt:

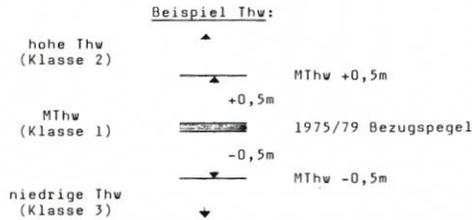
Nr.	Bezugspegel ¹⁾ Name	Gebiet mit Anschlußpegeln ²⁾	Bemerkungen
1	Borkum-Südstrand	Borkum bis Wangerooge	
2	Wilhelmshaven- Alter Vorhafen	Wangerooge bis Hoheweg	die Veränderung des PNP von NN – 5,013 m bis 1975 auf NN – 5,035 m ab 1976 wurde berücksichtigt
3	Bremerhaven- Doppelschleuse	Hoheweg bis Knechtsand	bei Windstau-Untersu- chungen wurde LT Alte Weser als Bezugspegel gewählt
4	Cuxhaven	Knechtsand bis Marnier Plate	
5	Büsum	Marnier Plate bis Eiderstedt	
6	Wittdün	Eiderstedt bis List	Husum ist wegen örtlicher Einflüsse und Randlage wenig geeignet als Bezugs- pegel

¹⁾ regional übergeordnete Stationen

²⁾ nachgeordnete Stationen, deren Werte statistisch mit denjenigen der Bezugspegel verknüpft wurden

2.3.2 Berechnung der MTnw- und MThw-Höhen

Zunächst wurden zwischen Bezugs- und Anschlußpegeln statistische Beziehungen der Thw- und Tnw-Höhen in der von GÖHREN angewendeten Klassifizierung in drei Stufen abgeleitet:



Somit gibt es für jeden Anschlußpegel drei Thw- und drei Tnw-Bereiche, deren Merkmale Angaben zu elementaren statistischen Größen wie der linearen Regression, der Korrelation, den Mittelwerten der Wasserstände und der Prüfstatistik sind. Auf diese Weise werden Tiden ohne und mit positivem oder negativem Windstau entsprechend der Klassifizierung erfaßt.

Anfangs hatte sich die Frage gestellt, ob es vertretbar wäre, den enormen Rechenaufwand, der sich bei Auswertung aller Wasserstandsdaten eines gewässerkundlichen Jahres zur Mittelbildung von MThw und MTnw ergeben würde, durch Bestimmung von Stichprobenmittelwerten und statistischen Kenngrößen ohne wesentliche Genauigkeitseinbuße zu reduzieren. Grundlegende Betrachtungen zeigten, daß sich bei rd. 150 ausgewählten Daten aus dem gewässerkundlichen Jahr (gleichmäßige Verteilung über Spring-, Nippverhältnisse und Tageszeit beachtet) eine Schätzung der MThw- oder MTnw-Werte mit der gewünschten Genauigkeit einstellt. Der Aufwand an Rechenarbeit konnte dadurch erheblich vermindert werden. Diese Entscheidung wurde getroffen, weil

- 1) die Standardabweichungen der MThw- und MTnw-Mittel, ob aus z. B. 150 oder 600 Meßwerten berechnet, ähnliche Beträge zwischen 20 und 25 cm lieferten. (GÖHREN bestimmt Standardabweichungen von 16 bis 24 cm aus einer wesentlich größeren Anzahl von Einzelwerten.) Die sich hieraus ergebende Änderung des Vertrauensbereiches für den Mittelwert von ± 2 cm (600 Daten) auf ± 4 cm (150 Daten) bei einer statistischen Sicherheit von 95 % wird bewußt hingenommen.
- 2) die Kriterien zur linearen Regression sich nicht wesentlich verschlechtern;
- 3) das Maß, das den linearen Zusammenhang der Variablen mißt, der Korrelationskoeffizient r , schon bei 30 Datenpunkten mit Werten von 0,90 bis 0,98 gut beschrieben wird. Somit liefert das Bestimmtheitsmaß $B = r^2$, das jenen Anteil der gesamten Summe der Quadrate angibt, der auf die Regression entfällt, Werte zwischen 0,8 und 0,97. (Werte nahe bei 1 bedeuten, daß die Meßwerte nahe bei der Regressionslinie liegen.)

In diesem Zusammenhang sollte noch erwähnt werden, daß sich auch für die MThw oder MTnw derjenigen Pegel, von denen Aufzeichnungen über weniger als $\frac{1}{2}$ Jahr vorliegen – hier wurden alle Datenpaare zur Auswertung benutzt –, bei Standardabweichung und Vertrauensbereich Größen wie unter 1) ergeben.

2.3.3 Berechnung hoher und niedriger T_{nw}- und T_{hw}-Höhen

Für die Bereiche von Wasserständen in den Klassen 2 und 3 (s. o.) wurden alle Meßdaten ausgewertet. Jedoch mußten die Berechnungen von Standardabweichungen und Vertrauensbereichen wegen der nicht unerheblichen Bandbreite der Einzelwerte bei hohen T_{nw} und T_{hw} und der wesentlich kleineren Bandbreite der Einzelwerte bei niedrigen T_{nw} und T_{hw} zu anderen Werten als bei den MT_{nw} und MT_{hw} führen.

Die Standardabweichungen und Vertrauensbereiche (stat. Sicherheit 95 %) der jeweiligen Mittelwerte berechnen sich in diesen Klassen bei durchschnittlich 55 Meßdaten zu:

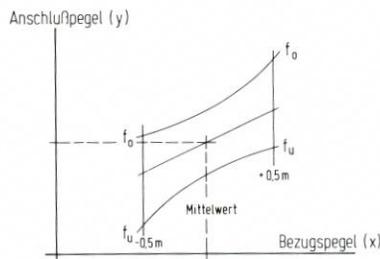
Klasse 2 (hohe T _{nw} , T _{hw})	
Standardabweichung	± 30 bis 55 cm
Vertrauensbereich	± 8 bis 15 cm
Klasse 3 (niedrige T _{nw} , T _{hw})	
Standardabweichung	± 12 bis 20 cm
Vertrauensbereich	± 4 bis 6 cm

Dazu sei folgende Anmerkung gestattet: In anderem Zusammenhang wurden Regressionen zwischen Wittdün und neun nordfriesischen Pegeln für jeweils 60 hohe Sturmfluten gerechnet. Es stellte sich dabei heraus, daß die Ergebnisse und der Vertrauensbereich fast identisch mit denen dieser Arbeit sind, obwohl dort weit mehr Daten verwendet wurden.

2.3.4 Konfidenzintervall für den Mittelwert

In dem vorhergehenden Abschnitt wurden Richtwerte zur Genauigkeitsabschätzung von Wasserstandsdaten beschrieben und durch Korrelationsuntersuchungen enge Abhängigkeiten von Wasserständen zwischen Bezugs- und Anschlußpegeln festgestellt. Jedoch läßt sich ohne Berücksichtigung des Regressionswertes aus den bisherigen Angaben die Bestimmtheit der errechneten Mittel nicht abschätzen, weil letztlich die Regression die Beziehungen zwischen Bezugs- und Anschlußpegel beschreibt.

Der Vertrauensbereich zum Mittelwert mit der Konfidenzzahl 95 %, in dem der unbekannte, aber wahre Regressionswert liegt, wurde nach den von STANGE (1971) und KREYSZIG (1977) erläuterten Verfahren mit den Grenzlinien $f_u(x)$ und $f_o(x)$ berechnet:



Aufgrund des umfangreichen Datenmaterials können auch hier lediglich repräsentative Werte beschrieben werden. Die errechneten Vertrauensbereiche haben nur für den jeweiligen untersuchten Meßbereich Gültigkeit. Folgende Vertrauensbereiche wurden ermittelt:

- 1) Mittelwert MT_{hw}, MT_{nw} (Anzahl 145 Daten; Standardabweichung für x und y um 25 cm; Regressionskoeffizienten von 0,9 bis 1,2)

Bereichsmittle (Mittel) $\cong \pm 1,2 \text{ cm}^*)$

Bereichsende

(0,50 m vom Mittelwert) $\cong \pm 2,5 \text{ cm}^*)$

2) Mittelwert für hohe Thw, Tnw; niedrige Thw, Tnw

(Anzahl 55 Daten; Standardabweichung für x und y bis 55 cm; Regressionskoeffizienten von 0,9 bis 1,3)

Mittelwert $\cong \pm 5,0 \text{ cm}^*)$

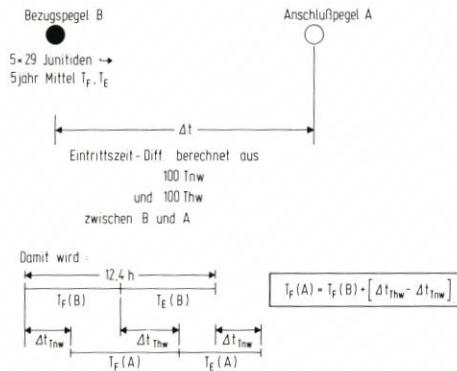
Die Regressionen erlauben ohne weiteres die Bestimmung der mittleren Spring- und Nipp-höhen, die allerdings in Tab. 2 nicht enthalten sind. Ein Beispiel mag die Brauchbarkeit zeigen, nämlich für den ungünstig liegenden Pegel Husum für 1975/79:

	SpThw m KN	SpTnw m KN	NpThw m KN	NpTnw m KN
Berechnung aus Regression über Wittdün	3,7	0,1	3,2	0,4
Angaben in Gezeitentafel	3,8	0,0	3,4	0,5

2.3.5 Berechnung der Flut- und Ebbdauern

Zur Bestimmung der Flut- und Ebbdauern (T_F , T_E) hätte ein ähnlicher Weg beschritten werden können. Aus Zeitmangel wie aus dem Wissen, daß die erste Junihälfte so gut wie in jedem Jahr weitgehend frei von meteorologisch bedingten Störungen ist, wurde die Berechnung dadurch wesentlich vereinfacht, daß individuell für jeden Bezugspegel jährlich Mittelwerte nur für diese Tiden bestimmt und dann zusammengefaßt als Fünfjahresmittel verwendet wurden.

Für die Anschlußpegel wurden die betreffenden T_F und T_E aus den fünfjährigen Mitteln des zugehörigen Bezugspegels und den zeitlichen Thw- und Tnw-Differenzen Δt zwischen den Bezugsorten abgeleitet:



*) Hiermit bestätigten sich die an die Regressionsfunktion geknüpften Erwartungen. Bei einer detaillierten Betrachtung der einzelnen Rechenschritte zur Bestimmung von Konfidenzintervallen des Mittelwertes zeigt sich deutlich die enge Verknüpfung der Bestimmungsfaktoren. Man kann weder von einem Korrelationswert nahe 1 noch von einem Regressionskoeffizienten um 1,2 oder 0,8 auf einen brauchbaren oder unbrauchbaren Mittelwert schließen.

Junimittel T_F und T_E an den Bezugspegeln

Bezugspegel	Junimittel					5jährige Juni- mittel 1975/79	
		1975 h	1976 h	1977 h	1978 h	1979 h	Mittel h
1 Borkum-Südstrand	T_F	6.04	5.57	6.00	5.54	6.01	6.00
	T_E	6.21	6.28	6.26	6.28	6.23	6.25
2 Wilhelmshaven- Alter Vorhafen	T_F	6.19	6.20	6.22	6.19	6.25	6.21
	T_E	6.06	6.06	6.04	6.04	6.00	6.04
3 Bremerhaven- Doppelschleuse	T_F	5.59	5.57	5.54	5.58	6.05	5.59
	T_E	6.26	6.29	6.32	6.24	6.21	6.26
4 Cuxhaven	T_F	5.38	5.36	5.38	5.42	5.46	5.40
	T_E	6.46	6.50	6.47	6.41	6.39	6.45
5 Büsum	T_F	6.24	6.25	6.21	6.24	6.26	6.24
	T_E	6.00	6.01	6.04	5.58	6.00	6.01
6 Wittdün	T_F	5.39	5.36	5.42	5.46	5.47	5.42
	T_E	6.45	6.49	6.44	6.39	6.38	6.43

Die Genauigkeit dieses Verfahrens wurde für LT Alte Weser geprüft. So zeigt die nachfolgende Tabelle die für die Jahre 1975 bis 1979 aus je 29 Junitiden bestimmten T_F und T_E sowie die auf zuvor beschriebenem Wege über die Eintrittszeitdifferenzen ermittelten Werte für 1975/79. Beide Berechnungsarten liefern praktisch gleiche Ergebnisse:

Flut- und Ebbedauern am LT Alte Weser 1975/79

		T_F h	T_E h
Berechnung aus 5×29 Junitiden		5.49	6.36
Berechnung aus Mittel 1975/79 und Δt über	Borkum	5.51	6.34
	Wilhelmshaven	5.48	6.37
	Bremerhaven	5.50	6.35
	Cuxhaven	5.48	6.37

Für diese Berechnungsart sind folgende statistische Kennzahlen zu erwarten:

statistische Sicherheit:	95 %
Standardabweichung:	rd. ± 14 min
Vertrauensbereiche:	± 5 min für 29 Wertepaare
	± 3 min für 100 Wertepaare

Einfacher wäre die gesamte Berechnung (bei geringerem Arbeitsaufwand), wenn in den Gewässerkundlichen Jahrbüchern auch T_F und T_E veröffentlicht wären.

Tab. 2. Hydrologische Daten 1975/79 für Küstenpegel (vgl. Abb. 1)

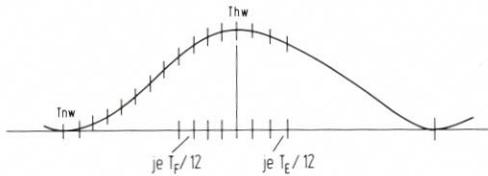
Pegel Nr. (Tab. 1)	HTlw cm NN - 5 m	HTnw cm NN - 5 m	MThb cm	T_F h	T_L h	T_F/T_L -	Windstau- kennzahl W -	mittl. Tidekurve vorhanden
1	599	371	228	6.00	6.25	0.94	1,00	x
1.0	638	325	303	6.07	6.18	0.97	0,97	x
1.1	604	367	237	6.08	6.17	0.98	0,96	
1.2	610	363	247	6.10	6.15	0.99	1,01	x
1.3	620	361	259	6.07	6.08	0.97	1,03	x
1.4	624	-	-	5.19	(7.06)	(0.75)	1,14	
1.5	619	361	258	5.59	6.26	0.93	1,09	x
1.6	613	369	244	6.00	6.25	0.94	1,01	x
1.7	622	-	-	5.31	(6.54)	0.80	0,98	x
1.8	618	370	248	5.46	6.39	0.87	1,00	x
1.9	621	-	-	5.32	(6.53)	(0.80)	1,02	x
1.10	629	362	267	6.04	6.21	0.96	0,96	x
1.11	633	359	274	6.11	6.14	0.99	1,04	x
1.12	626	354	272	5.55	6.30	0.91	0,95	x
1.13	641	-	-	6.04	(6.21)	(0.96)	1,07	
1.14	636	-	-	5.36	(6.49)	0.82	0,98	
1.15	624	378	246	5.53	6.32	0.90	1,07	x
1.16	624	341	283	5.53	6.32	0.90	1,04	x
1.17	612	357	255	5.57	6.28	0.92	0,97	x
2	670	293	377	6.21	6.04	1.05	1,00	x
2.1	650	311	339	6.15	6.10	1.01	0,95	x
2.2	646	315	331	6.10	6.15	0.99	0,94	x
2.3	646	-	-	5.48	6.37	0.88	0,91	x
2.4	637	338	299	5.54	6.31	0.90	0,88	x
2.5	634	344	290	5.53	6.32	0.90	0,90	x
2.6	638	358	280	5.49	6.36	0.88	0,85	x
2.7	634	358	282	5.59	6.26	0.93	0,87	x
2.8	662	298	364	6.18	6.07	1.03	0,95	x
2.9	673	-	-	-	-	-	0,98	
3	670	307	363	5.59	6.26	0.93	1.00	x
3.1	656	307	349	6.02	6.23	0.95	0,94	x
3.2	656	297	359	6.00	6.25	0.94	-	x
3.3	662	314	348	6.00	6.25	0.94	-	x
3.4	663	-	-	-	-	-	0,99	
3.5	653	308	345	6.00	6.25	0.94	-	x
3.6	660	317	343	5.56	6.29	0.92	-	x
3.7	652	314	338	6.02	6.23	0.95	-	
3.8	652	312	340	6.04	6.21	0.96	-	x
3.9	663	325	338	6.07	6.18	0.97	-	x
3.10	653	316	337	6.01	6.24	0.94	-	x
3.11	653	321	332	5.59	6.26	0.93	-	x
3.13	644	326	318	5.57	6.28	0.92	-	x
3.14	641	328	313	6.04	6.24	0.95	-	x
3.15	632	318	314	5.57	6.28	0.92	-	x
3.16	636	329	307	5.54	6.31	0.91	-	
3.17	629	314	315	6.02	6.23	0.95	-	x
3.18	630	319	311	6.01	6.24	0.94	-	x
3.19	625	320	305	5.53	6.32	0.90	-	x
3.20	627	342	285	5.50	6.35	0.89	0,87	x
4	645	346	299	5.40	6.45	0.84	1,00	x
4.1	644	336	308	5.49	6.36	0.88	1,03	x
4.2	640	340	300	5.47	6.38	0.87	0,98	x
4.3	641	347	294	5.42	6.43	0.85	0,96	x
4.4	642	346	296	5.46	6.39	0.87	0,93	x
4.5	639	337	302	5.52	6.33	0.90	0,94	x
4.6	641	333	308	6.05	6.20	0.96	0,98	x
4.7	645	338	307	5.53	6.32	0.90	0,94	x

Pegel Nr. (Tab. 1)	MThw cm NN - 5 m	MTrw cm NN - 5 m	MThb cm	T _F h	T _E h	T _F /T _E -	Windstau- kennzahl W -	mittl. Tidekurve vorhanden
4.8	634	335	299	5.50	6.35	0.89	0,91	X
4.9	635	340	295	5.51	6.34	0.89	0,85	X
4.10	645	-	-	-	-	-	1,01	
4.11	652	-	-	-	-	-	0,99	
4.12	650	324	336	6.04	6.21	0.96	0,95	X
4.13	646	329	317	6.06	6.19	0.97	0,93	X
4.14	646	326	320	5.58	6.27	0.92	0,98	X
4.15	643	330	313	6.02	6.23	0.95	0,90	X
4.17	635	331	304	5.53	6.32	0.90	0,88	X
4.18	641	340	301	5.59	6.26	0.93	0,87	X
4.19	642	336	306	5.57	6.28	0.92	0,88	X
4.20	652	330	322	6.12	6.13	1.00	0,93	X
4.21	646	328	318	6.09	6.16	0.98	0,91	X
4.22	640	334	306	6.00	6.25	-	0,89	X
4.23	642	337	305	5.56	6.29	0.92	0,95	X
4.24	640	338	302	5.49	6.36	0.88	0,93	X
4.25	637	335	302	5.51	6.34	0.89	0,94	X
5	654	325	329	6.24	6.01	1.06	1,00	X
5.1	651	334	317	5.44	6.41	0.86	1,06	X
5.2	644	340	304	5.51	6.34	0.89	0,95	X
5.3	652	325	327	6.04	6.21	0.96	1,23	X
5.4	663	315	348	6.38	5.47	1.15	1,01	X
5.5	657	322	335	6.26	5.59	1.08	1,27	X
5.6	656	322	334	6.23	6.02	1.06	1,04	X
5.7	660	323	337	6.27	5.58	1.08	0,99	X
5.8	646	330	316	5.57	6.28	0.92	0,96	X
5.9	638	327	311	6.07	6.18	0.97	1,09	X
5.10	642	329	313	6.07	6.18	0.98	1,05	X
5.11	640	333	307	6.07	6.18	0.97	0,95	X
5.12	636	334	302	5.43	6.42	0.85	0,96	X
5.13	647	336	311	5.30	6.55	0.80	1,00	X
5.14	649	337	312	5.27	6.58	0.78	1,10	X
5.15	650	336	314	5.27	6.58	0.78	1,06	X
5.16	645	335	310	5.47	6.38	0.87	1,01	X
6	613	354	259	5.42	6.43	0.85	1,00	X
6.1	646	318	328	5.57	6.28	0.92	1,14	X
6.2	642	326	316	6.05	6.20	0.96	1,12	X
6.3	656	311	345	5.57	6.28	0.89	1,24	X
6.4	624	325	299	5.55	6.30	0.91	1,10	X
6.5	631	312	319	6.31	6.12	1.00	1,12	X
6.6	639	310	329	6.08	6.17	0.98	1,16	X
6.7	638	-	-	(5.45)	(6.40)	(0.86)	1,10	
6.8	649	302	347	6.25	6.00	1.07	1,06	X
6.9	649	312	337	6.17	6.08	1.02	1,12	X
6.10	647	319	328	6.19	6.06	1.04	1,08	X
6.11	615	341	274	5.43	6.42	0.85	1,07	X
6.12	628	346	282	5.49	6.36	0.88	1,07	X
6.13	623	344	279	5.38	6.47	0.83	1,04	X
6.14	631	332	299	5.45	6.40	0.86	1,09	X
6.15	638	325	312	5.48	6.37	0.86	1,05	X
6.16	643	325	318	5.31	6.54	0.80	1,02	X
6.17	622	345	277	5.50	6.35	0.89	1,08	X
6.18	625	335	290	5.42	6.43	0.85	1,12	X
6.19	586	387	199	6.16	6.09	1.02	1,06	X
6.20	600	383	217	5.54	6.31	0.90	1,11	X
6.21	630	350	280	5.18	7.07	0.74	-	X

Pegel Nr. (Tab. 1)	MThw cm NN - 5 m	HTrw cm NN - 5 m	HThb cm	T _F h	T _E h	T _F /T _E -	Windstau- kennzahl W	mittl. Tidekurve vorhanden
6.22	608	376	232	5.31	6.54	0.80	-	X
6.23	616	385	231	5.03	7.22	0.69	1,14	X
6.24	573	396	177	6.17	6.08	1.02	1,02	X
6.26	613	332	281	5.40	6.45	0.84	-	X
6.28	(583)	(400)	183	5.24	7.01	0.77	-	
H16	-	-	265	5.36	6.49	0.82	1,07	
H 5	-	-	261	5.40	6.45	0.84	1,01	
H14	-	-	246	5.41	6.54	0.82	0,92	
H10	-	-	227	5.39	6.46	0.84	0,91	
H 3	-	-	221	5.37	6.48	0.83	1,05	
H 9	-	-	235	5.35	6.50	0.82	0,90	
H15	-	-	254	5.28	6.57	0.79	1,04	
H 8	-	-	266	5.37	6.48	0.83	1,00	
0	-	-	238	5.36	6.49	0.82	-	X
FPN	-	-	128	5.46	6.39	0.86	-	

2.3.6 Berechnung der mittleren Tidekurven

Nach den somit für 1975/79 festgelegten MTrw, MThw, T_F und T_E wurden von den einzelnen Pegeln entsprechend dem Verfahren von LÜDERS (1950) 20 Tiden ausgewählt, deren Scheiteldaten den Mittelwerten möglichst nahekommen, d. h. Toleranzen von ± 10 cm und ± 20 min aufweisen. Zu etwa 70 % konnten ganze Kurven (von Tnw bis Tnw) verwendet werden. Die restlichen Daten mußten von separaten Flut- und Ebbeästen genommen werden.



Diese Tiden wurden getrennt im Flut- und im Ebbeast in je 12 Teile gleicher Dauer geteilt, dann die Teilwerte der Höhen gemittelt. Über die Genauigkeiten geben die statistischen Mittel Aufschluß, nämlich für 10 willkürlich herausgegriffene mittlere Tidekurven im Untersuchungsbereich für den Mittelwert jeden Teils eine Standardabweichung mit dem dazugehörigen Vertrauensbereich wie folgt: (Tab. auf S. 20 oben). Die so bestimmtem 24 Punkte dienen als Stützpunkte zur Konstruktion der Tidekurven.

2.3.7 Berechnung der Windstau-Kennzahlen

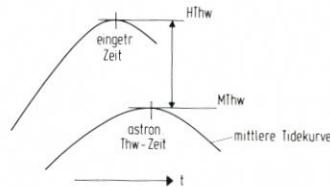
Kennzeichnend für die einzelnen Pegel ist auch eine Windstau-Kennzahl, die sich aus dem Verhältnis der Differenzen einzelner Scheitelwasserstände der Klasse >0,5 m über MThw zum MThw für Anschluß- und Bezugspegel ergibt:

$$W = \frac{HThw_A - MThw_A}{HThw_B - MThw_B}$$

Teil	Flut		Teil	Ebbe	
	Stand.- Abw. cm	Vertrauens- bereich cm		Stand.- Abw. cm	Vertrauens- bereich cm
Tnw	± 7,1	± 3,3	Thw	± 6,3	± 2,9
1/12	± 7,2	± 3,4	1/12	± 6,2	± 2,9
2/12	± 7,4	± 3,5	2/12	± 6,2	± 2,9
3/12	± 9,2	± 4,3	3/12	± 6,0	± 2,8
4/12	± 11,2	± 5,2	4/12	± 6,0	± 2,8
5/12	± 10,9	± 5,1	5/12	± 6,7	± 3,1
6/12	± 9,7	± 4,5	6/12	± 7,2	± 3,4
7/12	± 7,8	± 3,6	7/12	± 7,4	± 3,5
8/12	± 6,7	± 3,1	8/12	± 7,3	± 3,4
9/12	± 6,2	± 2,9	9/12	± 7,4	± 3,5
10/12	± 6,3	± 2,9	10/12	± 6,0	± 2,8
11/12	± 6,5	± 3,0	11/12	± 5,8	± 2,7
Thw	± 6,3	± 2,9	Tnw	± 6,0	± 2,8

Dazu müssen natürlich dieselben Tiden für Anschluß- und Bezugspegel verwendet werden.

In diesem Zusammenhang sollte noch einmal darauf hingewiesen werden, daß der Begriff „Windstau“ sehr unterschiedlich verwendet wird. Bei der Bildung obigen Verhältnisses wird die häufig benutzte zeitungleiche Höhendifferenz gewählt:



Statt der mittleren könnte auch die zugehörige Höhe der astronomischen Tide genommen werden. Das gilt ebenso für den im nächsten Kapitel erläuterten Windstau als Differenz zwischen eingetretenen und mittleren Tidekurven.

Da die Pegel zu unterschiedlichen Zeiten aufgezeichnet haben, ist das HThw-Kollektiv nicht homogen. So war zu prüfen, ob die Aussagekraft von W mit Höhe und Anzahl der HThw ($n = 6$ bis 90) stark schwankt. Es zeigte sich, daß die grundsätzlichen Aussagen und Schlüsse in sich und physikalisch logisch sind und damit nur sekundär von der Datenmenge abhängen.

2.4 Windstau-Kennlinien

Windstauuntersuchungen als Analysen von Differenzkurven aus eingetretenen und erwarteten Tiden bilden heute u. a. die Basis der Vorhersagen für den Hamburger Sturmflutwarndienst. Dabei enthalten diese Windstaukurven Anteile aus anderen Einflüssen (etwa

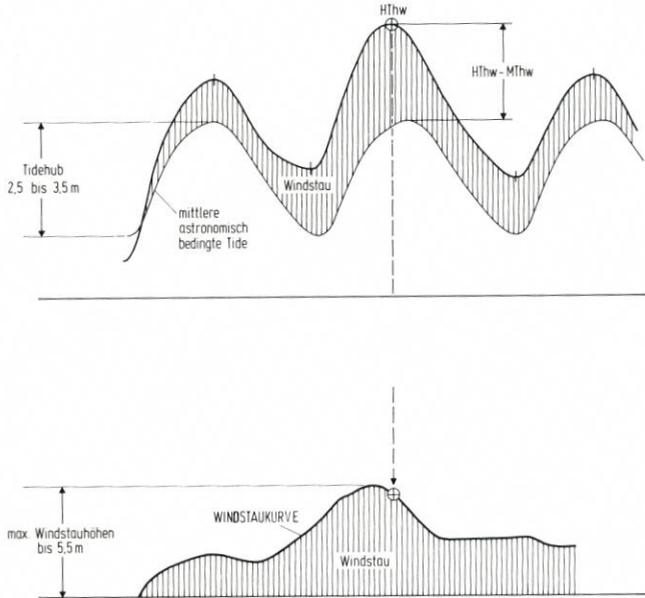


Abb. 3. Definition „Windstaukurve“

10 %), was aber die Verwendungsmöglichkeit nicht schmälert (Abb. 3). Hier wird erstmals der Weg beschränkt, normierte sog. Windstau-Kennlinien als Mittel eines größeren Kollektivs zu bestimmen:

$$w(t) = \text{Tidekurve} - \text{mittl. Tide}$$

Die Kennlinie über die Tidedauer wird dann zu

$$k(t) = \frac{w(t)_A}{w(t)_B}$$

Dabei wird die Kennlinie $w(t)_B$ um die T_{nw} -Eintrittszeit gegenüber $w(t)_A$ verschoben, so daß die örtlichen astronomischen T_{nw} -Zeiten übereinstimmen.

Der Konstruktion von Windstau-Kennlinien liegen folgende Überlegungen zugrunde:

Es ist zu erwarten, daß der Windstau bei konstantem Windfeld umgekehrt proportional zur Wassertiefe wächst. Das gilt mit hinreichender Genauigkeit auch dann noch, wenn man berücksichtigt, daß sich eine Windstaukurve, wie sie auf Abb. 3 gezeigt ist, zusammensetzt aus Anteilen, die von Windeinfluß (dominierend), Luftdruck- und Temperatureinflüssen, astronomischen Wirkungen, Eigenschwingungen des Meeres und sog. Fernwellen herrühren.

Es gibt im Flachwasserbereich vor unserer Küste jedoch offenbar einen dominierenden Parameter, dessen Einfluß denjenigen der Wassertiefe überdeckt, und zwar die jeweilige geographische Lage und topographische Situation an den einzelnen Stationen. Sie bedingt von Ort zu Ort unterschiedliche Windstaucharakteristika, die es zu erfassen und zu deuten gilt. Ändert sich die Topographie, etwa durch Verlagerung von Rinnen und Sänden, oder wird die Küstenlinie verlegt, etwa durch Vordeichungen, so sind Folgen für die Windstaucharakteristik zu erwarten.

Der Einfluß der Topographie auf die Windstauentwicklung nimmt mit zunehmender Wassertiefe ab. Bei konstantem Windfeld wäre also an einer in großer Wassertiefe gelegenen

Station der Windstau über die Tide konstant, wenn nicht noch andere Einflüsse wirkten. Solche meteorologischen Verhältnisse sind in der südlichen Nordsee jedoch nicht zu erwarten; außerdem gibt es länger betriebene Pegelstationen auch nur in Küstennähe. Um die Einflüsse durch meteorologische Veränderungen und die Tide (der Tidehub beträgt im Küstenvorfeld 2 bis 2,5 m) klein zu halten, werden daher die Windstau-Kennlinien als Funktionen relativer, phasengleicher Änderungen an einer Station A zu einem Referenzpegel B berechnet.

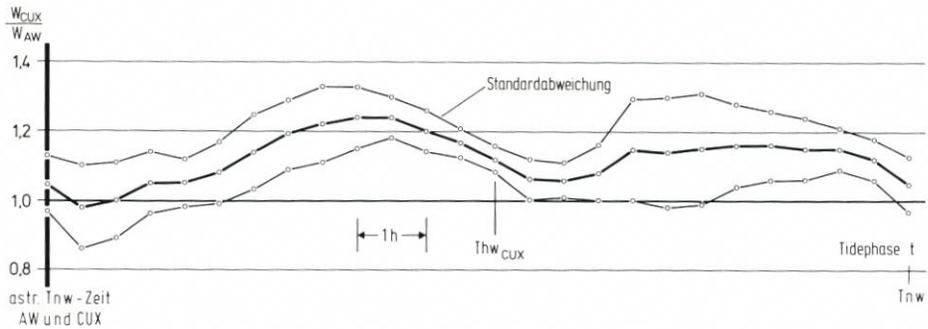


Abb. 4. Windstau-Kennlinie Cuxhaven. Als Referenzpegel wird Alte Weser (AW) verwendet

Abb. 4 zeigt am Beispiel Cuxhaven, daß sich eine charakteristische Kennlinie ergibt. Die angegebene Standardabweichung deutet an, daß diese weitgehend unabhängig von Windstauhöhe und Windverhältnissen gilt. Auffällig ist die äußerst kleine Standardabweichung um die Hochwasserzeit, wo also sehr enge Beziehungen zwischen den Windstauhöhen an beiden Orten gelten. Die große Streuung bei Ebbe, wenn ein stromauf geneigtes Windstaugefälle sich gegen den Strom fortpflanzt, ist wesentlich auf örtliche Einflüsse, die lang- und die kurzfristige Windentwicklung zurückzuführen.

Aus dem Verlauf der Linien für andere Orte kann auf lokale und regionale Einflüsse geschlossen werden, d. h., diese Linien gestatten, die Umgebung und ihre Einflüsse zu parametrisieren und in den weiteren Analysen zu berücksichtigen.

Die Windstau-Kennzahl W nach Kapitel 2.3.7 ist entsprechend der unterschiedlichen Definitionen von $w(t)$ und W nicht auf der Kurve $k(t)$ zu erwarten; sie muß allerdings im statistischen Mittel in der Nähe dieser Kurve um die astronomische Thw -Eintrittszeit liegen. Sie ist also als Hinweis auf die absolute Höhe der Kurve $k(t)$ um die Thw - bzw. die $HThw$ -Zeit, die entscheidende Tidephase, wichtig.

2.5 Zur Tideentwicklung in diesem Jahrhundert

Die Nordsee ist ein Randmeer des Atlantischen Ozeans. Die in der Deutschen Bucht gemessenen Tiden laufen nach allgemeiner Auffassung aus dem Atlantik unter Umformungen in die Nordsee ein, werden hier durch die Topographie weiter verformt und pflanzen sich vor unserer Küste schließlich von West nach Ost und dann von Süd nach Nord fort. Die mittleren Tideverhältnisse sind bisher nur hinsichtlich der Wasserstände durch Dauermessungen bekannt; die Strömungen dagegen wurden und werden durch Messungen nur sporadisch und punktuell erfaßt. Die Tideentwicklung kann also nur über die Wasserstände und davon leider meist nur über die Scheitelwerte diskutiert werden. Ein Schritt zur Erweiterung unserer

Kenntnisse ist die Verwendung numerischer Modelle, deren Qualität allerdings auch wieder von den Eingangswerten abhängt.

Daten zur Entwicklung bis einschließlich 1980 enthält eine neue Arbeit (SIEFERT, 1982), wenn sie sich auch schwerpunktmäßig mit den Ästuaren beschäftigt. Immerhin geht daraus hervor, daß sich

- die MThw vor den Ems-, Weser- und Elbemündungen seit 1900 erhöht haben (als Ergebnis des säkularen Meeresspiegelanstiegs);
- die MTnw in denselben Gebieten von 1900 bis 1970 kaum verändert haben und seitdem deutlich gefallen sind;
- die MTnw-Differenzen Borkum-Cuxhaven seit 1930 erhöht haben;
- der MThb an den Küstenpegeln überall stark vergrößert hat.

Letztere Tatsache wird von ROHDE (1982) für den Pegel Helgoland eindrucksvoll bestätigt.

Damit war Ziel der vorliegenden Arbeit auch, durch Regressionen und Vergleiche von Pegelaufzeichnungen in und weiterab von Flußmündungen festzustellen, ob die Veränderungen in den Flußmündungen fluß- oder nordseebedingt entstanden. Darüber hinaus sollten Analysen der mittleren Tideverhältnisse einiger Pegel (gewählt wurden Norderney, Wilhelmshaven, Cuxhaven, Hörnum und List) im 1., 4. und 7. Jahrzehnt dieses Jahrhunderts Aufschluß über säkulare Trends geben.

Die Daten dieser fünf Pegel wurden für die Zeiten 1906/10, 1918/19 und 1931/35 methodisch wie für 1975/79 aufbereitet, soweit die Unterlagen dies gestatteten.

3. Ergebnisse

3.1 Mittlere Tideverhältnisse 1975/79

3.1.1 Allgemeine Übersicht

Die Auswertung der Daten an den Bezugs- und Anschlußpegeln ermöglicht die Darstellung der mittleren Tideverhältnisse in einem zweidimensionalen Bild für die Fläche zwischen Borkum, Helgoland, Sylt und der Küste. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 bis 9 eingetragen. Sofern Linien gleicher Werte unsicher sind, ist dies durch Strichelung erkennbar. Die Darstellungen für MThw, MTnw und MThb sind aufeinander abgestimmt und widerspruchsfrei. Um dies - zugleich mit einem optisch gefälligen und physikalisch sinnvollen Bild - zu erreichen, wurde der PNP Helgoland um 20 cm höher angesetzt als im Gewässerkundlichen Jahrbuch. Höhenverschiebungen bis hin zu derselben Größe ergaben sich zwingend auch noch für vier weitere Pegel aufgrund des dichten Netzes (Abb. 1) und des logischen Verlaufes der Linien auf Abb. 5 bis 7. In zwei Fällen bestätigte eine nachträgliche Prüfung durch das zuständige Amt die getroffenen Maßnahmen.

Abb. 5 zeigt ein Bild mit relativ gleichmäßig von West nach Ost ansteigenden MThw-Höhen, wobei der Einfluß des flachen Küstenvorfeldes und auch der Flußmündungen erkennbar ist. Nach Norden hin sind die MThw-Höhen etwa bis Eiderstedt gleich hoch, um sich nördlich dieser Halbinsel in zwei Bereichen unterschiedlich auf dem Weg zur Küste hin zu entwickeln: Südlich der Linie Amrum-Langeneß-Küste erreichen sie wesentlich höhere Werte als nördlich davon.

Die Linien gleicher MTnw auf Abb. 6 sind zur Gewährleistung der Übersicht auch über die (trockenfallenden) Wattflächen und die Inseln hinweg angedeutet. Sie sind wesentlich stärker von der Topographie abhängig und daher stärker gekrümmt als die Linien gleicher

MThw. Deutlich wird dabei aber, daß generell in den Wattprielen die Tnw zur Küste hin abfallen, daß diese Erscheinung auch in der Jade auftritt, in Ems-, Weser- und Elbemündung allerdings durch das oberhalb anschließende Tidevolumen verhindert wird.

Abb. 7 gibt für die Linien gleicher MThb einen sehr ruhigen Verlauf wieder, wie er aus den Abb. 5 und 6 entwickelt wurde. Danach steigt diese Größe vor der Küste von West nach Ost gleichmäßig von 250 bis 350 cm an bis zur Wesermündung, erreicht in der Dithmarscher Bucht und hinter Nordstrand noch Werte über 340 cm, nimmt aber bis östlich von Föhr auf 290 cm und schließlich bis Hörnum auf 200 cm ab.

Die Eintrittszeit-Differenzen der MThw gegen Borkum auf Abb. 8 sind westlich von Sylt wegen fehlender Messungen den Unterlagen des DHI (Abb. 2) angepaßt worden. Die Daten im Küstenvorfeld zeigen starke Verzögerungen der Eintrittszeiten im Flachwasser, die z. B. zu Unterschieden von 20 min in den Thw-Zeiten vor und hinter den Ostfriesischen Inseln führen. Die Verzögerungen werden aber auch im Jade-Weser-Elbe-Gebiet und vor der schleswig-holsteinischen Küste deutlich. Generell setzt diese Erscheinung etwa bei Wassertiefen von 15 m unter MThw ein.

Die Eintrittszeit-Differenzen der MTnw verdeutlichen auf Abb. 9 für das ostfriesische Küstenvorfeld dieselbe Entwicklung wie beim MThw. Auch von der Jade bis zur Außenelbe gelten diese Aussagen für die MTnw-Zeiten. Von der Süderpiep bis zum Hörnumtief entwickeln sich dagegen die MTnw-Eintrittszeiten ganz anders, was dann zwangsläufig zu stärkeren Variationen der Flut- und Ebbedauern führt.

Schließlich zeigt Abb. 10 die Verhältnisse T_F/T_E mit dem erstaunlichen Ergebnis, daß diese in der südöstlichen Nordsee keineswegs bei 1, sondern zwischen 0,8 und 0,9 liegen. Die Tidekurven sind also nirgends symmetrisch, sieht man von wenigen küstennahen Gebieten ab.

3.1.2 Regionale Besonderheiten

Von der Ems bis zur Jade verlaufen hinter den Ostfriesischen Inseln die Linien gleicher MTnw, MThw und damit auch MThb fast parallel von WSW nach ONO mit von den Inseln emsaufwärts und küstenwärts

- um rd. 1 cm je km fallenden MTnw (von 360 auf 330 cm NN - 5 m an der Küste von West nach Ost fallend),
- um rd. 1 cm je km steigenden MThw (von 620 auf 640 cm NN - 5 m an der Küste von West nach Ost zunehmend),
- um rd. 2 cm je km zunehmenden Tidehüben von 260 auf 310 cm anwachsend).

Die Eintrittszeit-Differenzen der MTnw und MThw gegen Borkum sind in diesem Gebiet fast identisch, was auf Abb. 10 zu weitgehend konstanten Verhältniswerten T_F/T_E zwischen 0,90 und 0,98 mit wenigen niedrigeren Werten führt. Allerdings ergeben sich daraus dennoch - wie später kommentiert wird - interessante Hinweise auf die Strömungsverhältnisse, die wiederum eine Verfeinerung der Linien von Abb. 8 und 9 zuließen, auf die hier zum Zwecke der Übersichtlichkeit aber verzichtet wurde.

Um rd. 20 min gegen die Tide nördlich der Inseln verzögert finden wir hier also sehr einfache, klare Tideverhältnisse vor.

Sehr viel komplizierter laufen die Tiden zwischen Jade und Eiderstedt ab, weniger durch Füllung und Leerung des Jadebusens als vielmehr durch die Vorgänge in Weser, Elbe und auf den zwischenliegenden Watten: Die Ebbwassermengen beider Ströme führen in den nördlichen Bereichen von Außenweser und Außenelbe zu MTnw-Höhen, die rd. 1 dm höher als in deren näherer Umgebung sind, obwohl die MTnw gleichzeitig eintreten.

Hier bleiben also zu dieser Tidezeit seitliche Gefälle bestehen, ohne daß Trennungen durch Bänke oder Sände gegeben sind. Auch die MThw weisen in diesen Gebieten Quergefälle auf, allerdings in umgekehrter Richtung. So entstehen Zonen mit besonders niedrigem Tidehub, was eindrucksvoll durch das enge Pegelnetz im Außenebegebiet zu belegen ist: Nördlich und südlich der Nordrinne erreichen die MThb Werte deutlich über 300 cm, von See her in dieser Rinne bis oberhalb von Brunsbüttel jedoch nirgends.

In Jade und Weser steigen dagegen – trotz der og. Störungen – die MThb gleichmäßig von rd. 300 auf über 360 cm an. Mit 377 cm wird in Wilhelmshaven der Höchstwert erreicht; hier liegt mit 293 cm NN – 5 m auch das tiefste MTnw.

Die Linien gleicher Eintrittszeiten verlaufen zwischen Jade und Elbe etwa in SW-NO-Richtung, wobei in den Prielen örtlich starke Abweichungen erkennbar werden. Dagegen treten zwischen Elbe und Eiderstedt die MTnw von S nach N fortschreitend, die MThw von W nach O fortschreitend ein. Dies deutet auf komplizierte Tideverhältnisse hin, was durch die MTnw-Höhen zwischen 320 und 340 sowie die MThw-Höhen zwischen 630 und 660 cm NN – 5 m gar nicht zum Ausdruck kommt, wohl aber durch die T_F/T_E -Werte zwischen 0,78 und 1,08.

In den Wattströmen zwischen Eiderstedt und Sylt entwickeln sich die Tiden sehr unterschiedlich und kompliziert. Inmitten dieses Gebietes bildet zudem die Verbindung Dagebüll–Oland–Langeneß eine deutliche Trennungslinie zwischen den mittleren Tideverhältnissen in Süderhever/Norderhever/Süderau einerseits und Norderaue/Hörnuntief andererseits*). Südlich dieser Linie steigen die MThw gleichmäßig von 610 auf 650 cm NN – 5 m von W nach O an. Der Abfall der MTnw von 350 auf 310 cm NN – 5 m findet nördlich und südlich Pellworms auf kürzerer Strecke als bei Langeneß und vor Eiderstedt statt, was dort dann auch zu einem schnelleren Anstieg der MThb führt, die aber dennoch etwa gleichmäßig von W nach O wachsen.

Die besonderen Strömungsverhältnisse zwischen Pellworm und der Küste werden an den unterschiedlichen MThw- und MTnw-Eintrittszeiten deutlich, die zu T_F/T_E -Werten über 1,0 südlich und um 0,85 nördlich des Wattes führen.

Die Tideverhältnisse zwischen Norderaue und Hörnuntief unterscheiden sich grundsätzlich von denen des übrigen deutschen Küstenvorfeldes: Die MTnw steigen von SO nach NW bis zu 30 cm auf 4 km an; die MThb nehmen dabei bis zu 50 cm auf 4 km ab. Im Zwickel zwischen Hindenburgdamm und Küste treten die MThw und MTnw später als sonst vor unserer Küste ein. Die Werte T_F/T_E (über 0,85 in der Norderaue, unter 0,80 im Hörnuntief) wie die Reststromverhältnisse (SIEFERT et al., 1980) zeigen, daß diese Wasserstände zum Füllen des Oberlaufes des Hörnuntiefs von S nach N mit starkem Reststrom führen. Die Auswirkungen auf den Tideablauf zwischen Amrum, Föhr und der Südspitze Sylts konnten in den Abb. 5 bis 10 nur skizziert werden.

Die mittleren Tideverhältnisse in der inneren Deutschen Bucht zwischen Borkum, Helgoland, Sylt und den küstennahen Inseln und Sänden müssen nach Daten nur weniger Pegel konstruiert werden (Borkum, Wangerooge Nord, LT Alte Weser, Scharhörnriff, Süderoogsand, Wittdün, Helgoland), wobei letzterer nicht an das NN-Niveau angeschlossen ist. Um die Aussagen möglichst gut abzusichern, wurden Daten von neun Hochseepiegeln, die im Herbst 1981 im sog. DEBEX-Programm liefen, mit herangezogen (WIESE, 1982). Aber auch sie waren der Höhe nach nicht angeschlossen.

Die Ergebnisse gestatten die Konstruktion von Linien gleicher MThb, bedingt auch

*) Der Bau der Verbindungsdämme Küste–Oland–Langeneß bis 1899 muß danach ganz erhebliche Auswirkungen auf die Tideverhältnisse gehabt haben, wie auch schon FISCHER (1938) anführt.

Linien gleicher MThw (in cm NN - 5 m)

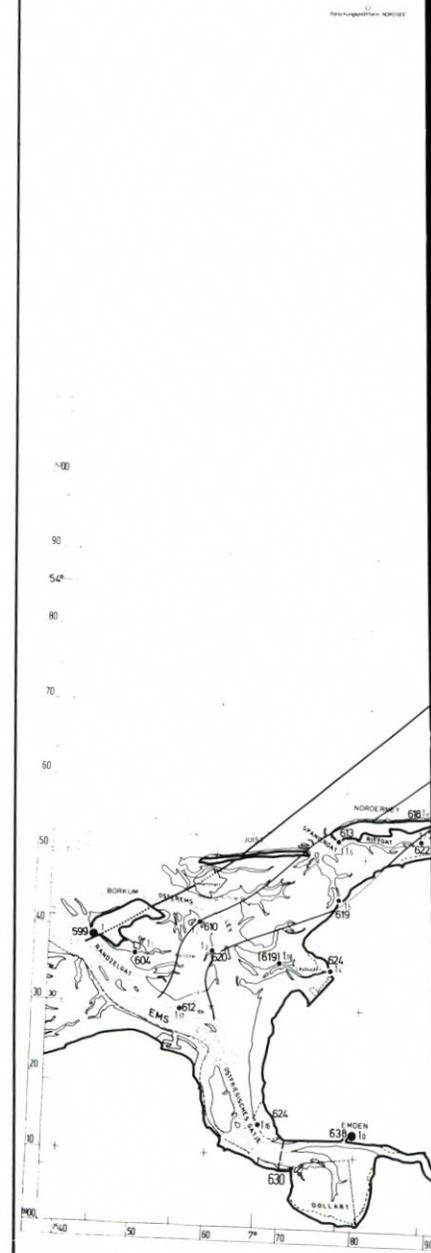
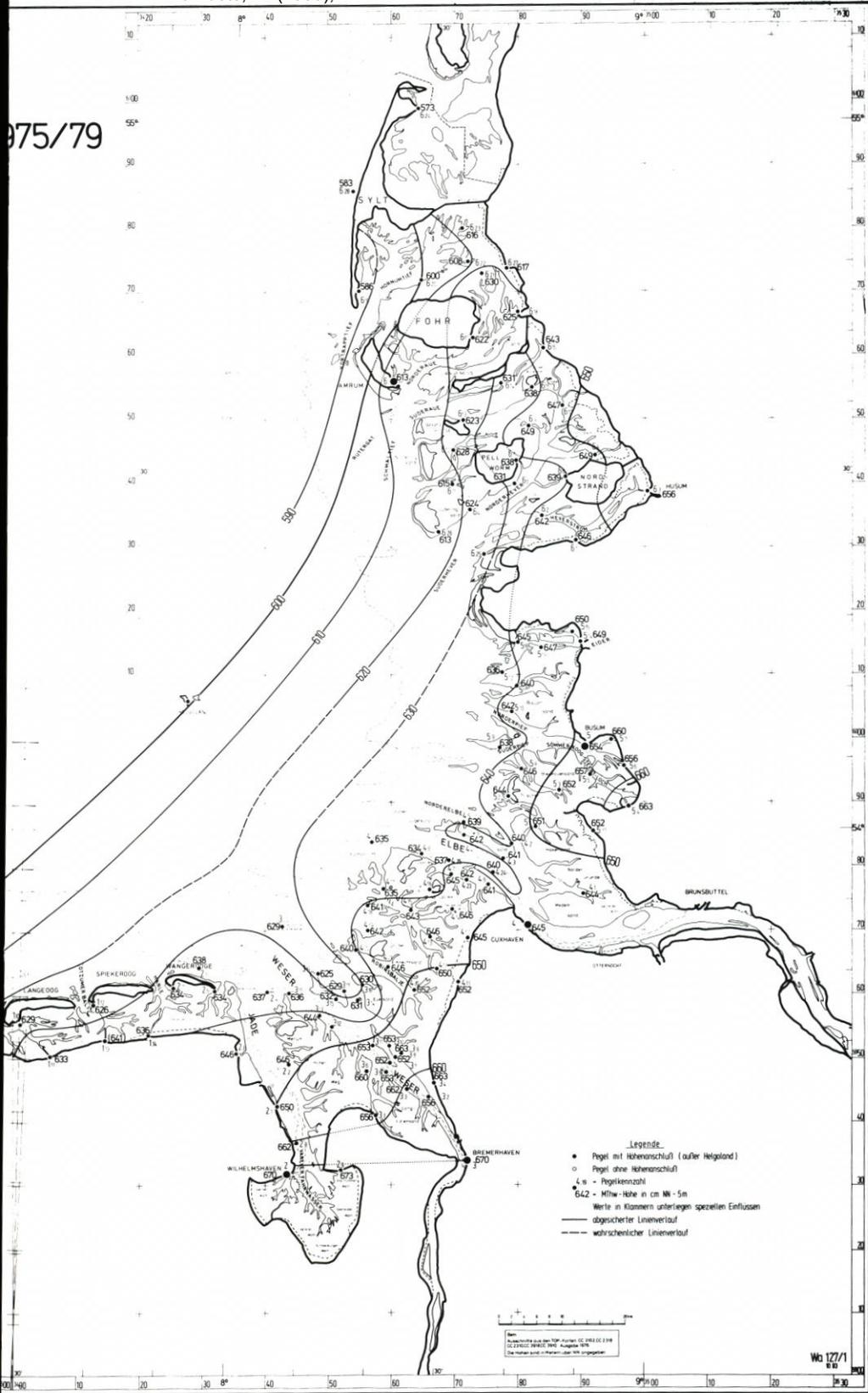


Abb. 5. Linien gleicher MThw 1975/79, angegeben in cm NN - 5 m

075/79



Linien gleicher MTnw (in cm NN - 5m)

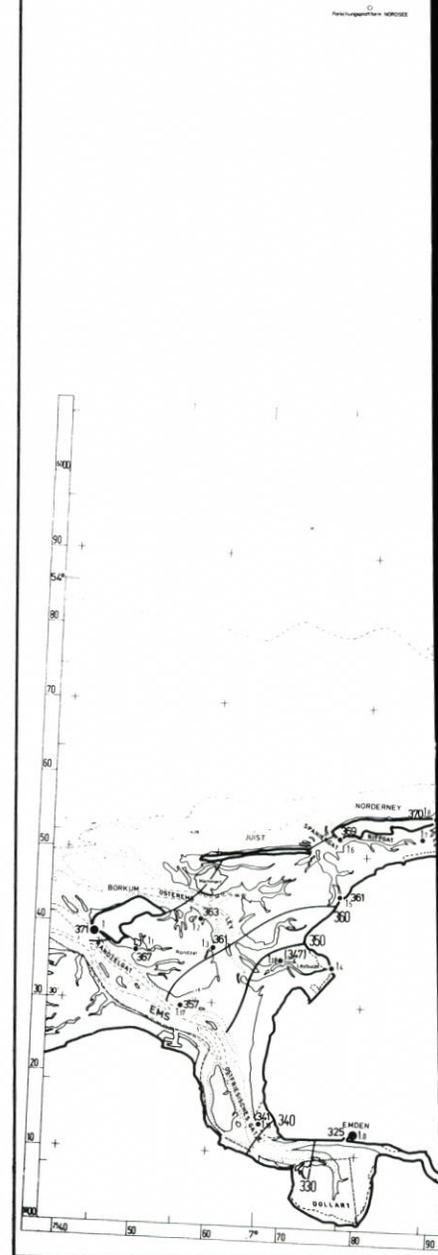
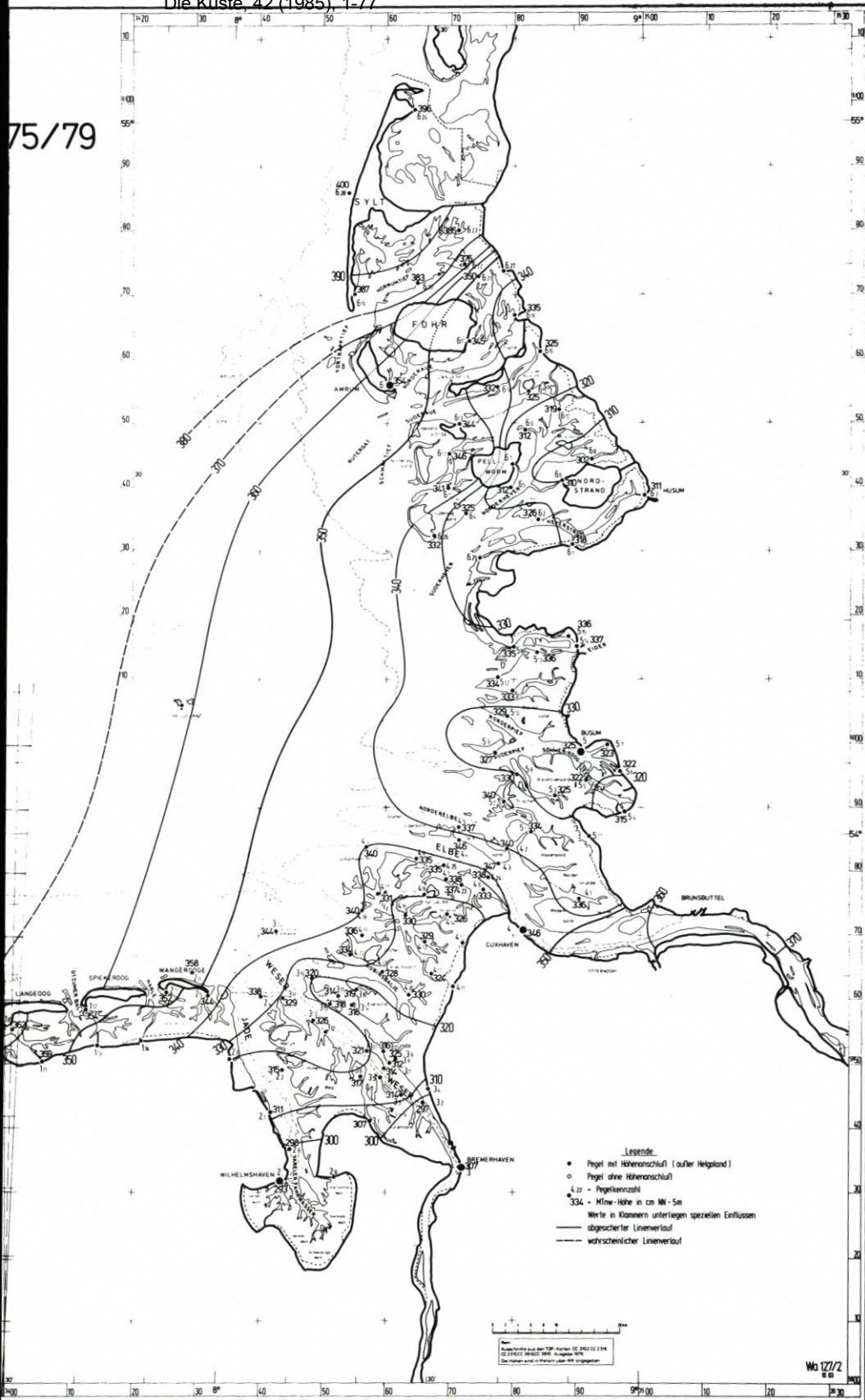


Abb. 6. Linien gleicher MTnw 1975/79, angegeben in cm NN - 5 m. (Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit sind die Linien auch über die trockenfallenden Wattflächen gezeichnet)

75/79



Linien gleicher MThb
(in cm)

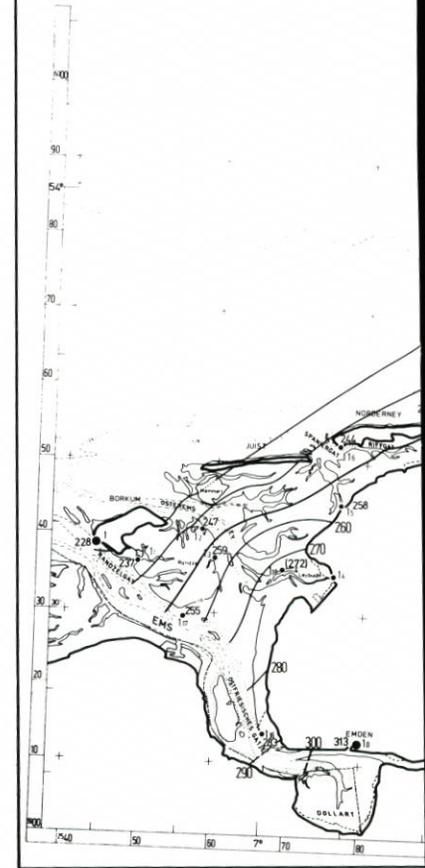
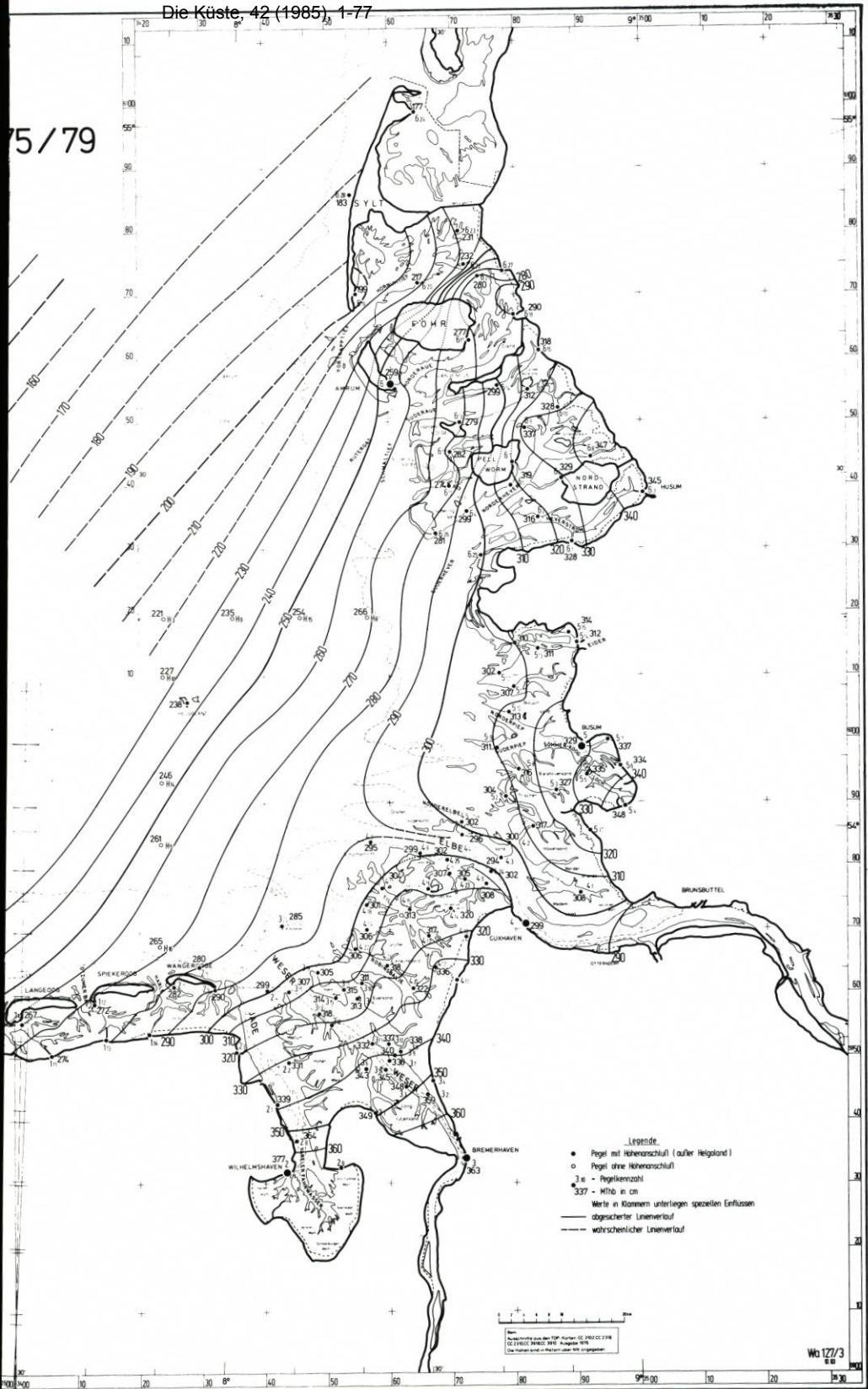


Abb. 7. Linien gleicher MThb 1975/79, angegeben in Zentimetern. (Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit sind die Linien auch über die trockenfallenden Wattflächen gezeichnet)

75/79



- Legende
- Pegel mit Höhenanschl. (außer Helgoland)
 - Pegel ohne Höhenanschl.
 - 37 - Pegelkennzahl
 - 337 - Höhe in cm
 - Werte in Klammern unterliegen speziellen Einflussn
 - abgesetzter Linienerlauf
 - wahrscheinlicher Linienerlauf

Koordinaten sind nach T.M.F. System (D 3023) 1976
 DATUM: PARISER MERIDIAN 1976
 Die Höhen sind in Meter über NN angegeben.

Wa 127/3
8/8

Linien gleicher Thw - Eintritts
(nach Eintrittszeit in Bor

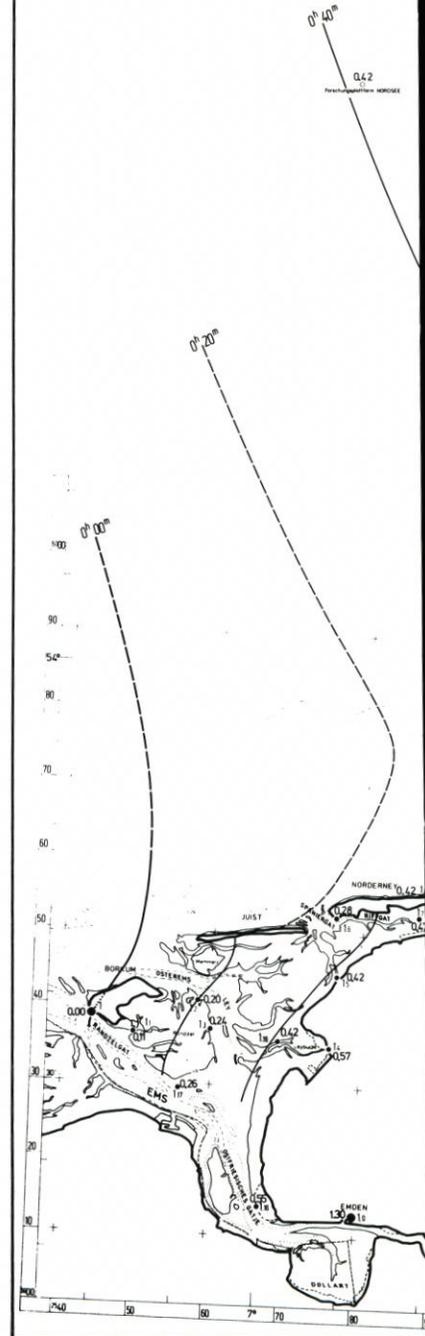
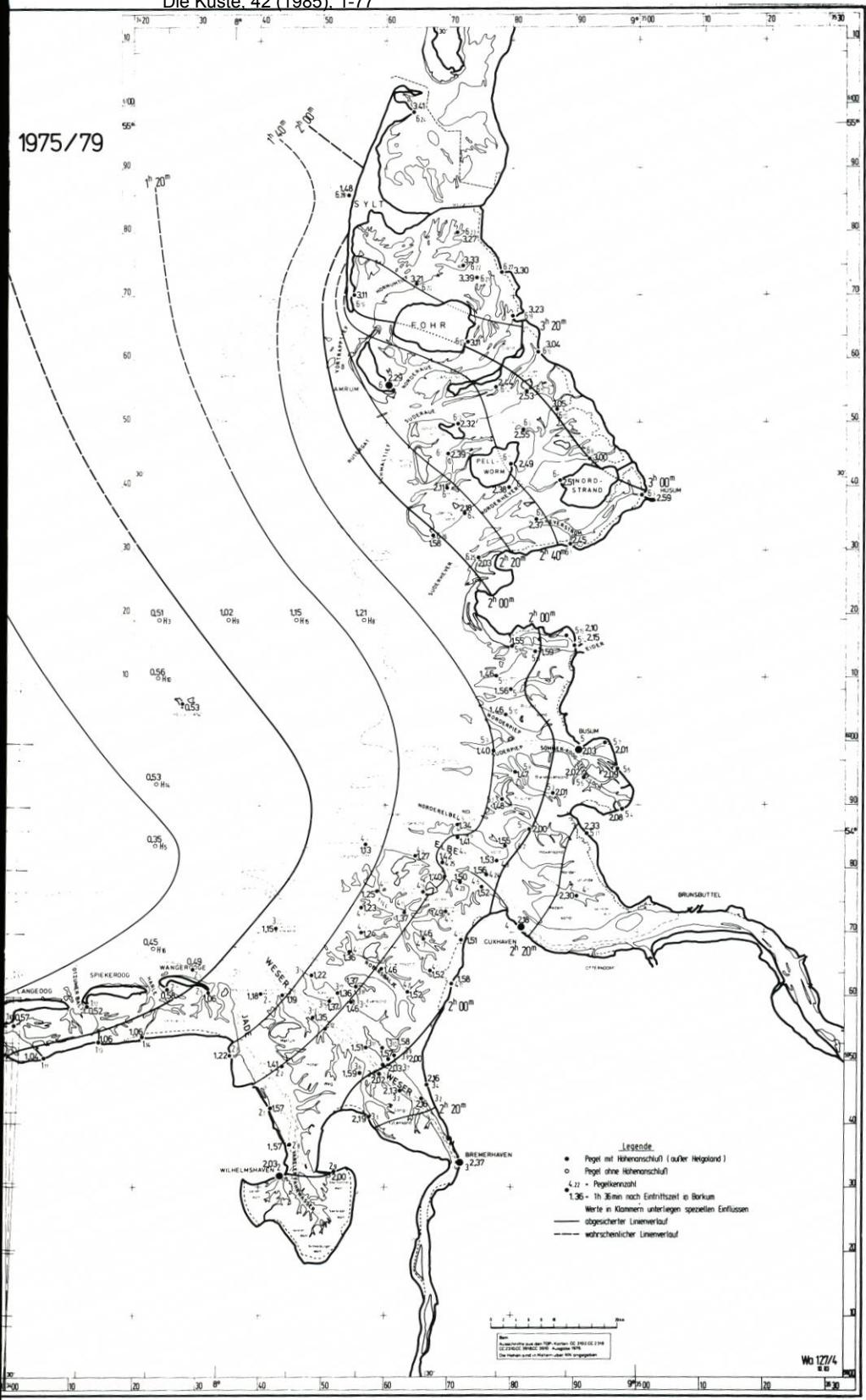


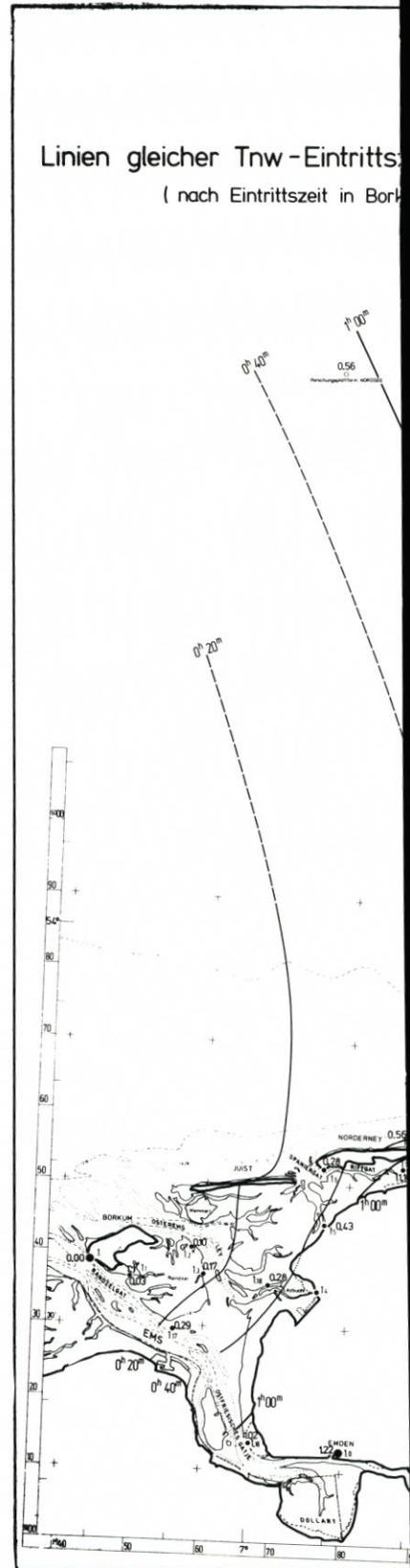
Abb. 8. Linien gleicher Thw-Eintrittszeiten 1975/79, angegeben in 20-Minuten-Intervallen nach Eintritt in Borkum-Südstrand

1975/79

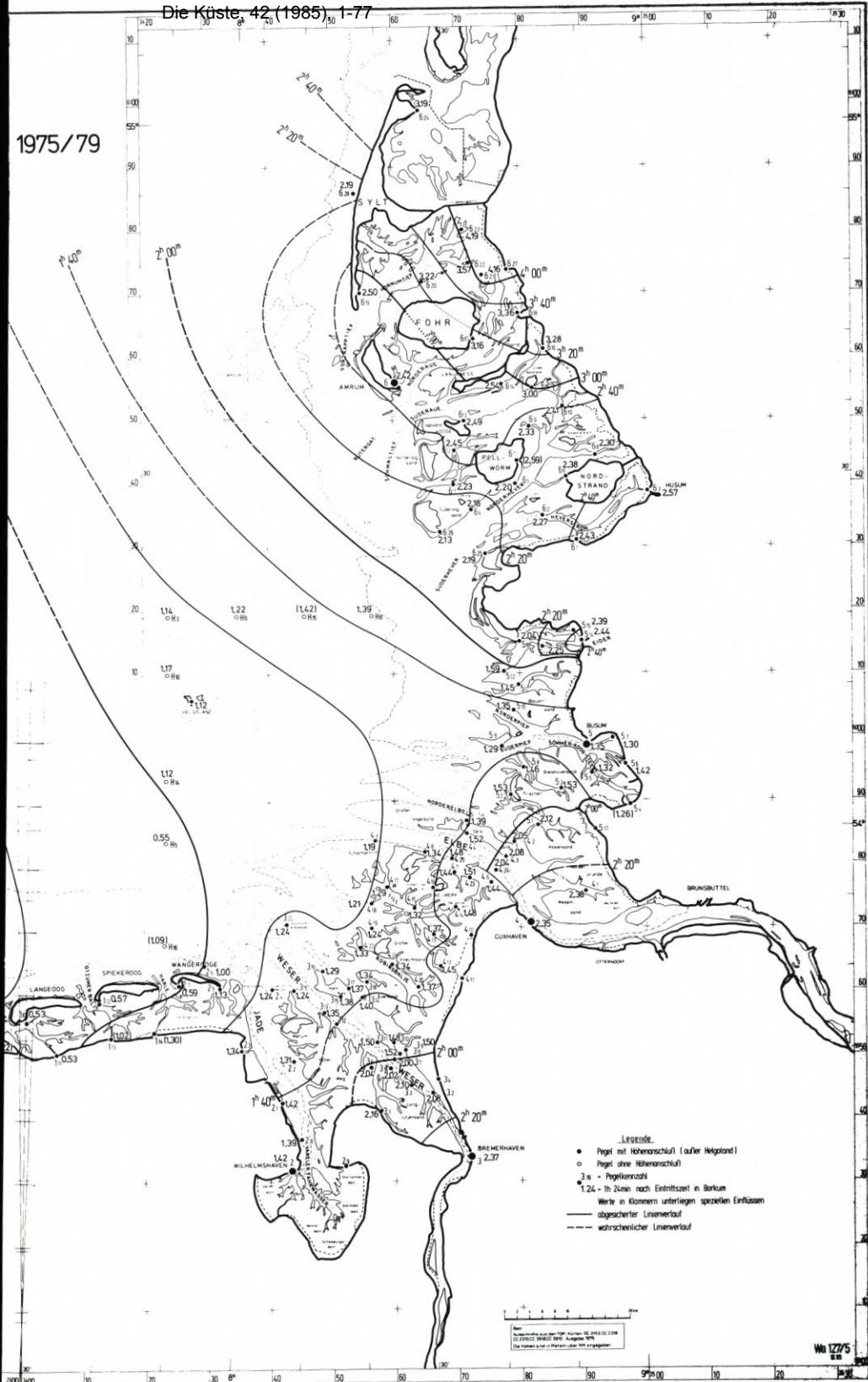


Wb 127/4
8/8

Abb. 9. Linien gleicher Tnw-Eintrittszeiten 1975/79, angegeben in 20-Minuten-Intervallen nach Eintritt in Borkum-Südstrand. (Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit sind die Linien auch über die trockenfallenden Wattflächen gezeichnet)



1975/79

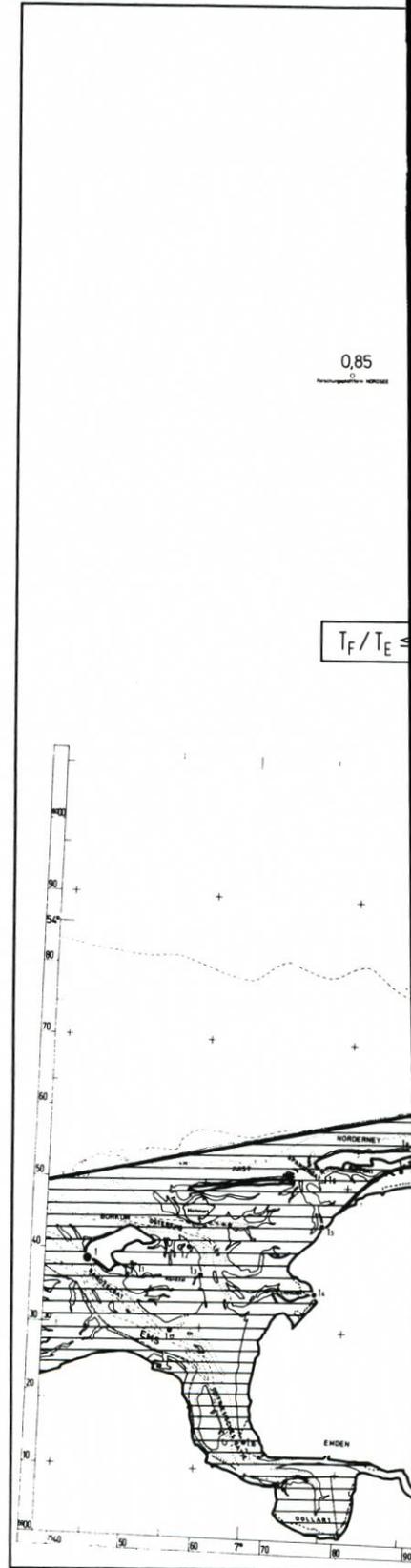


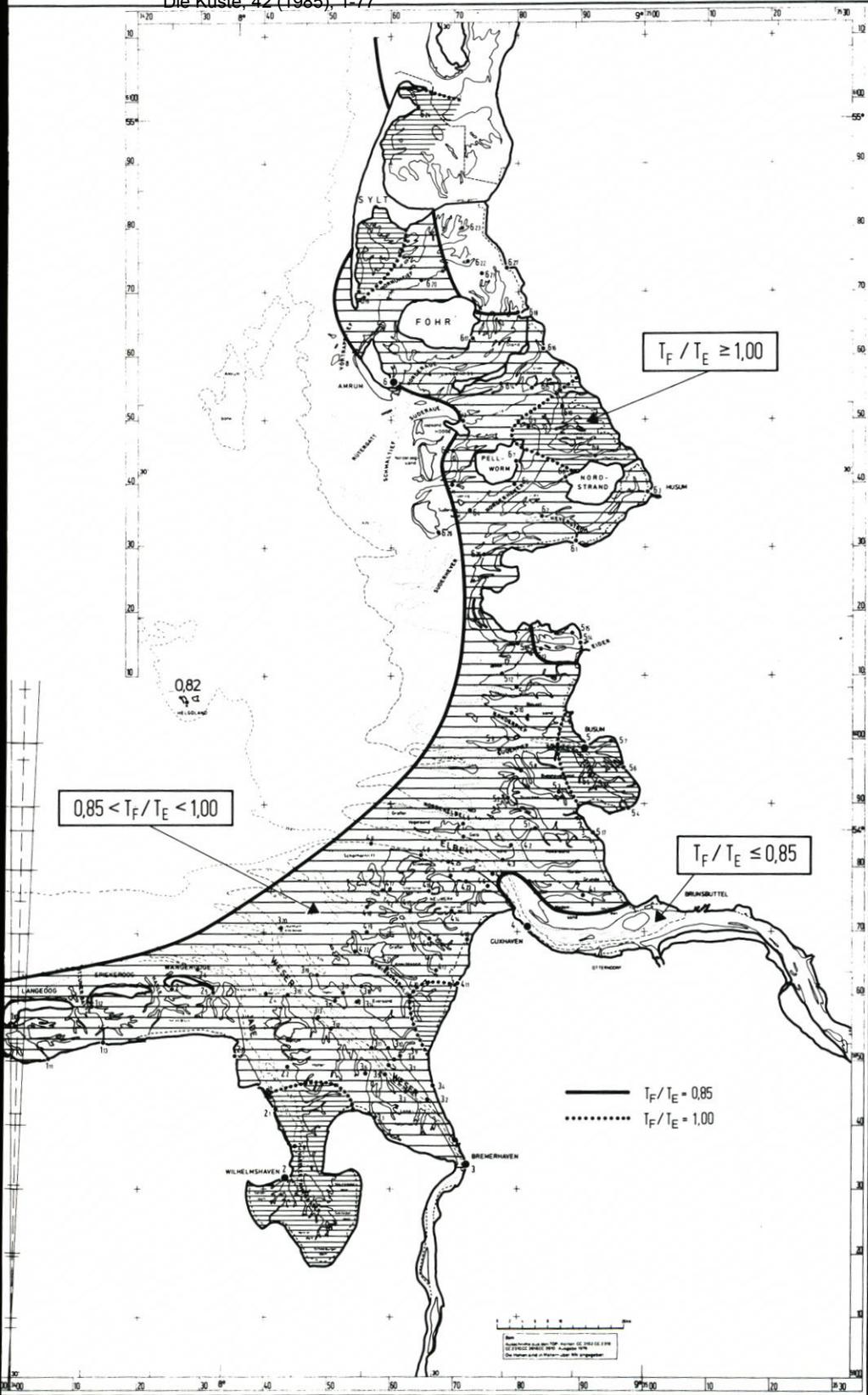
- „Lagehöhe“**
- Pegel mit Höhenerschaufl (außer Heigeland)
 - Pegel ohne Höhenerschaufl
 - 3 m - Pegelmarkzahl
 - 1,24 - in 24cm nach Eintrittszeit in Barkum
- Werte in Klammern unterliegen speziellen Einflüssen
- abgroschter Linsenverlauf
 - - - wahrscheinlicher Linsenverlauf

Veröffentlicht durch den VGH, Berlin, 02.08.1985, 2.200
 © 1985 VGH, Berlin, 02.08.1985, 2.200
 Die Höhen sind in Metern über NN angegeben.

W 1275

Abb. 10. Verhältnis der mittleren Flut- und Ebbedauer T_F/T_E , dargestellt als Flächen mit $T_F/T_E < 0,85$, T_F/T_E zwischen 0,85 und 1,0 und $T_F/T_E > 1,0$





$T_F / T_E \geq 1,00$

$0,85 < T_F / T_E < 1,00$

$T_F / T_E \leq 0,85$

— $T_F / T_E = 0,85$
..... $T_F / T_E = 1,00$

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260 270 280 290 300 310 320 330 340 350 360 370 380 390 400 410 420 430 440 450 460 470 480 490 500 510 520 530 540 550 560 570 580 590 600 610 620 630 640 650 660 670 680 690 700 710 720 730 740 750 760 770 780 790 800 810 820 830 840 850 860 870 880 890 900 910 920 930 940 950 960 970 980 990 1000

gleicher MThw und MTnw. Sie zeigen nach SO zunehmende MThw und MThb und nach O absinkende MTnw. (Aus dem Zusammenhang dieser Linien ist abzuleiten, daß das Helgoländer Null bisher rd. 2 dm zu hoch angenommen wurde.) Die MThw-Eintrittszeiten versetzen von SW nach NO, diejenigen der MTnw dagegen von W nach O und dann drehend nach N und damit als einzige Darstellung auf eine denkbare „Drehtide“ hinweisend.

Im Gebiet der äußeren Deutschen Bucht arbeitet als einziger der höhenmäßig ebenfalls unbekannte Pegel auf der Forschungsplattform Nordsee. Mit Hilfe seiner für dieses Projekt speziell ausgewerteten Daten lassen sich die Linien gleicher MThb und gleicher Thw- und Tnw-Eintrittszeiten recht sicher bis in dieses Gebiet extrapolieren. Das Verhältnis $T_F/T_E = 0,85$ stärkt wesentlich die Aussagen über die Asymmetrie der Tidekurven in der südöstlichen Nordsee. Diese Tatsache und die nur 40 min betragende MThw-Eintrittszeit-Differenz zu Borkum sind Hinweise auf einen Tideablauf in diesem Gebiet, der sich von den bisherigen Vorstellungen unterscheidet (Kap. 3.2).

3.1.3 Folgerungen aus den Werten T_F/T_E

Im Rahmen der Auswertungen wurde für alle Pegel, die auch Tnw schreiben, das Verhältnis T_F/T_E der mittleren Flut- zur mittleren Ebbedauer gebildet. Wie erwähnt, liegen diese Werte in der Deutschen Bucht unter 0,85 (Abb. 10). Die Stationen im äußeren Wattgebiet zeigen Werte um 0,90, also

$$T_F/T_E = 0,90 \text{ bei } T_F + T_E = 12,25 \text{ h}$$

und somit

$$T_F = 5,55 \text{ h; } T_E = 6,30 \text{ h}$$

Es gibt aber mit den Minima bei 0,70 und Maxima bei 1,10 in Küstennähe nicht nur Tiden mit wesentlich kürzerer, sondern auch mit wesentlich längerer Flut- als Ebbedauer. Dafür bestehen natürlich Erklärungen; eine solche soll für eine bestimmte Konstellation gegeben werden:

Zwischen zwei durch einen Wattrücken getrennten Prielsystemen herrscht während mehr oder weniger langer Tidezeit Kommunikation, die in einem Wasseraustausch resultiert, der am besten durch den Reststrom erkennbar wird (GÖHREN, 1968). Zur Feststellung der Reststromrichtung zwischen benachbarten Prielen kann ein Vergleich der T_F/T_E -Werte dienen:



In beiden haben sich – gesteuert durch die seewärtigen Wasserspiegelgefälle und die Topographie – gewisse Verhältnisse T_F/T_E eingestellt, die ähnlich, aber nicht unbedingt gleich sind. Im Wasser abgebenden Priel ist aber die Flut- größer als die Ebbewassermenge, im aufnehmenden Priel umgekehrt. Der Reststrom muß nunmehr dazu führen, daß das Verhältnis T_F/T_E in ersterem Priel größer als im zweiten sein muß. Denn entsprechend wird die Ebbewassermenge reduziert, und zur Entwässerung ist nur eine kürzere Ebbedauer erforderlich.

Der Vergleich benachbarter Priele gestattet also die Zuordnung in flut- oder ebbedomi-

nierte Systeme. Besonders klar wird dies auf Abb. 10 – trotz mangelhafter Belege mit Daten – hinter den Ostfriesischen Inseln für den bekannten Reststrom von W nach O.

In den Prielsystemen zwischen Weser und Elbe herrschen sehr komplexe Reststromverhältnisse (GÖHREN, 1968; KOCH und LUCK, 1973), die nur in Ausnahmen eine solche Zuordnung wie oben gestatten. Dies ist erst wieder eindeutig im Raum Büsum, der Außen-eider, um Pellworm und zwischen Amrum und der Küste möglich.

Sämtliche Ergebnisse stimmen mit den Reststromangaben bei SIEFERT et al. (1980) überein.

3.1.4 Eintrittszeiten vor langgestreckten Inseln

In der Deutschen Bucht wird an der Süd- und Ostküste der Übergang auf ausgedehnte Wattgebiete durch mehrere langgestreckte Inseln gekennzeichnet. Je nach der „Fortschritts-richtung“ der Thw- und Tnw-Eintrittszeiten entstehen unterschiedliche Phasenverschiebungen vor und hinter den Inseln und auch entlang der gestreckten Seeseite. Die Skizzen auf Abb. 11 zeigen qualitativ das Resultat:

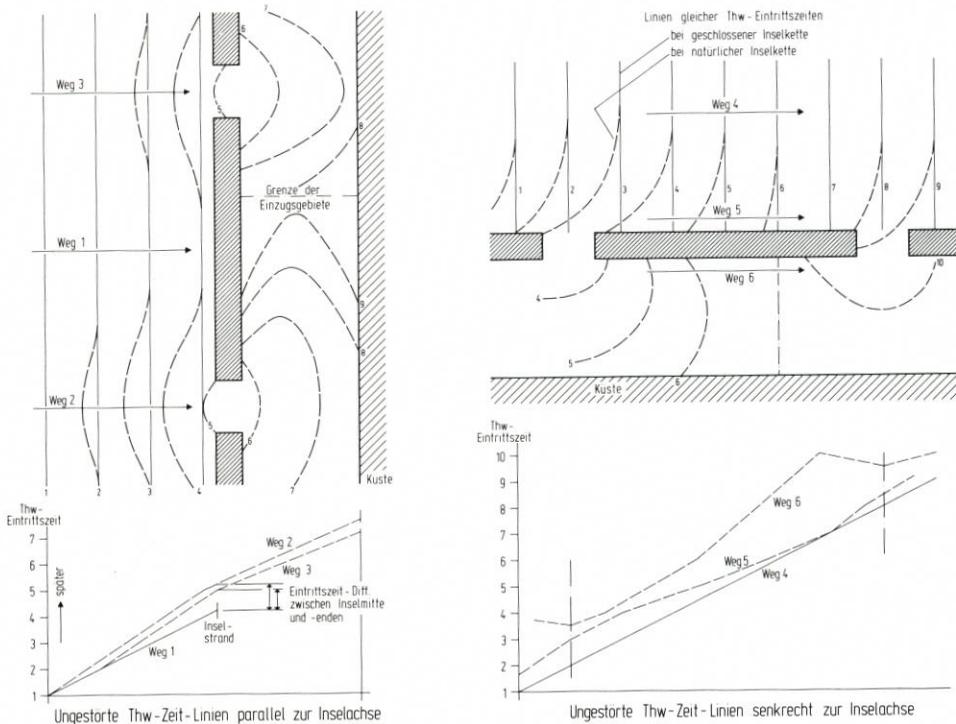


Abb. 11. Zwei schematische Darstellungen für die Thw-Eintrittszeit-Entwicklung hinter langgestreckten Inseln

Liegen die Linien gleicher Eintrittszeit parallel zur Insel, so treten die Scheitel vor deren Mitte zuerst ein, während an den Inselenden erhebliche Verzögerungen dadurch entstehen, daß Energie in die weiter zurückliegenden Prieleinzugsgebiete transferiert wird. So entstehen zusätzliche Gefälle vor der Insel von deren Mitte nach beiden Seiten hin, die recht lange anhalten können, da an den Inselenden die Thw weniger hoch auflaufen dürften.

Das Schema gilt für die Thw- wie die Tnw-Eintrittszeiten; nur sind um Tnw die Gefälle vor der Insel entgegengesetzt zu denen um Thw. Beispiel Sylt auf Abb. 8 und 9.

Liegen die Linien gleicher Eintrittszeit senkrecht zur Inselachse, entsteht ein etwas komplizierteres Bild (Abb. 11) mit dem Effekt, daß das Thw wie das Tnw vor der Insel auf eine längere Strecke etwa gleichzeitig eintreten können. Für das Beispiel Juist und Norderney auf Abb. 8 und 9 hat dies bereits WALTHER (1949) bei der Auswertung von Pegelmessungen aus den Jahren 1930/32 festgestellt. Über eine seiner Darstellungen gibt es zudem Vergleichsmöglichkeiten zwischen den Linien gleicher Thw-Eintrittszeiten von Borkum bis Baltrum (Abb. 12). Danach zeigen beide Auswertungen im Gebiet zwischen den Inseln und der Küste weitgehend übereinstimmenden Verlauf. Vor den Inseln allerdings differieren die Ergebnisse um bis zu 20 min, wobei die Lage der Linien wegen fehlender Daten nach Norden immer unsicherer wird. Ob die Unterschiede schon Veränderungen innerhalb von 45 Jahren dokumentieren, bleibt ungewiß.

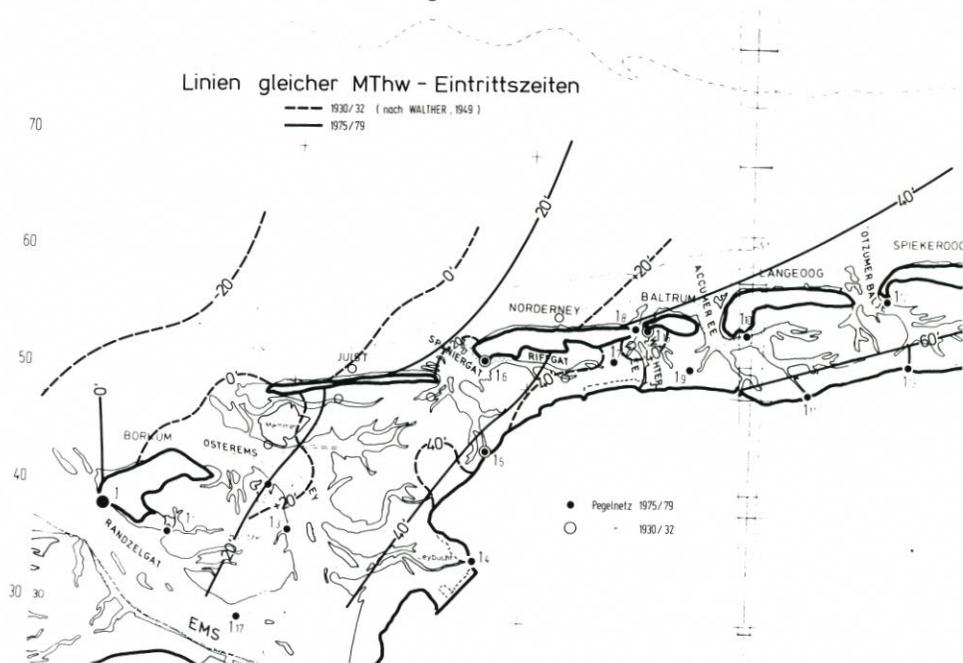


Abb. 12. Linien gleicher Thw-Eintrittszeiten von Borkum bis Langeoog für 1930/32 (nach WALTHER, 1949, gestrichelt) und für 1975/79 (durchgezogen)

3.1.5 Mittlere Tidekurven

Im Rahmen der Arbeiten wurden mittlere Tidekurven erarbeitet, und zwar
– für 1975/79 an

73 Orten durch Berechnung wie unter Kapitel 2 beschrieben

15 Orten durch Umrechnung mittlerer Tidekurven aus dem WSA Bremerhaven auf den Bearbeitungszeitraum

18 Orten durch Umrechnung mittlerer Tidekurven aus dem Strom- und Hafenausbau (SIEFERT, 1973) auf den Bearbeitungszeitraum

- für 1931/35 an 2 Orten (Wilhelmshaven, Cuxhaven)
- für 1918/19 an 2 Orten (Hörnum, Osterley Süd)
- für 1906/10 an einem Ort (Cuxhaven)

Abb. 13 gibt einige Beispiele (a bis f), um das Spektrum der vor unserer Nordseeküste üblichen Tidekurven aufzuzeigen:

- | | |
|--|---|
| Borkum-Südstrand (1.) | als „normale“ Tide, $M_{Thb} = 228$ cm, T_F kleiner als T_E , glatter Kurvenverlauf |
| Wilhelmshaven-
Alter Vorhafen (2.) | als Kurve mit dem größten M_{Thb} (377 cm) und dem niedrigsten M_{Tnw} ; T_F größer als T_E |
| Hörnum (6.19) | als Kurve mit dem kleinsten M_{Thb} (199 cm), sehr breitem Thw -Scheitel und etwa gleich langer T_F und T_E |
| Osterley (6.23) | als Kurve mit dem kürzesten T_F (2.19 h kürzer als T_E) |
| Deichsiel Sommerkoog
Steertloch (5.4) | als Kurve mit unregelmäßigem T_{nw} -Bereich, weitgehend konkavem Flutast und dem längsten T_F (0.51 h länger als T_E) |
| Bensersiel (1.11) | als Kurve mit unregelmäßigem Flutast und sehr kurzem Thw -Scheitelbereich |

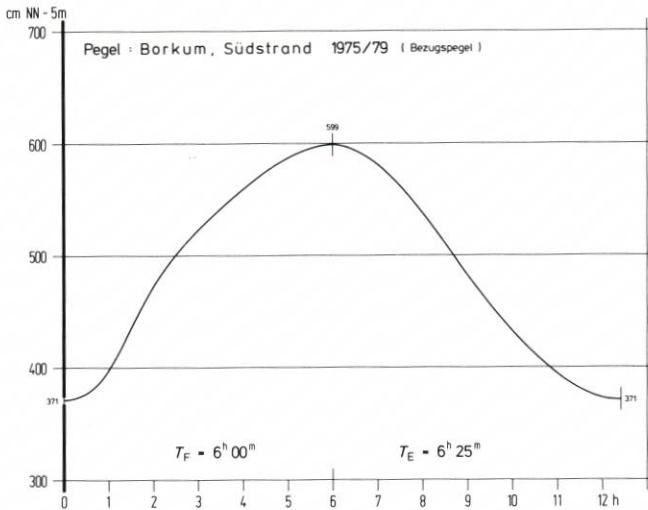
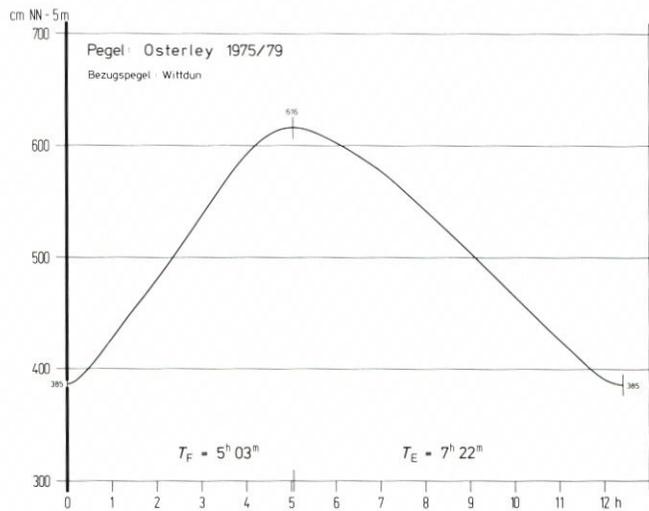
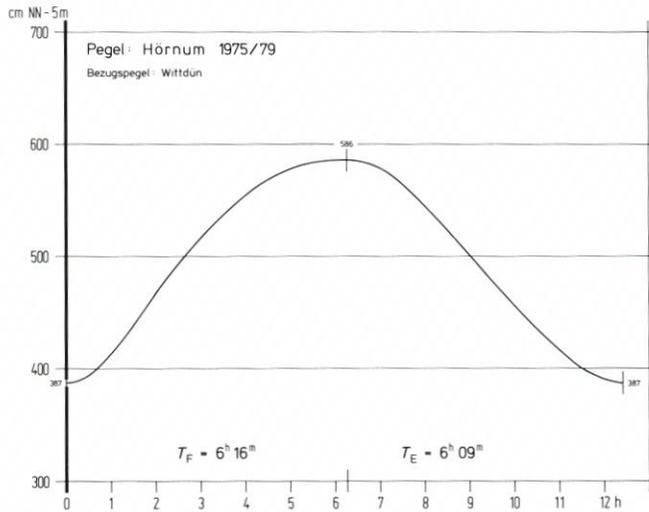
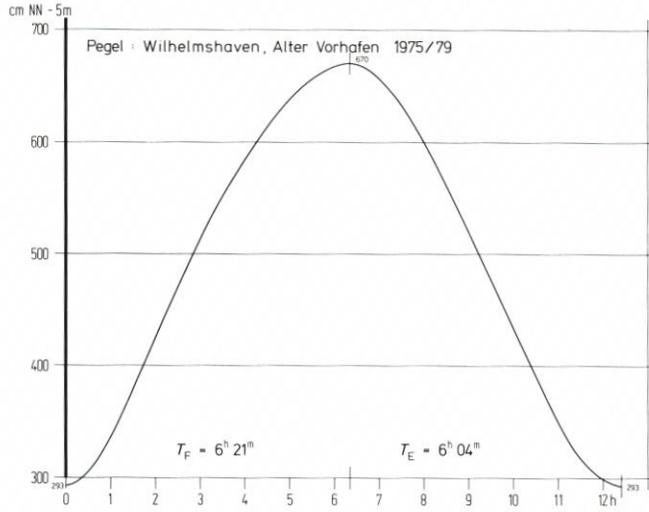


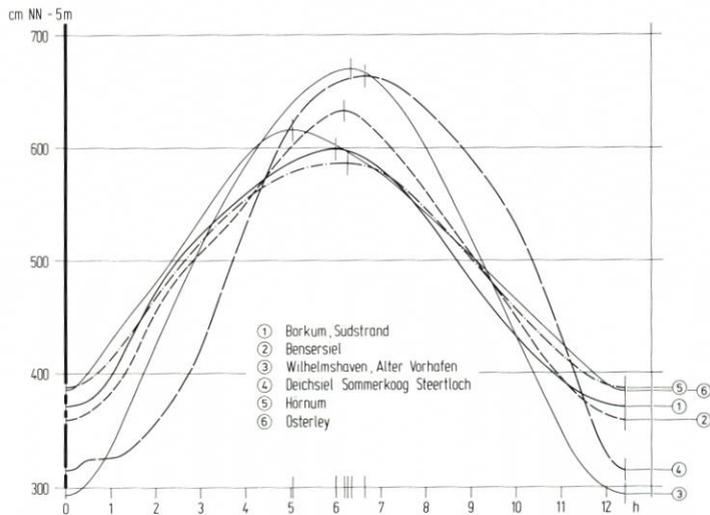
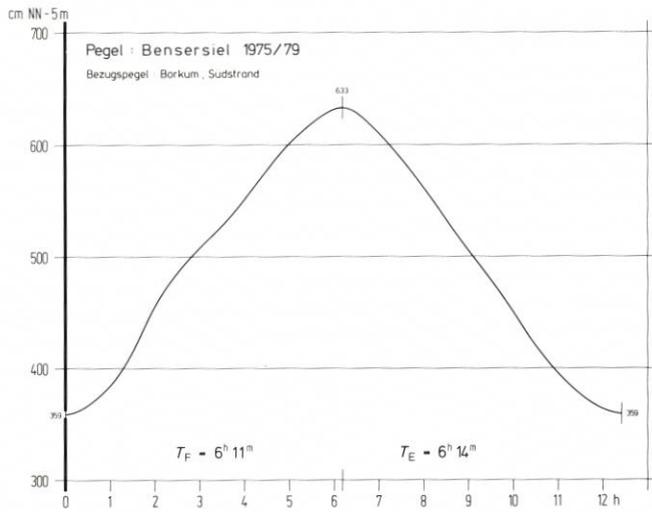
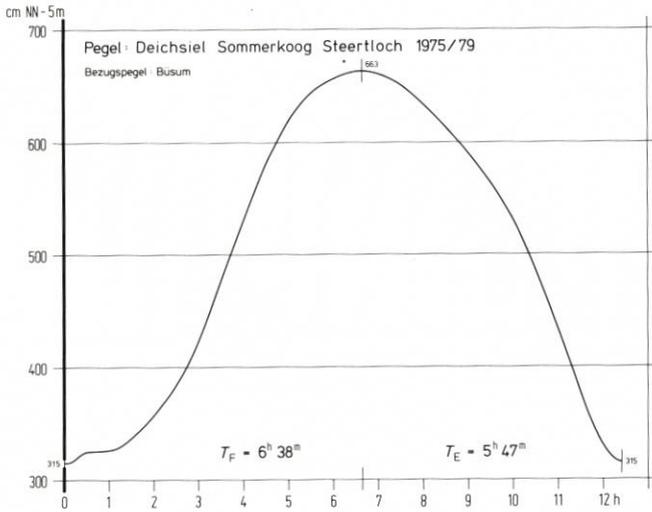
Abb. 13a bis 13g. Mittlere Tidekurven für den Zeitraum 1975/79

Abb. 13g zeigt diese sechs Tidekurven übereinander.

Da die Kurven (insgesamt 111) hier nicht komplett veröffentlicht werden können, ist der Hinweis angebracht, daß sie selbstverständlich über das KFKI jedem Benutzer zur Verfügung gestellt werden. Einige Zeichnungen enthalten Korrekturen des PN, wie sie sich aus der Bearbeitung nachträglich ergeben haben. Im übrigen wurden höhenstabile Rohrfestpunkte und korrekte Anschlußnivelements vorausgesetzt.

Die mittleren Tidekurven liefern einzeln interessante Aufschlüsse über örtliche Gegebenheiten und gestatten so z. B. auch das genauere Kalibrieren etwaiger Modelle. Darüber hinaus können mit ihrer Hilfe aber auch flächenhaft „Momentaufnahmen“ der Tidewasserstände





hergestellt werden, da ihre zeitliche Lage zueinander für sämtliche Pegel bestimmt und auf Borkum bezogen wurde (Abb. 8 und 9).

3.2 Der Tideablauf im Küstenvorfeld und in der Deutschen Bucht

3.2.1 Darstellung nach der Auswertung der Aufzeichnungen von 133 Pegeln

Die Kenntnis der Zeitverschiebungen gegen Borkum (Abb. 8 und 9) für über 100 Tidekurven im Küstenvorfeld und deren bekannte Höhen gestatten erstmals, durch ausreichend dichte Messungen abgesicherte „Momentaufnahmen“ mit Linien gleicher Wasserstände vorzulegen (Abb. 14 bis 19). Um auch die Deutsche Bucht in die Betrachtungen einbeziehen zu können, wurden Erkenntnisse aus Daten der Pegel Helgoland und Forschungsplattform Nordsee sowie der DEBEX-Pegel (WIESE, 1982) einbezogen, wie sie bereits in Abb. 7 bis 10 berücksichtigt wurden.

Z. Zt. $T_{nW_{BOR}}$ (Abb. 14):

Um $T_{nW_{BOR}}$ bildet sich in der südlichen Deutschen Bucht eine 130 km lange (von W nach O) und 50 km breite Zone aus, in der zeitgleich mit Borkum Wasserstände derselben Höhe auftreten. Sie schließt die Außenems bis zum Dollart ein. Im S und O wird sie durch höhere Ebbwasserstände im Küstenbereich begrenzt. Schon bei Helgoland muß auf Grund der nach N abnehmenden T_{hb} (Abb. 7) diese Fläche ebenfalls von höheren Wasserständen umgeben werden. – Im nordfriesischen Wattgebiet herrschen andere Ebbverhältnisse mit starken, nach WSW gerichteten Gefällen. Das Bild läßt insgesamt den Schluß zu, daß um $T_{nW_{BOR}}$ die südliche Deutsche Bucht durch Ebbwassermengen von S, SO, O und NO gefüllt wird.

Z. Zt. $T_{nW_{BOR}} + 2 h$ (Abb. 15):

Zwei Stunden später erreicht die Flut bereits den Jadebusen, die Außenweser bis Hoheweg, die Außenelbe bis Gelbsand und das Gebiet südwestlich von Eiderstedt. Soweit konstruierbar, verlaufen die Linien gleicher Wasserstände vor den Ostfriesischen Inseln in N-S-Richtung, hinter den Inseln von NO nach SW, um östlich der Linie Wangerooge–Helgoland allgemein in NNO-SSW-Richtung zu drehen. Sehr deutlich kommen die Unterschiede im Tidegeschehen zwischen Weser und Elbe einerseits (noch ablaufende Ebbwassermengen) und Jadebusen und Dithmarscher Bucht andererseits zum Ausdruck: Die vergleichsweise wesentlich kleineren Ebbwassermengen können aus diesen Buchten sehr schnell ablaufen und führen daher zu sehr niedrigen T_{nw} in Wilhelmshaven und Büsum (Abb. 6) und Verhältnissen $T_F/T_E \geq 1$ (Abb. 10), die durch die sehr frühen T_{nw} -Eintrittszeiten hervorgerufen werden.

Es hat den Anschein, daß zu dieser Tidephase die Tide in den Heverströmen mit stromauf noch fallenden Wasserständen allmählich durch den langsamen Anstieg in der südlichen Deutschen Bucht beeinflusst wird, während Norderaue und Hörnumtief weiter nach SW entwässern. Zu dieser Zeit steht das Wasser südlich des Hindenburgdammes rd. 1,5 m höher als bei Nordstrand!

Z. Zt. 4 h nach $T_{nW_{BOR}}$ (Abb. 16):

Zu dieser Tidephase ist (außer nordöstlich von Föhr) im gesamten Untersuchungsgebiet Flut. Vor den Ostfriesischen Inseln streckt sich eine Zunge mit höheren Wasserständen (etwa

40 km breit) von W nach O vor. Die Darstellung dokumentiert trotz gewisser Unsicherheiten eindeutig die Füllung des gesamten Raumes von der Ems bis zur Eider von W her. Mit abnehmender Wassertiefe werden die Gefälle in Stromrichtung deutlich größer. Die Linienführungen zeigen den relativ großen Wasserbedarf von Ems, Weser und Elbe. Der Gradient der Linien gleicher Wasserstände ist im Süden bis zur Robinsbalje nach SO, bis zur Norderelbe nach O und nördlich davon nach NO gerichtet, also auch noch in die Heverströme hinein. Zwischen Pellworm und Hindenburgdamm verläuft das Gefälle nach ONO.

Z. Zt. $T_{h_{BOR}} = 6 \text{ h}$ nach $T_{n_{BOR}}$ (Abb. 17):

Analog z. Zt. $T_{n_{BOR}}$ bildet sich 6 h später erneut eine fast identische Zone gleichen Wasserstandes in der südlichen Deutschen Bucht aus (vgl. Abb. 14). Diese schließt die Außenems, das Watt hinter den Ostfriesischen Inseln, den Jadebusen und das äußere Wattgebiet zwischen Norderelbe und Eiderstedt ein. Über den Flachwasserbereichen zwischen Wangerooge und Trischen entwickeln sich durch Energieumwandlung etwas höhere Wasserstände (bis 20 cm). Von hier weisen die Gefällerrichtungen in die Weser, das Watt zwischen Weser und Elbe, in die Elbe und in das Watt bis zur Eider hinein. Von der Linie Helgoland-Eiderstedt nach N bzw. NO besteht ein ausgeprägtes Wasserspiegelgefälle von dem Plateau aus in Richtung auf das nordfriesische Wattgebiet.

Z. Zt. 2 h nach $T_{h_{BOR}}$ (Abb. 18):

Zu dieser Tidephase herrscht seewärts der Linie Wilhelmshaven-Eiderstedt-Sylt Ebbe. Die konstruierbaren Linien gleicher Wasserstände verlaufen südlich der Verbindung Helgoland-Eiderstedt sehr gleichmäßig in Richtung NNO-SSW bis in die Flüsse hinein. Interessanterweise stimmen damit in dieser kritischen Tidephase Gradient und stauwirksamste Windrichtung genau überein! Im nordfriesischen Raum drehen die Linien in Richtung auf WSW-ONO. Insgesamt sind die Gefälle nicht sehr stark, was auf einen nur zögernd einsetzenden Ebbstrom schließen läßt. Dabei muß in der südlichen Deutschen Bucht WNW als Hauptstromrichtung angesetzt werden, vor den Heverströmen W und vor Amrum NW.

Z. Zt. 4 h nach $T_{h_{BOR}}$ (Abb. 19):

Im gesamten Gebiet herrscht Ebbe. Während sich 4 h nach $T_{n_{BOR}}$ (oder 2 h vor Ausbildung des $T_{h_{BOR}}$ -Plateaus) auf Abb. 16 eine Zunge mit hohen Wasserständen nach Osten vorstreckt, finden wir 4 h nach $T_{h_{BOR}}$ (oder 2, 4 h vor Ausbildung des $T_{n_{BOR}}$ -Plateaus) eine ähnlich große Senke mit niedrigen Wasserständen. In diese hinein weisen die Gefälle vor der ostfriesischen Küste nach NW, von der Jade bis zur Robinsbalje nach NW, in der Außenelbe nach W, vor der schleswig-holsteinischen Küste nach WSW. Hier ist keinesfalls ein Gefällestrom in Richtung NW bis NNW zu erwarten, wie er in Verbindung mit der Amphidromie oft vorausgesetzt wird. Im Flachwasserbereich hinter den Ostfriesischen Inseln und zwischen Jade und Elbe sind die seewärtigen Gefälle sehr groß, ein Indiz für die dort verzögerte Tideentwicklung.

Schlusfolgerungen

Zusammenfassend läßt sich aus Abb. 2, 5 bis 10 und 14 bis 19 folgern:

- Das Untersuchungsgebiet liegt im Süden eines schwingenden Systems, das durch eine Amphidromie geprägt ist. Durch Flachwasser- und Ästuarinflüsse wird die amphidromische Bewegung verzerrt, wodurch eine Art Ablösungszone entsteht (Abb. 20).
- Um $T_{n_{BOR}}$ und $T_{h_{BOR}}$ bildet sich in der südlichen Deutschen Bucht eine „zentrale

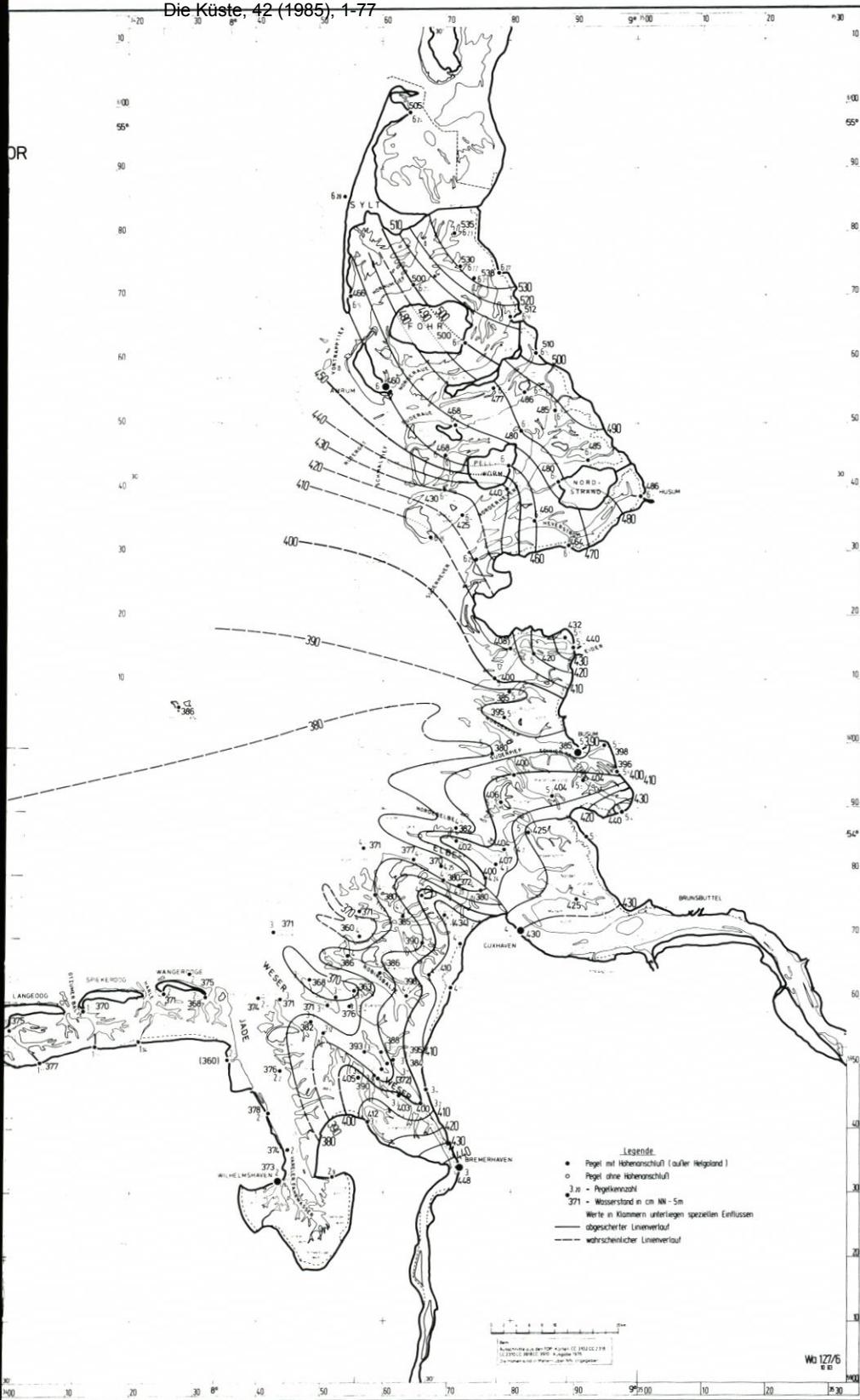
Isohypsen z. Zt. (in cm NN - 5m)

©
Verlagsgesellschaft WISSEN



Abb. 14. Linien gleicher Wasserstände z. Zt. Tnw am
Pegel Borkum-Südstrand, angegeben in
cm NN - 5m

DR



- Legende**
- Pegel mit Höhenanschluß (außer Helgoland)
 - Pegel ohne Höhenanschluß
 - 371 - Pegelkennzahl
 - 371 - Wasserstand in cm NN - 5m
 - Werte in Klammern unterliegen speziellen Einflüssen
 - abgescannter Linienverlauf
 - - - wahrscheinlicher Linienverlauf

1:50.000
 BUNDESANSTALT FÜR LÜFT- UND RAUMFAHRT
 12.1970 (12.1985) 3000 - 4. Auflage 1975
 Druckvermerk: 1000 - 10000000

Wb 127/6
 © 87

Isohypsen z. Zt. Tnw
(in cm NN - 5 m)

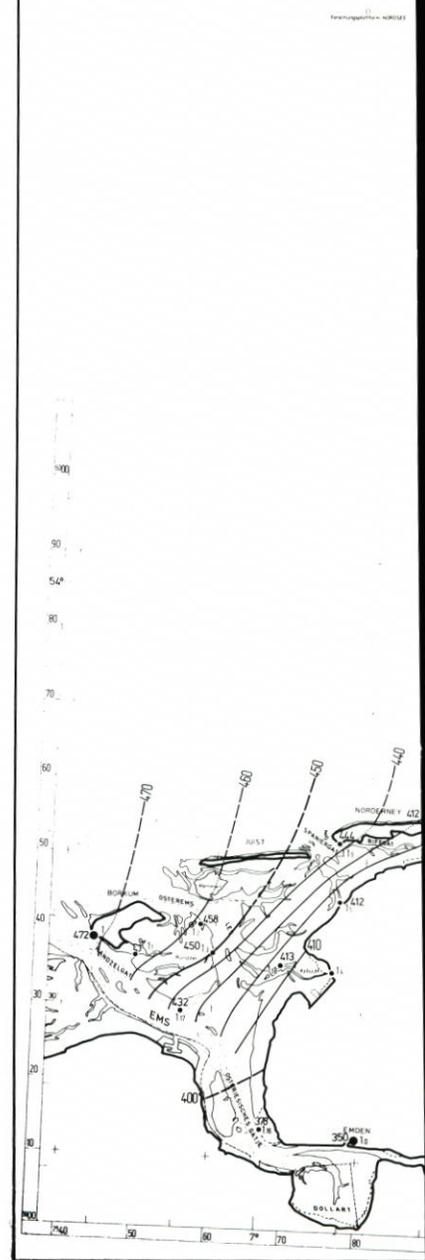
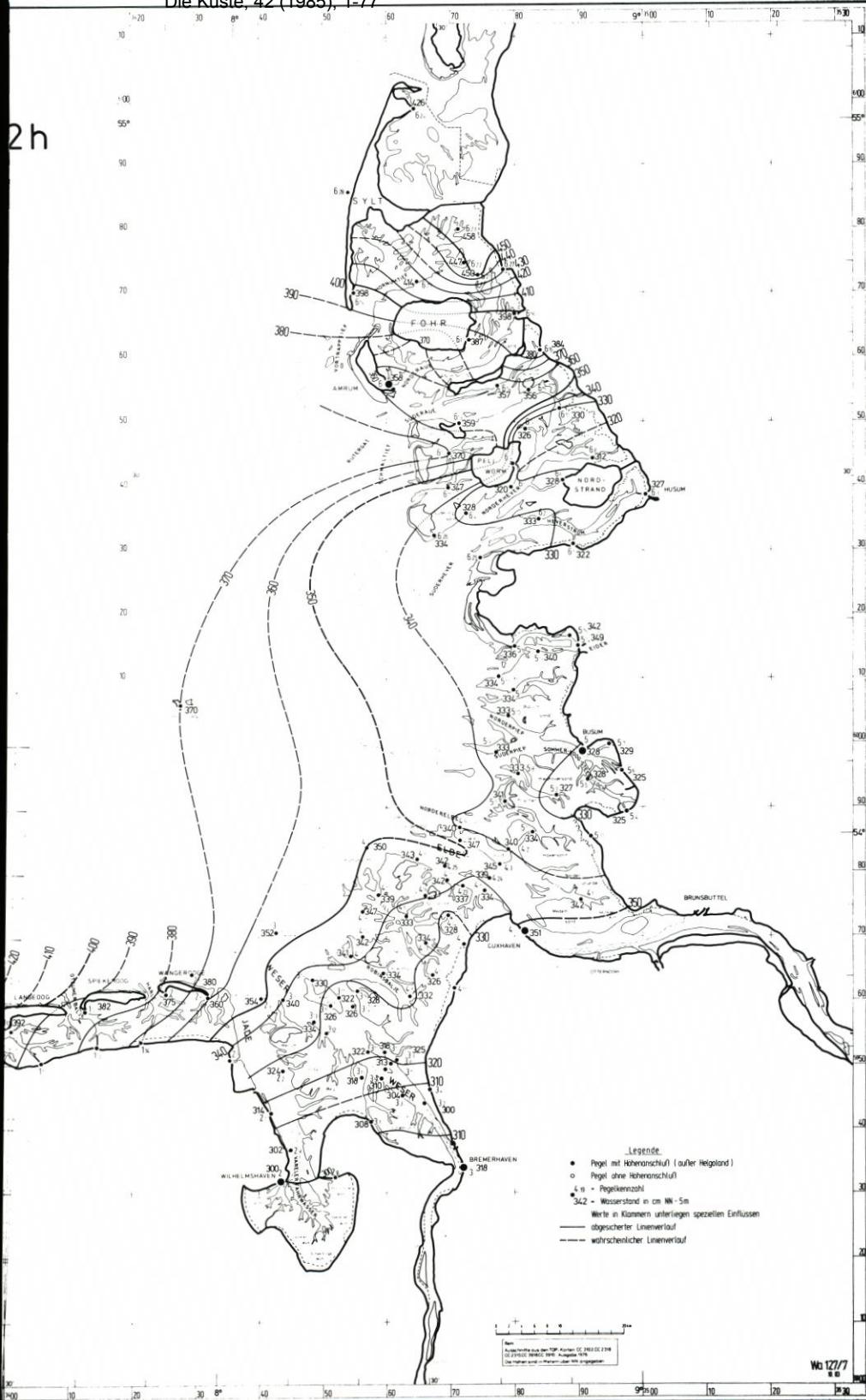


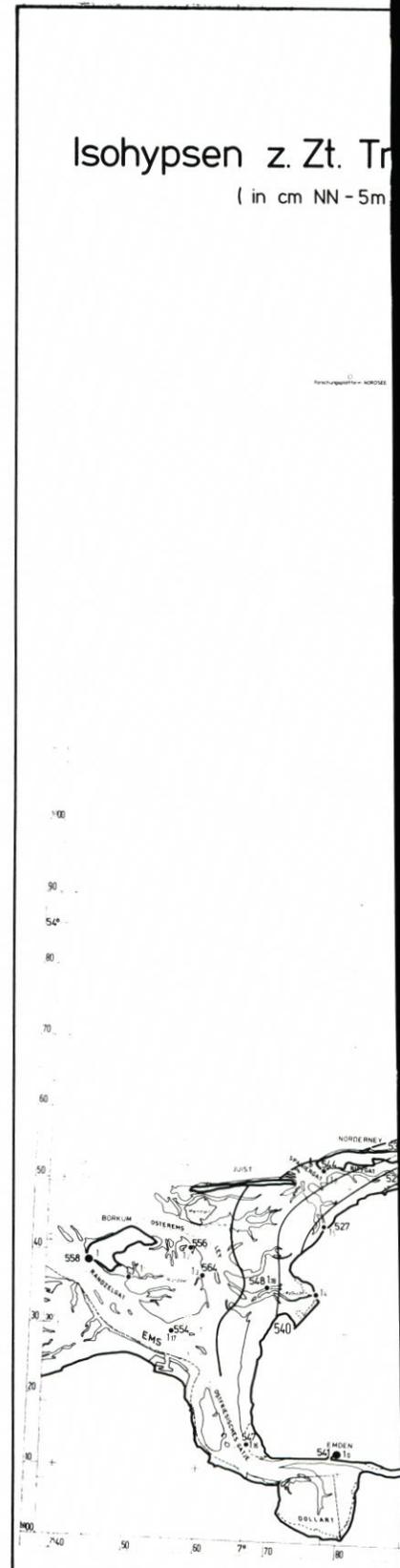
Abb. 15. Linien gleicher Wasserstände z. Zt.
Tnw + 2 h am Pegel Borkum-Südstrand, angegeben
in
cm NN - 5 m

2h

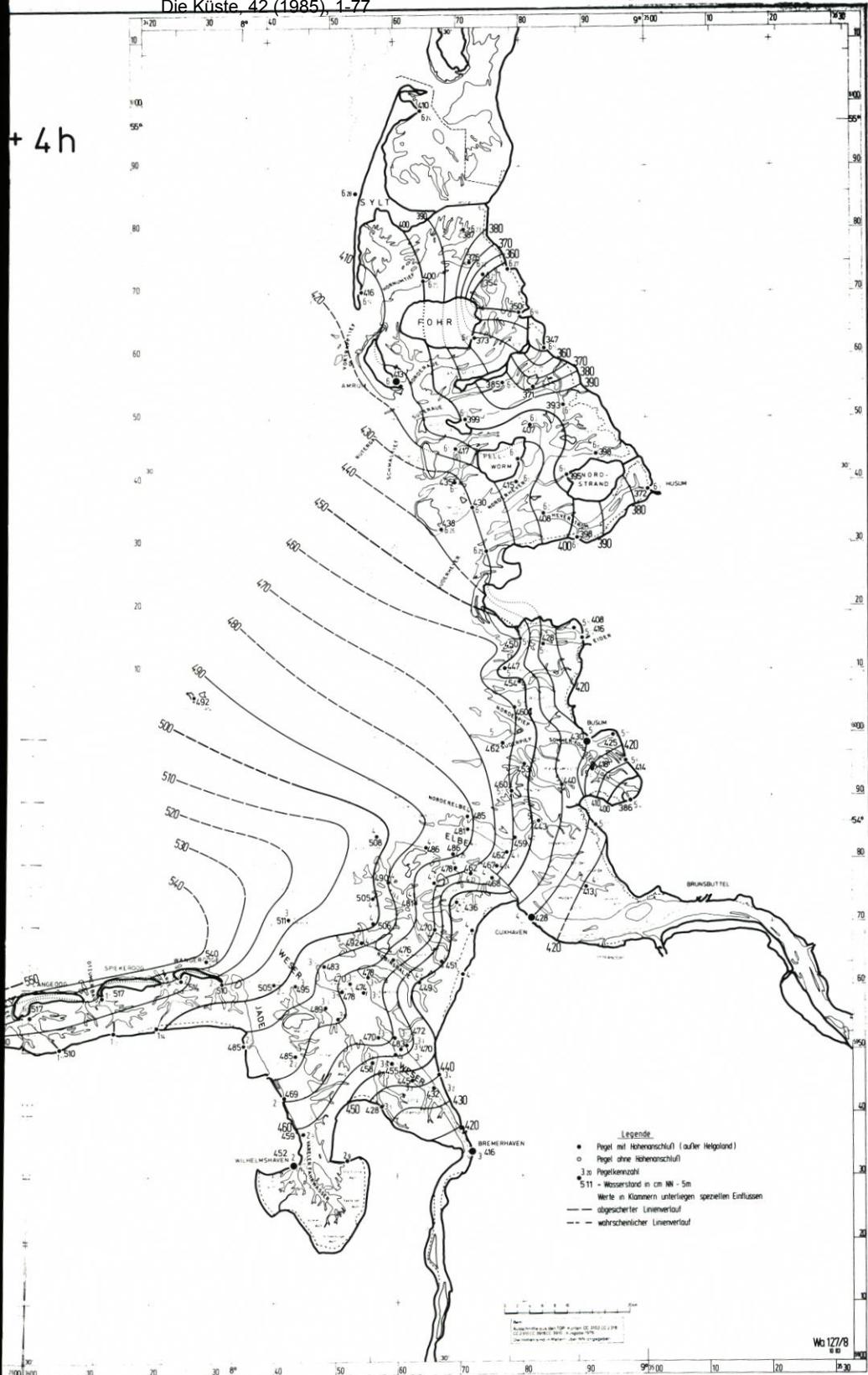


Wa 127/7
B 12

Abb. 16. Linien gleicher Wasserstände z. Zt.
Tnw + 4 h am Pegel Borkum-Südstrand, angegeben
in
cm NN - 5 m



+ 4h



- Legende
- Pegel mit Höhenanschluß (außer Helgoland)
 - Pegel ohne Höhenanschluß
 - 3.0 Pegelkennzahl
 - 511 - Wasserstand in cm NN - 5m
 - Werte in Klammern unterliegen speziellen Einflüssen
 - abgescarter Linienvorlauf
 - - - wahrscheinlicher Linienvorlauf

Verlag
 Ausgabedatum: 1985
 12 12 1985
 Die Kartographie der Deutschen Hydrographischen Anstalt

W 127/8
 1985

Isohypsen z. Zt. Thw

(in cm NN - 5m

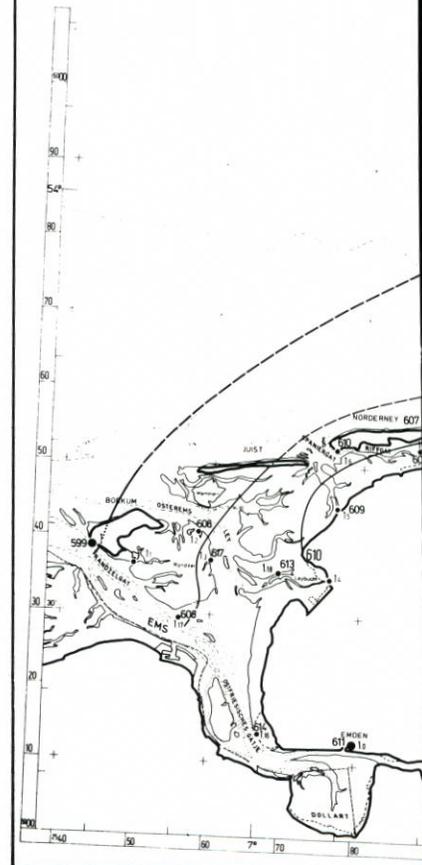
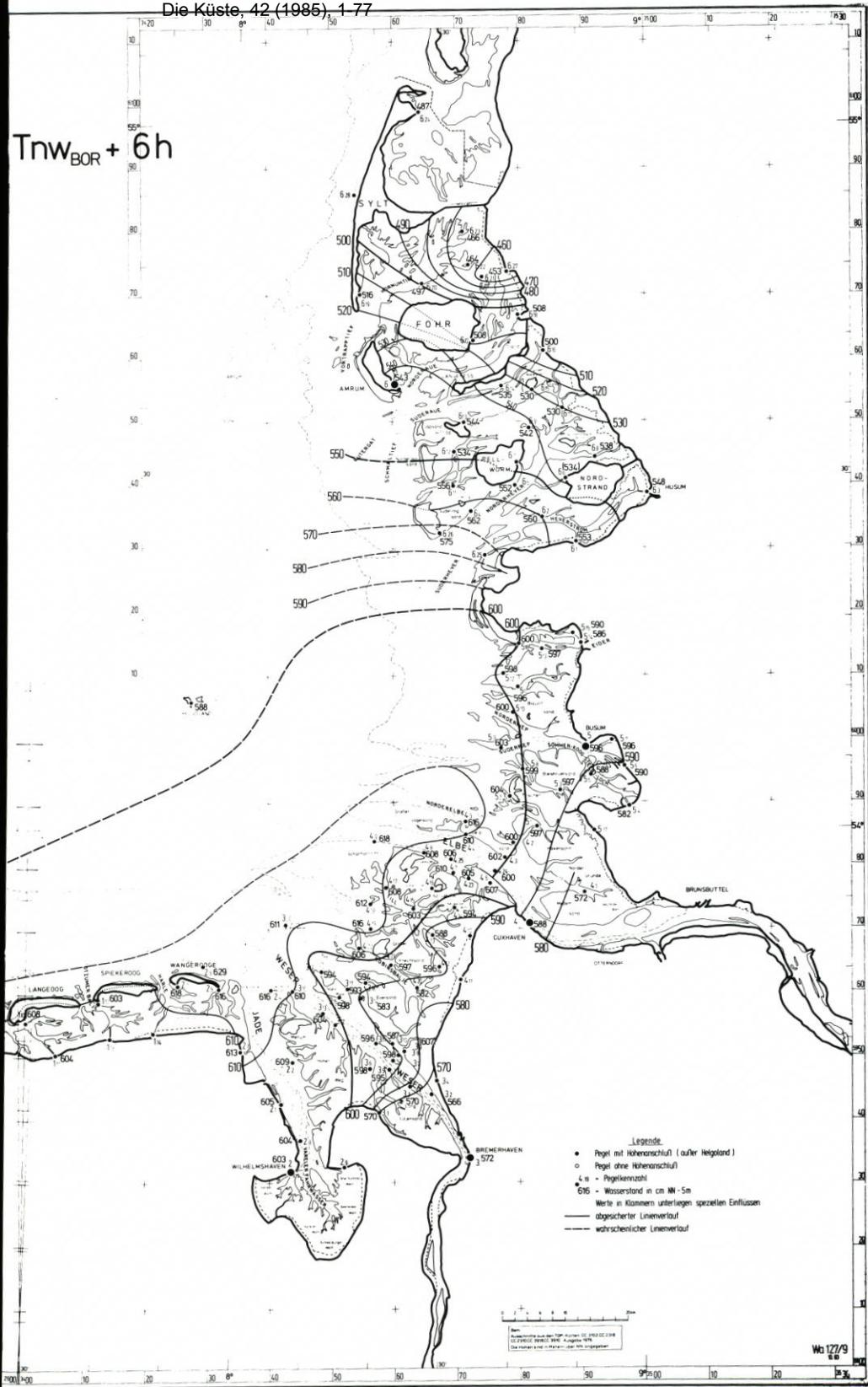


Abb. 17. Linien gleicher Wasserstände z. Zt. Thw (= Tnw + 6 h) am Pegel Borkum-Südstrand, angegeben in cm NN - 5 m

Tnw_{BOR} + 6h



- Legende
- Pegel mit Höhenanschluß (außer Helgoland)
 - Pegel ohne Höhenanschluß
 - 4 1/2 = Pegelkennzahl
 - 615 = Wasserstand in cm NN - 5m
 - Werte in Klammern unterliegen speziellen Einflüssen
 - abgesetzter Linienerlauf
 - - - wahrscheinlicher Linienerlauf

1:50000
 Abweichung zum IGP ca. 10m
 GEODÄS. BUNDESBÜRO
 1974
 Das Material wird in der Regel nicht mehr abgefragt

Wa 127/9

Isohypsen z. Zt. Thw

(in cm NN - 5 m)

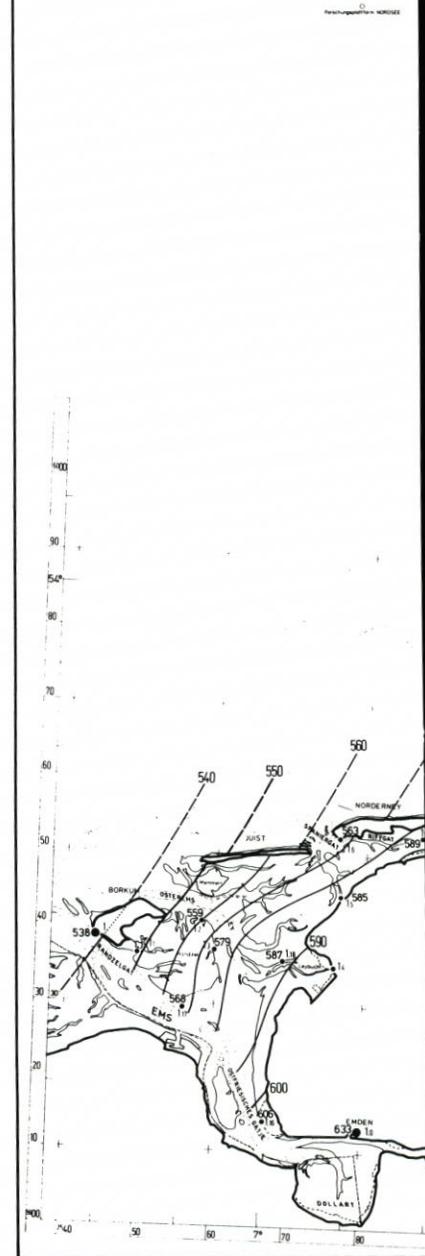
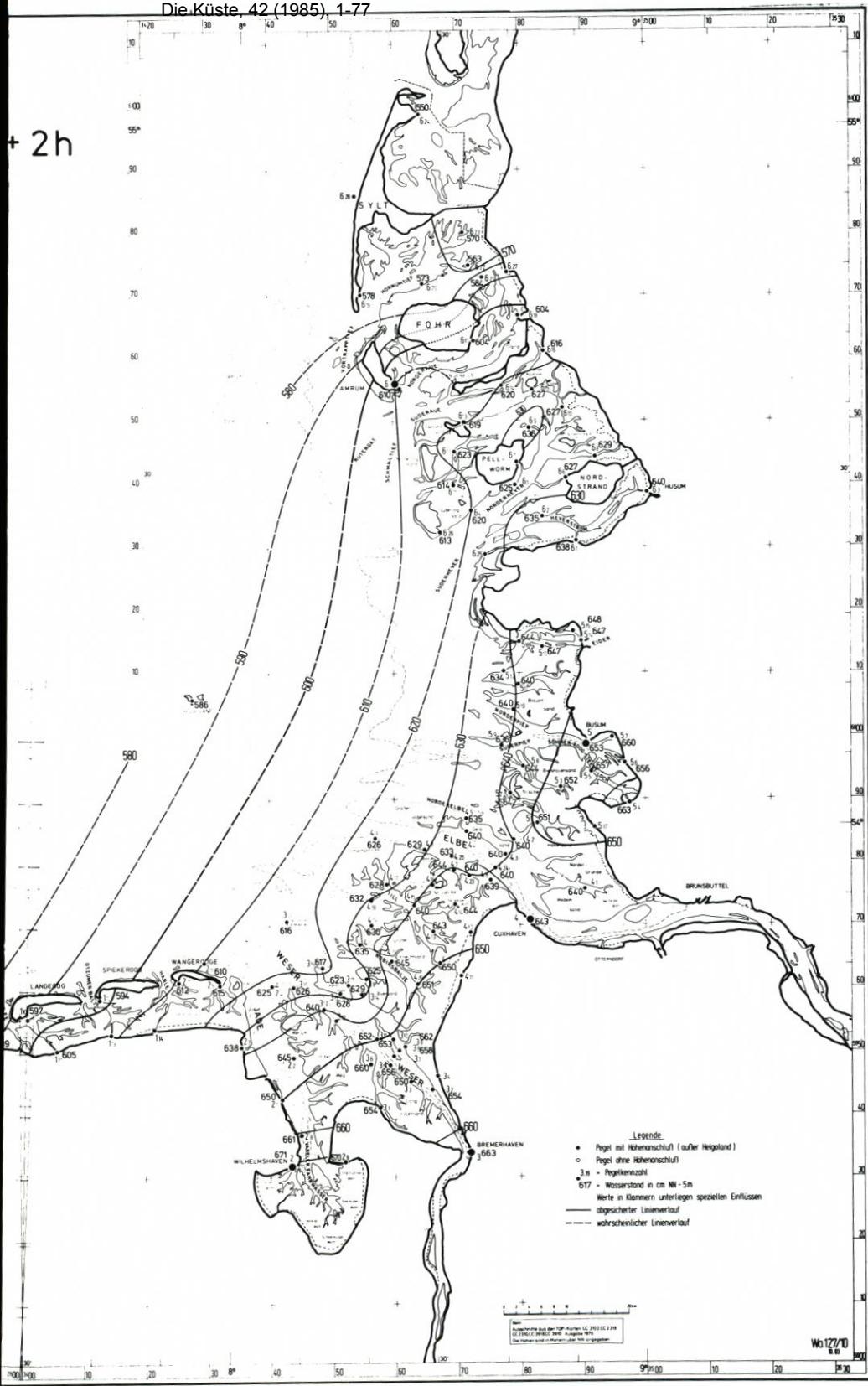


Abb. 18. Linien gleicher Wasserstände z. Zt. Thw + 2h am Pegel Borkum-Südstrand, angegeben in cm NN - 5 m

+ 2h



- Legende**
- Pegel mit Höhenanschluß (außer Helgoland)
 - Pegel ohne Höhenanschluß
 - 3.18 - Pegelkennzahl
 - 617 - Wasserstand in cm NN - 5m
 - Werte in Klammern unterliegen speziellen Einflüssen
 - abgesehener Linienerlauf
 - - - wahrscheinlicher Linienerlauf

Maßstab 1:50.000
 Verarbeitet nach dem 1:50.000 Maßstab, Datum 1978
 © 1985 G. BRUNNEN, Berlin
 Die Handlungsgrenze ist nicht verbindlich.

W 177/D

Isohypsen z. Zt. Thw
(in cm NN - 5m)

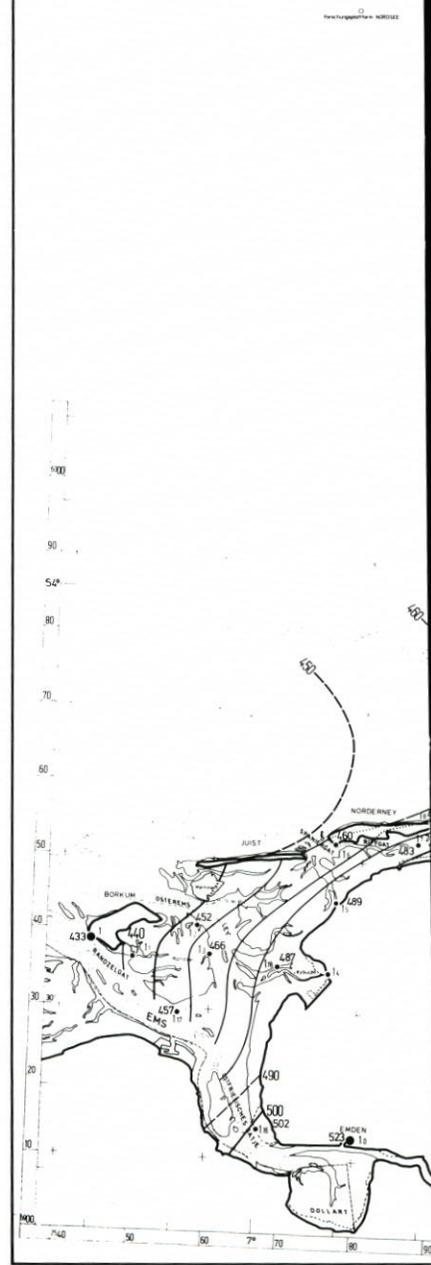
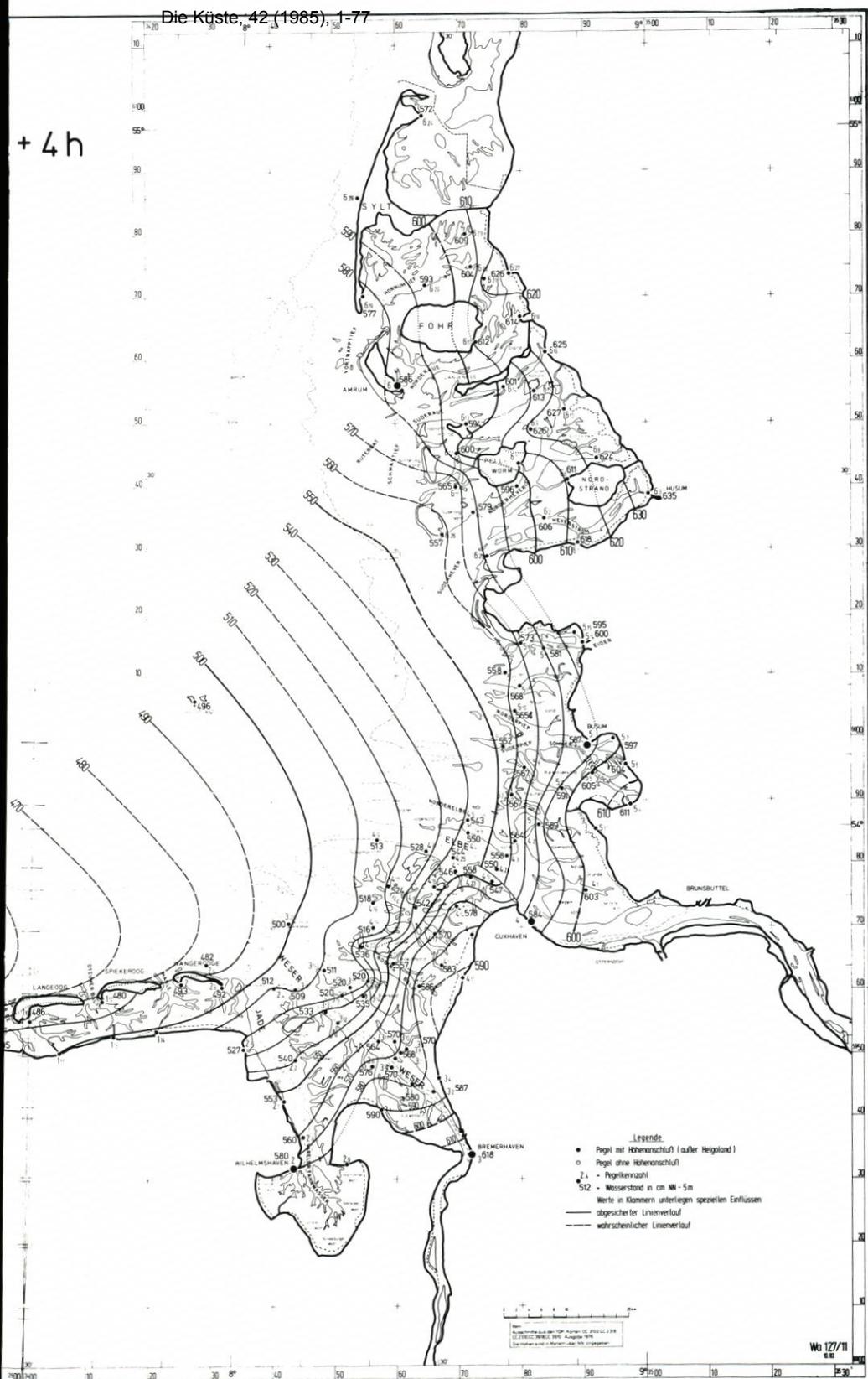


Abb. 19. Linien gleicher Wasserstände z. Zt. Thw + 4 h am Pegel Borkum-Südstrand, angegeben in cm NN - 5 m

+ 4 h



- Legende
- Pegel mit Höhenanschluß (außer Helgoland)
 - Pegel ohne Höhenanschluß
 - 24 - Pegelstand
 - 512 - Wasserstand in ca. NN - 5m
 - Werte in Klammern unterliegen speziellen Einflüssen
 - abgesehener Linienerlauf
 - - - - - wahrscheinlicher Linienerlauf

Verarbeitet durch den Top. Anstalt 10 250 000 1:250 000
 12/1985 24812 24812 - Ausgabe 1/85
 Die Werte sind in der Regel über 10 Jahre gültig.

Wd 127/11

Gefälle bei mittleren Tiden
in der Deutschen
(generalisiert)

Prozentskala: 1:100000

Grenze der
amphidromisch
Bewegung

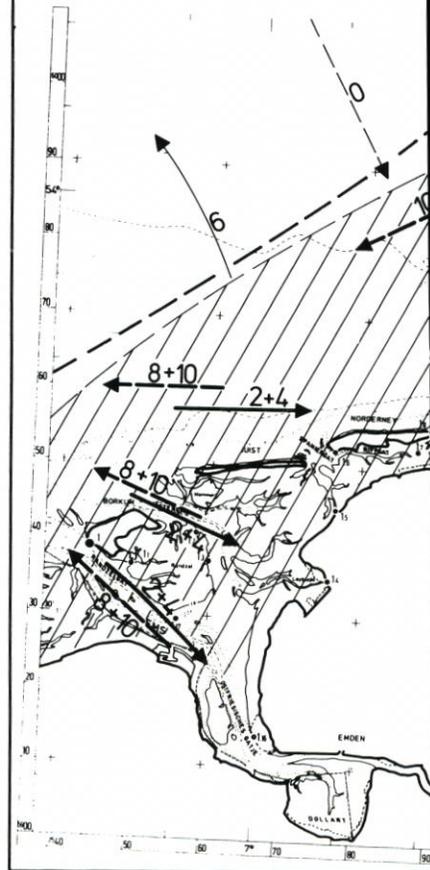
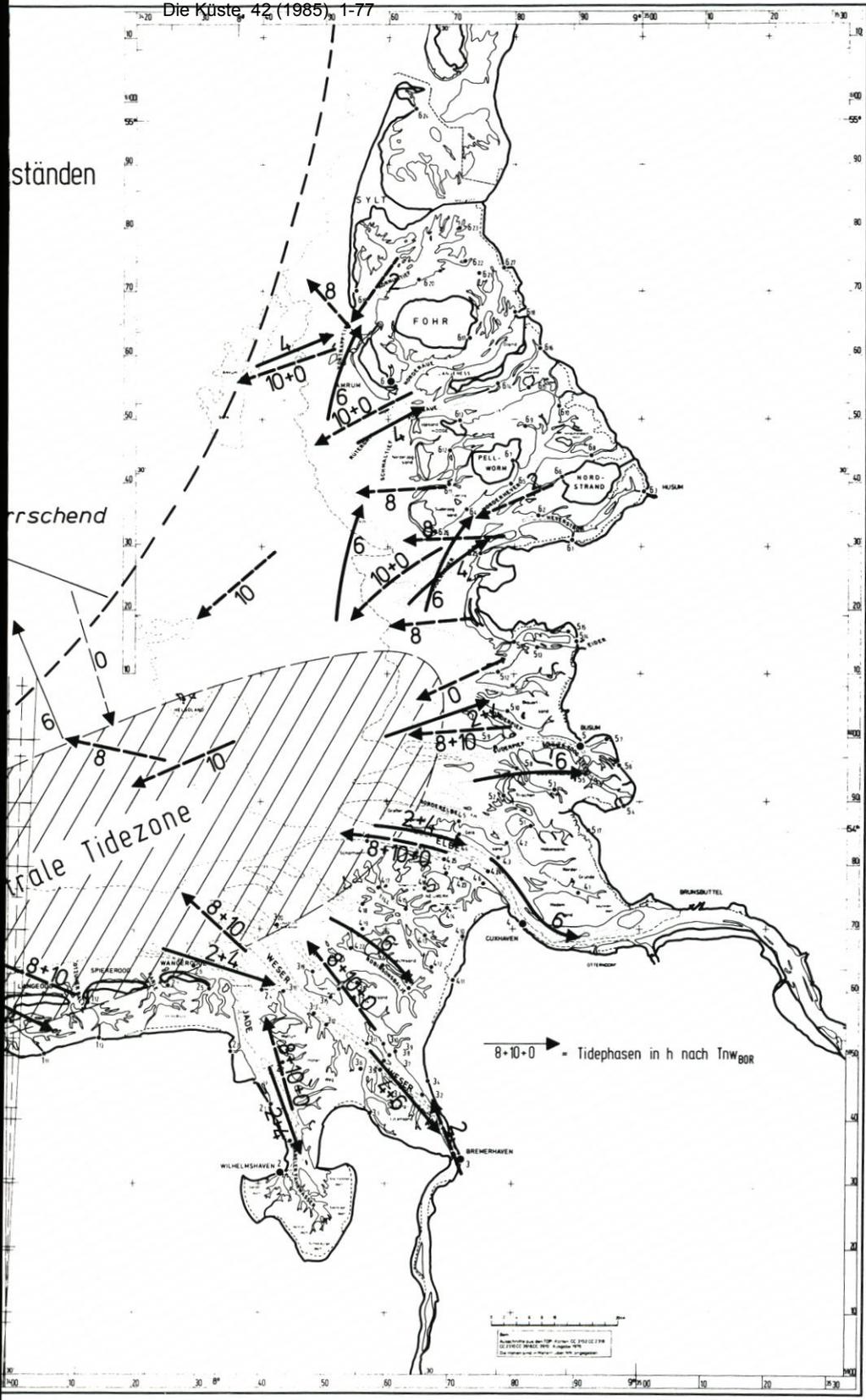


Abb. 20. Gefälle bei mittleren Tideverhältnissen für die Tidephasen 0; 2...10h nach T_{NWBOR} sowie die skizzierte Grenze der vorherrschend amphidromischen Bewegung

ständen

rrschend

rale Tidezone



8+10+0 = Tidephasen in h nach TnwBOR

1:10000
 Aus dem Verzeichnis der Nautischen Anzeigen des Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
 Die Höhen sind in Meter über NN angegeben

Tidezone“, wo auf rd. $130 \times 50 \text{ km} = 6500 \text{ km}^2$ nicht mehr als 1 dm in der Höhe unterschiedliche Wasserstände auftreten.

- Im Laufe der Tide entwickeln sich die Gefälleverhältnisse aus dieser Zone in Ems, ostfriesische Watten, Jade, Weser, Elbe, in die Watten zwischen Jade und Eider und die Heverströme hinein bzw. aus diesen heraus in die zentrale Zone.
- Aue und Hörnumtief stehen primär mit der nördlichen Deutschen Bucht (in WSW-ONO-Richtung) in Verbindung (Abb. 20).
- Daraus folgt, daß die genannten Gebiete über Gefälleströmungen primär mit der Ablösungszone kommunizieren. Eine gekrümmte Oberfläche verändert ständig ihre Form und Höhe, ohne daß dabei im Küstenvorfeld ein sin-ähnliches Wellenprofil erkennbar wird.
- Füll- und Leerungsvorgänge in Flachwassergebieten und Ästuaren an der südlichen und östlichen Küste dominieren so stark, daß im Küstenvorfeld praktisch nur ein Fortschritt der Thw- und Tnw-Eintrittszeiten von W nach O erkennbar wird.

Die aus den Gefällen ableitbaren Hinweise auf die Strömungsrichtungen werden durch die Messungen von GÖHREN (1974) bestätigt: Etwa 5 bis 15 km vor dem Strand herrschen folgende Verhältnisse:

Gebiet 5 bis 15 km vor	vorherrschende Richtung nach Messungen von GÖHREN 1971 bis 1973 für		vorherrschende Richtung der Gefälle nach Abb. 20 bei	
	v_f	v_e	Flut	Ebbe
Amrum	ONO	SW	ONO	WSW
Süderoogsand	ONO	WSW	ONO	WSW
Eiderstedt	ONO	WSW	O	W
Trischen	OSO	WNW	O	W

Darüber hinaus belegen zwei Satellitenaufnahmen mit LANDSAT 02 vom 4. und 5. 1. 1979 diese Ergebnisse von GÖHREN und von Abb. 20 eindrucksvoll. Bei Ebbe und NO-Wind von 4 bis 5 Bft am späten Vormittag kann Treibeis als „Tracer“ herangezogen werden. Das Ergebnis ist:

Gebiet 5 bis 15 km vor	Treibrichtung des Eises bei Ebbe nach LANDSAT- Aufnahmen	vorherrschende Richtung des Gefälles bei Ebbe z. Zt. Tide- phase 8 bis 10 auf Abb. 20
Amrum	SW	WSW
Norderoogsand	SW	WSW
Süderoogsand	WSW	WSW
Eiderstedt	WSW	WSW
Blauortsand	W	W
Trischen	W	W
Scharhörn	WNW	WNW
Knechtsand	NW	NW
Mellum	NW	NNW
Wangerooge	WNW	NW
Spiekeroog bis Borkum	W bis WSW	WNW bis W

Selbst die Drehstromellipsen, die GÖHREN (1974) im Küstenvorfeld vor Amrum, Süderoogsand, Eiderstedt, Trischen, Scharhörn und Knechtsand nachwies und als amphidromische Bewegung deutete, können ohne Ausnahme als Resultate der örtlichen Gefälleverhältnisse erklärt werden. Die amphidromisch bedingten Drehströmungen im tieferen Bereich der Deutschen Bucht, die etwa der Strömungsatlas des Deutschen Hydrographischen Instituts zeigt, stehen nicht im Widerspruch zu den Ausführungen der vorliegenden Arbeit. So belegen auch die Strömungsmessungen den Schluß, daß die amphidromische Bewegung im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht in einer Zone durch örtliche Einflüsse dominant überlagert wird. Deren wahrscheinliche Grenze wurde auf Abb. 20 skizziert. Sie muß in Zukunft durch Messungen näher bestimmt werden.

3.2.2 Einbindung in den großräumigen Tideablauf

Der Tideablauf in der Nordsee wird geprägt durch sog. Drehtiden, die amphidromische Punkte entgegen dem Uhrzeigersinn umlaufen. Die Ozeanographie geht bis heute davon aus, daß diese Punkte mehr oder weniger stationär sind und sich die Amphidromien (außer durch künstliche Einflüsse) nicht verändern. Die Theorie ihrer Entstehung ist bei DEFANT (1923) und THORADE (1931) nachzulesen, zugleich mit dem Hinweis, daß Lage und Form der Drehtiden nur empirisch nach Messungen bestimmbar sind. Einen kurzen Abriss über die Entstehung der ersten Karten mit „cotidal lines“ für die englische Küste über die Entwürfe von MERZ und DEFANT für die Deutsche Bucht bis hin zu den Berechnungen des Deutschen Hydrographischen Instituts gibt SAGER (1963). Man kann feststellen, daß der Scheitelpunkt nach MERZ (dessen Entwurf von THORADE [1931] favorisiert wird) rd. 40 km nordwestlich des Scheitelpunktes nach DEFANT (1923) liegt. Das DHI geht in den letzten 25 Jahren von einem stationären Scheitelpunkt rd. 35 km westlich des letzteren aus. Daneben sind große Unterschiede in den Linienverläufen der vier ausgewählten Amphidromien vorhanden, und zwar nicht nur zwischen MERZ, DEFANT und DHI, sondern auch zwischen den beiden letzten DHI-Entwürfen. Dabei ist folgendes zu berücksichtigen:

Die ersten Entwürfe entstammen Analysen von Strömungsmessungen deutscher Forschungsschiffe. Im Laufe der Jahrzehnte wurden das Strömungsmeßnetz verdichtet und Registrierungen einiger Küstenpegel zusätzlich herangezogen. Wer um die Schwierigkeiten von Strömungsmessungen in der Nordsee und deren Umrechnung auf repräsentative Angaben über die gesamte Wassertiefe am Meßort weiß, kann die Möglichkeiten zu unterschiedlichen Interpretationen ermessen. Sie werden noch größer, wenn die Messungen über Jahre oder sogar Jahrzehnte verteilt sind, aus denen man nichts über mögliche säkulare Veränderungen weiß. So legt zumindest der Vergleich der DHI-Entwürfe von 1959 und 1981 mit rd. 10 km vorverlegten 9-h-, 10-h- und 0-h-Linien sowie einer bis 20 km rückverlegten 11-h-Linie die Vermutungen nahe, daß

- der neuere Entwurf nicht einfach eine Korrektur des älteren auf größerer Datenbasis zu sein braucht,
- dies ebensogut Ausdruck geänderter Tideverhältnisse sein kann,
- die Lage des Scheitelpunktes keineswegs abgesichert ist.

Da im Zusammenhang mit dem hier behandelten Projekt nur die Amphidromie in der südöstlichen Nordsee – und davon wiederum der südöstliche Quadrant – interessieren, sind die Vergleiche auf Abb. 21 auf die Linien gleichen Thw-Zeitunterschiedes 9, 10, 11 und 0 h nach Monddurchgang durch den Nullmeridian beschränkt.

Der Vergleich der jetzt ausschließlich nach Pegeldata in Küstennähe konstruierbaren

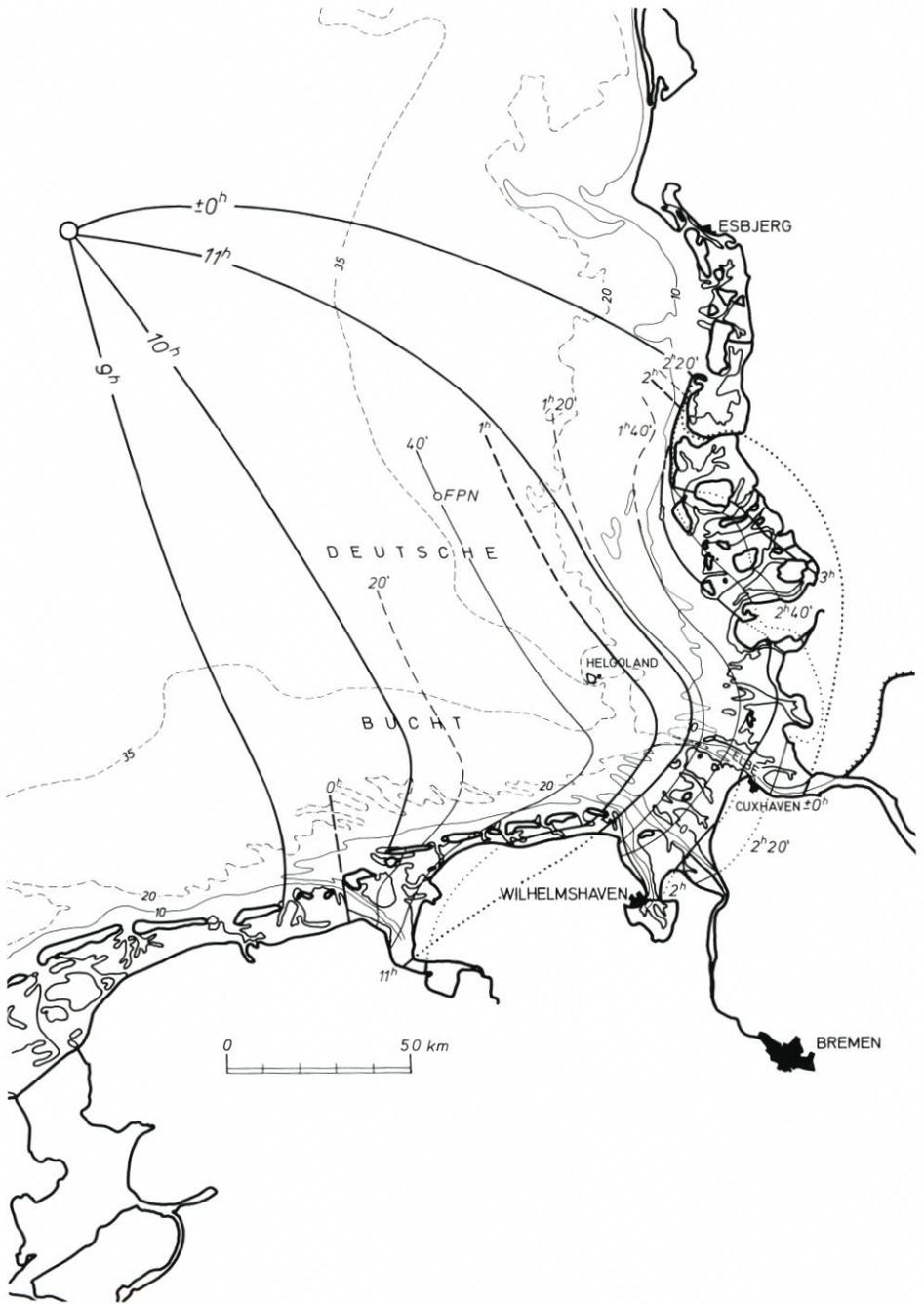


Abb. 21. Linien gleicher Thw-Eintrittszeiten nach üblicher amphidromischer Darstellung und nach den aktuellen Auswertungen

Linien mit dem letzten DHI-Entwurf zeigt, daß

- die Form der 10-h-Linie etwa bestätigt wird,
- die 11-h-Linie in ihrem südlichen Teil 5 km zu weit östlich liegt,
- die Form der 11-h-Linie südlich der Verbindung Helgoland-Eiderstedt bestätigt wird, nördlich davon jedoch zu stark nach Westen abbiegt,
- die Form der 0-h-Linie nicht beurteilt werden kann,
- die Lagen der 11-h-Linien im Emsästuar und der 0-h-Linien im Elbeästuar nicht übereinstimmen.

Wiederum kann nicht nachgewiesen werden, ob die Unterschiede durch die Analysen der Daten oder durch Tideänderungen in der Nordsee entstanden sind.

Darüber hinaus sei darauf hingewiesen, daß jede Partialtide eine eigene Amphidromie mit individueller Scheitellage bildet. Dieses Chaos ist tatsächlich nicht durch Messungen erfassbar. Dadurch wird die Festlegung eines „mittleren“ Scheitels noch problematischer, zugleich damit aber auch der Nachweis einer Konstanz – oder von Veränderungen.

3.3 Windstau-Kennlinien

Für insgesamt 12 Pegel wurden Windstau-Kennlinien bestimmt. Die Entwicklung der Linien sowie die sich durch sie ergebenden Interpretationsmöglichkeiten wurden bereits in Kapitel 2.4 vorgestellt. Abb. 22 enthält die Orte, für die Kennlinien bestimmt wurden. Als Bezugspegel diente hier stets Alte Weser (AW), so daß die Kurven als

$$k(t) = \frac{w(t)_A}{w(t)_{AW}}$$

mit $w(t)$ = Windstaukurve gem. Abb. 3

bestimmt wurden. Sofern mehr als 10 hohe Sturmfluten zur Ermittlung der Windstau-Kennlinien herangezogen wurden, wurde auch die Standardabweichung berechnet und mit den halbstündlichen Werten aufgetragen.

Abb. 23 zeigt die Windstauentwicklung von Alte Weser den Wattstrom Till aufwärts bis an die Küste bei Cuxhaven. Daraus sind folgende Erkenntnisse zu gewinnen:

Am seeseitigen Rand einer durch Platen gebildeten Bucht, also vor den hochliegenden Watten, ist der Windstau bei Flut 0 bis 10 % höher als bei Alte Weser (Pegel Westertill). Dasselbe gilt für die Tillmündung (Pegel Unterer Wittsand). Bei Ebbe steigt der Windstau – vermutlich durch örtliche Wind- und Brandungseffekte – auf rd. 20 % gegenüber Alte Weser an, während er in der Tillmündung etwa konstant bleibt. Das ist zunächst auch der Fall zwischen Unterem Wittsand und Kleinwatt mit $k(t) \approx \text{const.}$, jedoch von 0 bis 10 % auf 10 bis 20 % stromauf zunehmend. Eine bereits bei Kleinwatt angedeutete Linienführung über die Zeit ist im Sahlenburger Tief sehr stark ausgeprägt mit Verhältnissen w_{ST}/w_{AW} zwischen 0,85 (etwa bei Ebbstromkenterung) und 1,24 bei halber Flut.

Diese Kennlinienform scheint charakteristisch zu sein, denn sie gleicht derjenigen am Pegel Dorumer Watt (Abb. 24) in entsprechender topographischer Lage, und auch die Kurven in Husum und Büsum (Abb. 25) ähneln dieser. An den letzten drei Standorten wird das Maximum jedoch stets 1 bis 2 h vor T_{nw} mit Werten von 1,35 bis 1,50 erreicht, und der Abfall zur halben Ebbe ist in Husum und Büsum nicht sehr stark ausgeprägt.

Unmittelbar an der Küste (Pegel Arensch, Abb. 23) verläuft die Windstau-Kennlinie weitgehend horizontal bei rd. 1,20 und damit in einer Höhe, die niedriger als vielleicht

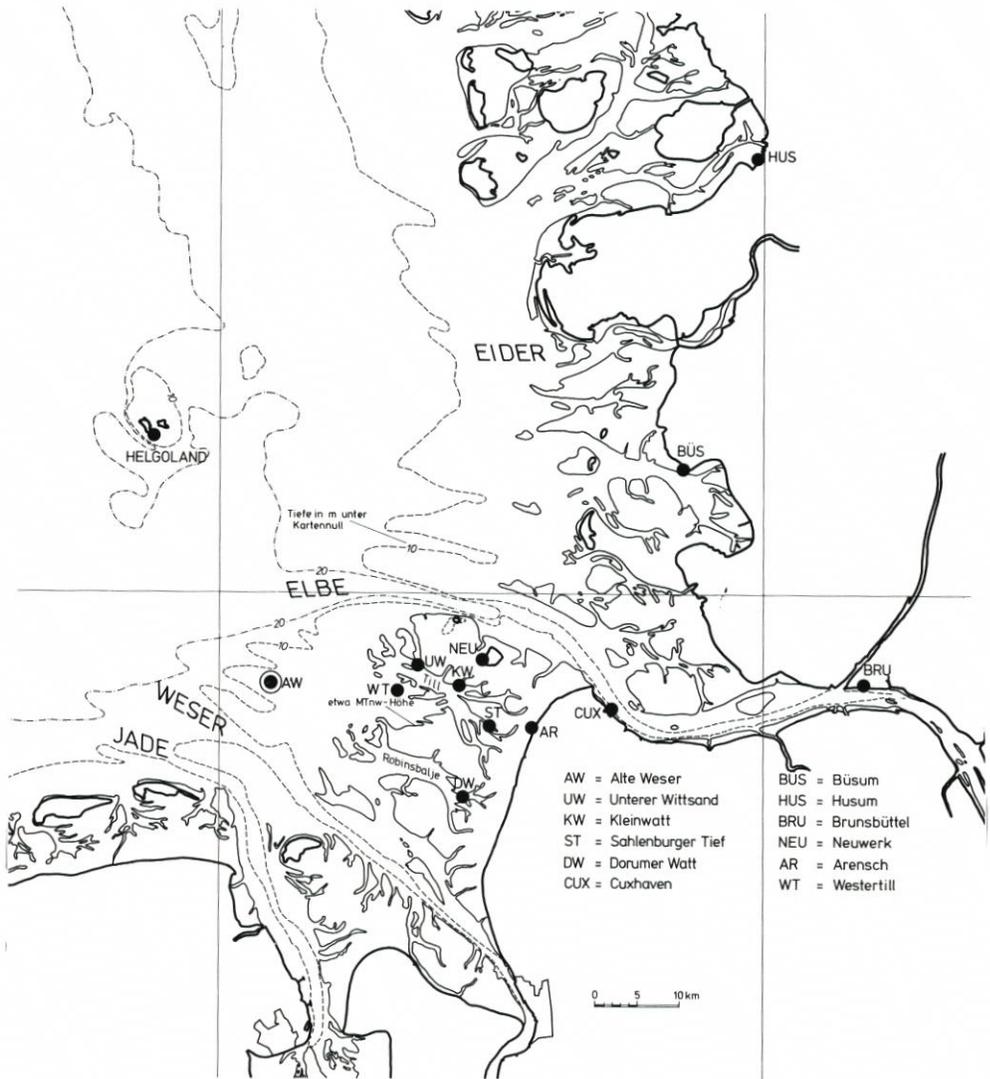


Abb. 22. Positionen, für die Windstau-Kennlinien bestimmt wurden

erwartet ist. Sie zeigt nämlich an, daß die Sturmfluten an dieser glatten Küste niedriger auflaufen als nur 10 km weiter östlich am Pegel Cuxhaven (Abb. 25), was besonders von den Windstau-Kennwerten für hohe Sturmfluten unterstrichen wird (1,15 gegen 1,24).

Die Windstau-Kennlinien in Husum und Büsum (Abb. 25) sind sehr ähnlich und zeigen Wechsel um rd. 0,5 zwischen Minimum und Maximum. Der Verlauf der Cuxhavener Linie deutet auf gewisse Übereinstimmungen, ist jedoch wegen der örtliche Einflüsse reduzierenden Wirkung des elbeaufwärts zu füllenden Volumens zwischen Minimum und Maximum auf die Hälfte gedämpft. Die stark regulierende Wirkung der Elbe wird auch an den Standardabweichungen deutlich, die in Cuxhaven fast immer unter 0,15 liegen, um Thw sogar 0,10 deutlich unterschreiten, in Büsum und besonders in Husum dagegen sehr viel größer sind.

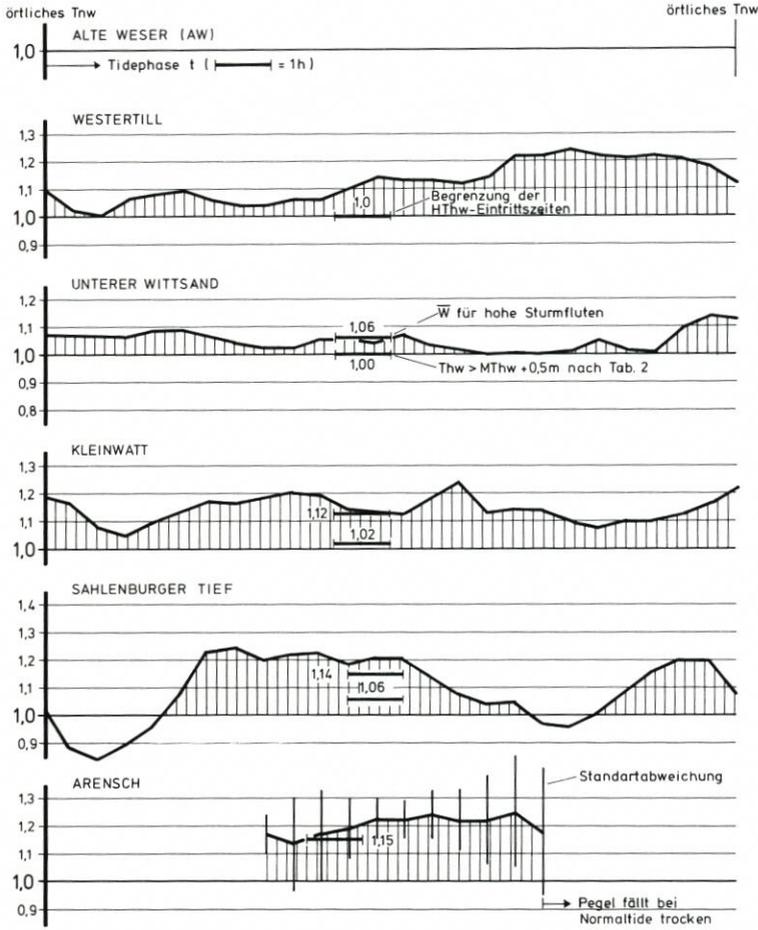


Abb. 23. Windstau-Kennlinien für Pegel von Alte Weser bis zur Wurster Küste (vgl. Abb. 22)

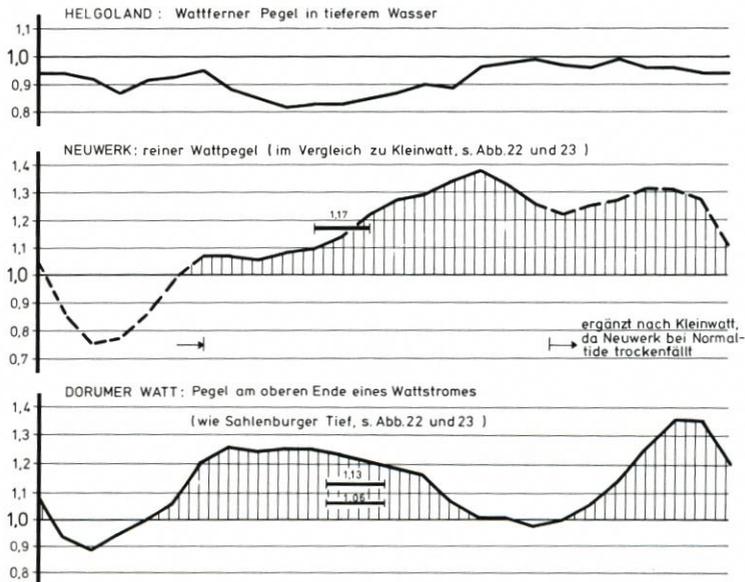


Abb. 24. Windstau-Kennlinien für Helgoland, Neuwerk und Dorumer Watt (vgl. Abb. 22)

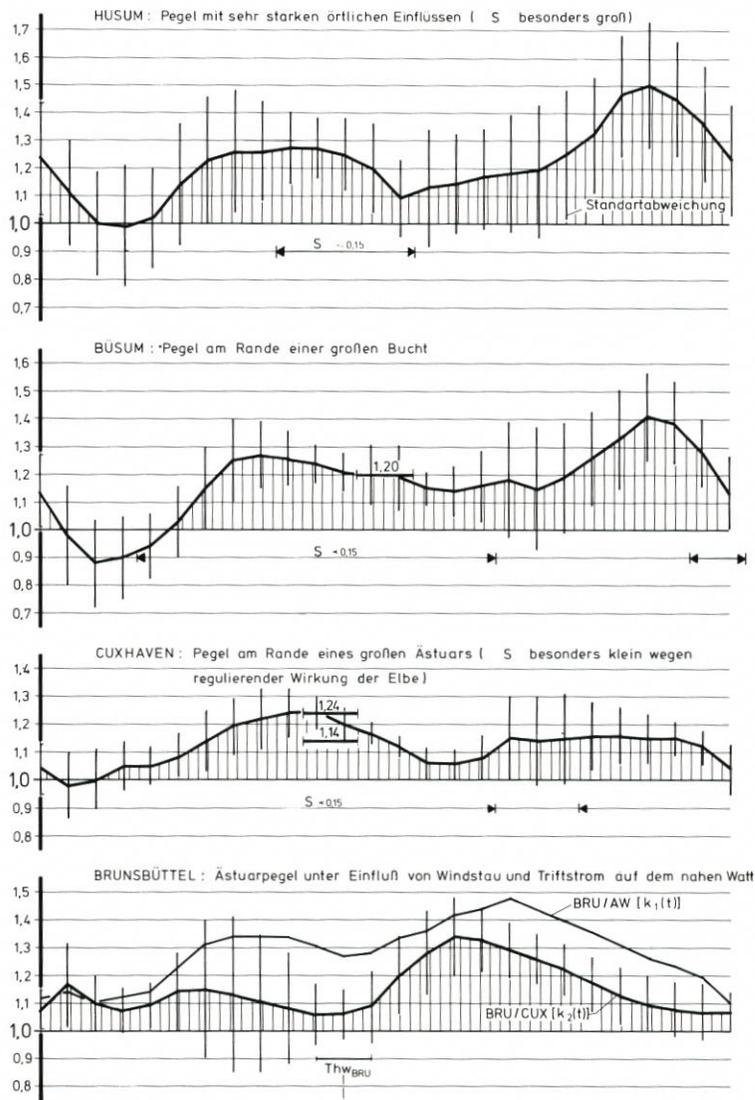


Abb. 25. Windstau-Kennlinien für Husum, Büsum, Cuxhaven und Brunsbüttel

Um den Einfluß der Triftströmung (Abb. 26) und der örtlichen Windstauentwicklung auf dem Wattkomplex Hakensand/Nordergründe/Medemsand auf die Windstauentwicklung in der Elbe zu beleuchten, enthält Abb. 25 die Kennlinien

$$k_1(t) = \frac{w(t)_{BRU}}{w(t)_{AW}} \quad \text{und} \quad k_2(t) = \frac{w(t)_{BRU}}{w(t)_{CUX}}$$

letztere einschl. Standardabweichung. Die auf Alte Weser bezogenen Kennlinien für Cuxhaven und Brunsbüttel unterscheiden sich in ihrem Gang teilweise erheblich: Beide erreichen ihr Minimum um die K_e -Zeit und das erste Maximum kurz vor Th_w . Während die Cuxhavener Linie sich dann jedoch bei etwa 1,15 stabilisiert, erreicht die Brunsbütteler ihr Maximum

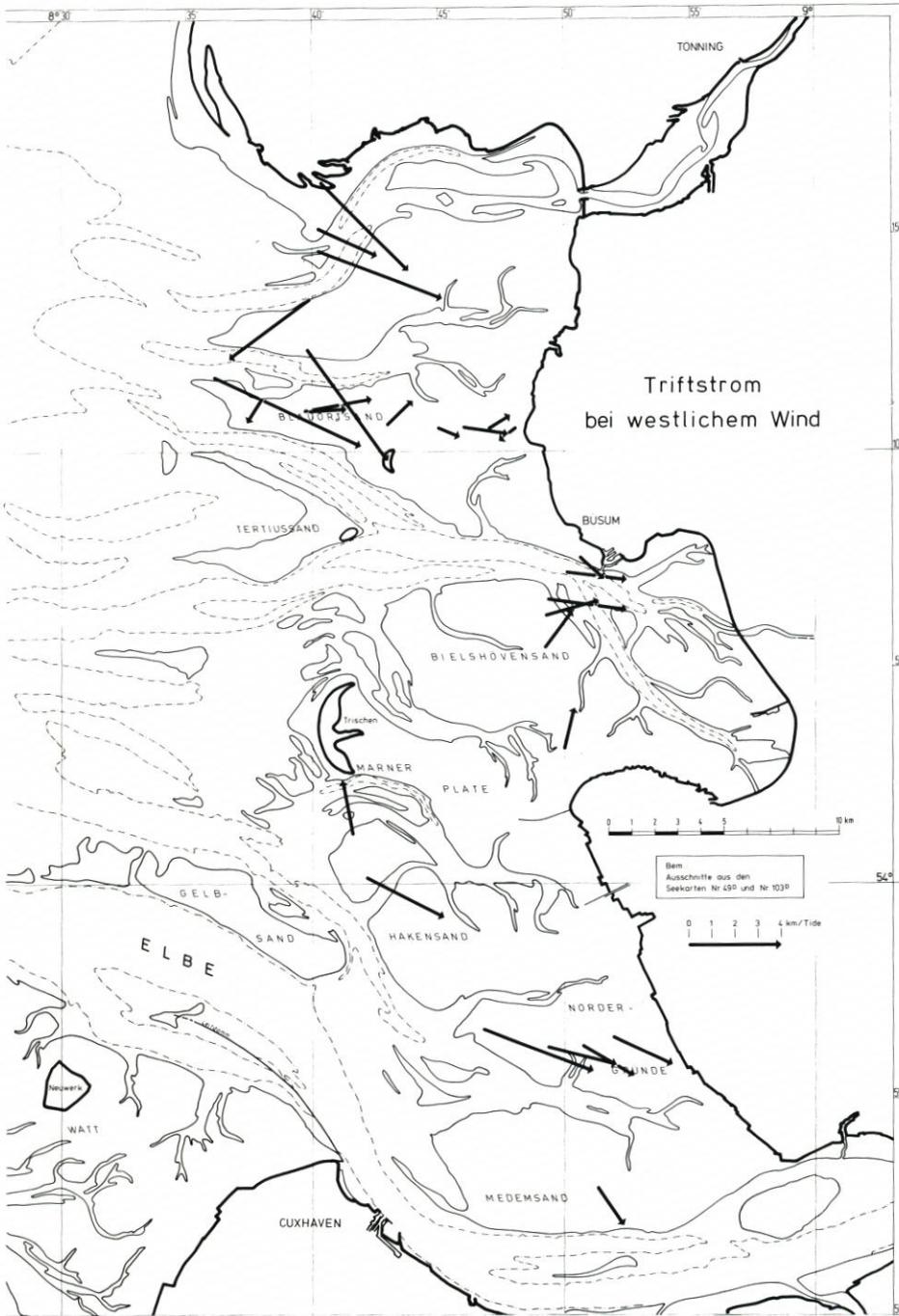


Abb. 26. Triftstrom zwischen Eider und Elbe bei westlichem Wind (nach SIEFERT et al., 1983)

von fast 1,50 zur halben Ebbe. Sie ähnelt damit der reinen Wattkennlinie des Pegels Neuwerk auf Abb. 24 und verläuft im Ebbeteil grundsätzlich anders als in Husum, Büsum, Cuxhaven und den Wattstrom-Stationen. Die Kennlinie $k_2(t)$ zeigt denn auch eine Windstauzunahme von Cuxhaven bis Brunsbüttel um rd. 7% bei T_{nw} und T_{hw} , aber 15% bei halber Flut und 30% bei halber Ebbe. Damit erreicht der örtliche Windeinfluß in dem Dreieck Cuxhaven--Trischen--Brunsbüttel Beträge, die größer sind als früher oft geglaubt wurde.

Der Pegel Helgoland zeigt auf Abb. 24 eine Windstau-Kennlinie, die eigentlich als einzige etwa erwartungsgemäß verläuft: stets unter 1,0 und um T_{nw} höher als um T_{hw} , wenn auch das Maximum zur halben Ebbe (wie bei Westertill auf Abb. 23) etwas „stört“.

Die bei dieser Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Der theoretische Ansatz

$$w(t) \sim \frac{1}{d}$$

mit d = Wassertiefe unter aktuellem Tidewasserstand

ist in dieser Form für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nicht realisierbar. Er müßte im Vergleich tieferes Wasser (etwa Alte Weser) – Watt bedeuten:

$w(t)_{AW} \rightarrow \text{const.}$ für konst. Windverhältnisse oder Mittel über mehrere Sturmfluten

$$\text{und } w(t)_{Watt} \sim \frac{1}{d}$$

woraus sich ergäbe:

$$k(t)_{Watt} = \frac{w(t)_{Watt}}{w(t)_{AW}} \sim \frac{1}{d}$$

was in gewissen Grenzen stimmt, siehe Arensch (Abb. 23) und Neuwerk (Abb. 24). Allerdings ist die Wassertiefe vor Arensch kleiner als bei Neuwerk, was zu

$$k(t)_{NEU} < k(t)_{AR}$$

führen müßte; tatsächlich sind beide etwa gleich groß. Ferner müßte der Windstau an tiefen Rinnen etwa gleich dem bei Alte Weser bleiben, was aber weder in Cuxhaven noch in Brunsbüttel der Fall ist.

Hinsichtlich der Wassertiefenentwicklung $d = f(t)$ über die Tide erweist sich der theoretische Ansatz als völlig unbrauchbar zur Bestimmung der Windstau-Kennlinie:

- An keinem der untersuchten Pegel liegt das Maximum zur T_{nw} -Zeit;
- nur bei Helgoland liegt das Minimum etwa zur T_{hw} -Zeit;
- die Extremwerte treten meist z. Zt. K_e (Min.) bzw. zur halben Ebbe (Max.) auf;
- selbst im Watt, kurz unter der Küste, kann der Windstau über mehrere Stunden kleiner als im tieferen Wasser sein.

Der Verlauf der Windstau-Kennlinien wird weit mehr als durch die Wassertiefe durch

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

Diese Zusammenhänge erklären allerdings noch nicht, warum – auch im tieferen Wasser bei Alte Weser – das Windstaumaximum häufiger nahe T_{nw} als nahe T_{hw} liegt. Sicher ist die Phasenlage des Windstaus Ausdruck der zufälligen Überlagerung von Tide und Wind. Aber ebenso ist anzunehmen, daß die auf Abb. 14 erscheinende Senke vor der Küste schon bei relativ kleinen Windstärken und selbst bei Wind aus SW durch geringfügige Verstärkung der

Gefälle relativ schnell von Westen und von Norden aufzufüllen ist. So kann die Tatsache, daß der Windstau bei geringen Wassertiefen (nämlich um Tnw) bei gleichem Wind höher als bei größeren Wassertiefen ist, möglicherweise mit der Füllung dieser Senke – und damit als regionaler Effekt – gedeutet werden.

Abschließend sei bemerkt, daß durch diese Untersuchungen nur ein Hinweis auf ein neues Forschungsfeld gegeben werden kann, dessen weitere Bearbeitung und auch theoretische Behandlung mit Sicherheit zu neuen Erkenntnissen führen dürfte. Soweit möglich, sollen sie im Folgeprojekt *Sturmfluten in Ästuaren* erlangt werden.

3.4 Zur Tideentwicklung seit 1900

3.4.1 Genauigkeit früher Küstennivellements

Langfristige Veränderungen im Tideablauf an der Nordseeküste lassen sich dann exakt analysieren, wenn zum jeweiligen Pegel das betreffende Δh (Landeshorizont \rightarrow Pegelfestpunkt \rightarrow Pegelnullpunkt) seit Inbetriebnahme zuverlässig erfaßt und fortgeführt worden ist. Gerade diese Ableitung ist bei Betrachtung von kausalen Zusammenhängen zwischen neueren und älteren Wasserstandswerten wichtig, aber teilweise auch sehr problematisch, weil der Nachweis erforderlich werden kann, ob festgestellte Höhenänderungen tatsächlich eingetreten sind oder nur durch die Meßanordnung bei Anschlußnivellements oder von fehlerhaften Meßwerten oder von Systemunstimmigkeiten vorgetäuscht werden.

Erfahrungsgemäß sind Vertikalbewegungen der Pegelnullpunkte für den Zeitraum nach 1936 mit hinreichender Genauigkeit belegbar, während sie für die Zeitspanne von 1936 bis hin zum vorigen Jahrhundert vom Ursprung her zur Bezugsenebene NN – 5 m überprüft werden müssen.

Die genannte Problemstellung war Anlaß, den Pegelfestpunkt des Cuxhavener Pegels unter konsequenter Ausnutzung von Nivellementsergebnissen ab 1854/55 auf Höhenbewegungen zu überprüfen. Die Schwierigkeiten dieser Untersuchung bestanden einmal in der sehr zeitaufwendigen Umrechnung von Fuß- in Metermaß für ältere Nivellements (u. a. LENTZ und TAACK) und zum anderen in der Bestimmung von veränderten Höhenfestpunkten für den Untersuchungszeitraum (LASSEN et al., 1984).

Im Hinblick auf die Erfassung von Höhenbewegungen der Cuxhavener Pegelkontrollmarke am dortigen Leuchtturm ab 1855 war es unvermeidbar, den Ausgangspunkt vieler historischer Nivellements – die damalige „Kontrollmarke am Hamburger Fluthmesser (eingehauene Kerbe XXVI in der Futtermauer beim Hafenthor)“ – durch geeignete Methoden in eine signifikante Beziehung zum preußischen Landeshorizont NN in Verbindung zu bringen.

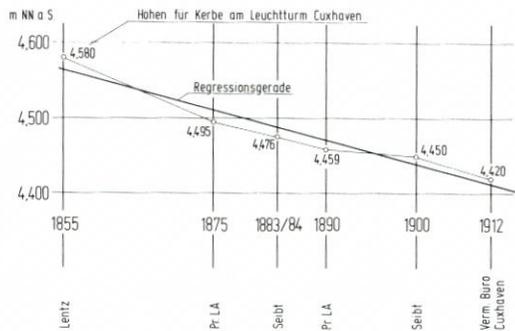
Die weitere Tatsache, daß LENTZ vorausschauend bei „Revisionsmessungen“ gußeiserne Höhenschilder an massiven Bauwerken befestigen ließ (das letzte ist noch heute auf der Insel Neuwerk vorhanden), ermöglichte es, eine gute Verknüpfung von älteren und neueren Nivellements über diese Höhenschilder und weitere Festpunkte auf der Geest von 1855 bis heute zu erreichen.

Nach Auswertung folgender Nivellements:

LENTZ	1854/55 Hamburg–Cuxhaven
TAACK	Nachmessungen von Otterndorf bis Cuxhaven
Preußische Landesaufnahme	1875 mit Ergänzungsmessungen bis 1912

SEIBT (im preußischen geodätischen Institut, später Büro für Hauptnivellements und Wasserstandsbeobachtungen)	1876/77; 1881; 1885; 1890; 1883/84 Gradmessung Nivellement Anclam-Cuxhaven
Nivellements im Amte Ritzebüttel (heutiges Cuxhaven)	1864 bis 1912
Hamburger Vermessungsbüro in Cuxhaven	1912 bis 1935
Reichsamt für Landesaufnahme	1914 bis 1935
Niedersächsisches Landesverwaltungsamt – Landesvermessung – Bundesanstalt für Gewässerkunde Vermessungsamt der Freien und Hansestadt Hamburg	1950 bis 1981
Nordseeküstennivellement I	1926 bis 1931
Nordseeküstennivellement II	1949 bis 1955

erkennt man eine Senkungstendenz des auf Holzpfählen gegründeten Leuchtturmes aus den abnehmenden Höhenwerten der Pegelkontrollmarke (eingehauene Kerbe). Ein funktionaler Zusammenhang zwischen Zeit und Höhe läßt sich aus einer Korrelationsanalyse ableiten. Der errechnete Korrelationskoeffizient $r = -0,97$ bestätigt den straffen Zusammenhang der Variablen Zeit und Höhe von 1855 bis 1912:



Die Höhe des Pegels Cuxhaven ist eng mit der Bewegungstendenz des Leuchtturmes verbunden. Der Sollhöhenunterschied Kerbe – Pegelnullpunkt, von LENTZ 1855 mit $-6,210$ m bestimmt und 1872 um $-1,893$ m auf $-8,103$ m zur theoretischen Angleichung an das Hamburger Null korrigiert, wird bei Pegelprüfungen unverändert angehalten und beeinflusst die Lage des Pegelnullpunktes.

Unter Zugrundelegung aller Erkenntnisse und der Umrechnung vom „alten“ auf das „neue System“ (NN a.S. auf NN n.S.) sind die Wasserstände in den Gewässerkundlichen Jahrbüchern für Cuxhaven um folgende Beträge zu korrigieren:

- vor 1855 unbekannt
- von 1855 bis 1875 gleichmäßig von $+10$ cm auf $+1,5$ cm
- bis 1890 gleichmäßig auf $-1,5$ cm
- bis 1900 gleichmäßig auf $-2,7$ cm

ab 1900 unverändert (die Angaben in den Gewässerk. Jb. sind auf „a. S.“ bezogen, gelten aber für „n. S.“ als richtig, da sich zwei Annahmen gegeneinander aufheben, und zwar $-2,7\text{ cm} + 2,5\text{ cm}$)

ab 1936 keine Korrekturen außer den angegebenen PNP-Verschiebungen.

Die Auswirkungen werden am Beispiel 3jähriger übergreifender Mittel auf Abb. 27 gezeigt. Als Resultate ergeben sich dabei u. a. vor 1900 zwischen Hamburg und Cuxhaven etwa konstante MThw-Differenzen sowie von 1860 bis 1890 fallende MTnw-Höhen in Cuxhaven, wie wir sie auch seit etwa 1950 wieder beobachten können.

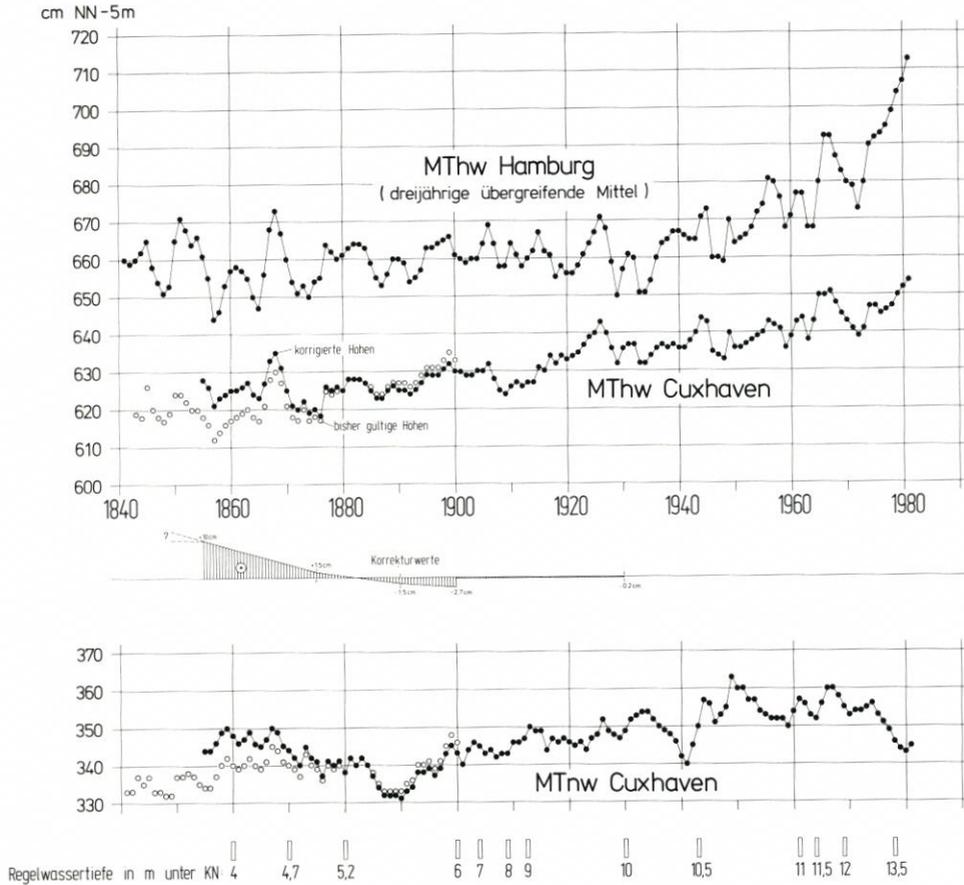


Abb. 27. Dreijährige übergreifende Mittel der Thw und Tnw für Cuxhaven mit den Korrekturwerten bis 1900. Zusätzlich sind die Thw für Hamburg eingetragen

3.4.2 Veränderungen an einzelnen Küstenorten

Norderney: Für Norderney wurden drei Zeiträume untersucht, in denen allerdings die Pegelstandorte wechselten. Die Daten wurden den Gewässerkundlichen Jahrbüchern entnommen und nach den unter Kapitel 2 genannten Methoden jeweils als 5jährige Mittel erstellt. Die Pegelnullpunkt-Höhen wurden geprüft und sämtlich auf NN-5 m umgerechnet:

Parameter	Einheit	1906/10	1931/35	1975/79
MThw	cm NN-5 m	598	609	615
MTnw	cm NN-5 m	366	372	372
MThb	cm	232	237	243
T _F	h	6.06	6.08	6.01
T _E	h	6.19	6.17	6.24
T _F /T _E	-	0,97	0,98	0,94

Die Daten wurden außerdem über Regressionen mit dem Pegel Cuxhaven berechnet. Die Abweichungen erreichen max. 2 cm bzw. 3 min, so daß die Entwicklung der mittleren Tideverhältnisse im Gebiet der Ostfriesischen Inseln überschläglicly auch über Cuxhaven rekonstruiert werden kann!

Im übrigen zeigen sich Tendenzen zu steigenden MThw, jetzt nicht mehr steigenden MTnw und kürzeren T_F.

Wilhelmshaven: Dieselben Zeiträume wie für Norderney wurden auch für Wilhelmshaven-Alter Vorhafen untersucht. Die Daten wurden den Gewässerkundlichen Jahrbüchern entnommen, wobei sich allerdings herausstellte, daß die Werte aus 1906/10 nicht mit denen auf den Pegelbögen übereinstimmen. Es besteht der Verdacht, daß es damals zwar schon den Schreibpegel gab, die „offiziellen“ Wasserstände aber von einem Lattenpegel an anderem Orte stammen. Deshalb wurde keine mittlere Tidekurve 1906/10 berechnet.

Parameter	Einheit	1906/10	1931/35	1975/79
MThw	cm NN-5 m	652	655	670
MTnw	cm NN-5 m	296	302	293
MThb	cm	356	353	377
T _F	h	6.12	6.15	6.21
T _E	h	6.13	6.10	6.04
T _F /T _E	-	1,00	1,01	1,05

Die Veränderung der mittleren Tidekurven dieses Küstenpegels mit dem größten Tidehub zeigt von 1931/35 auf 1975/79 Abb. 28. Die Tendenzen sind etwas anders als bei Norderney: MThw steigt deutlich, MTnw fällt, T_F wächst deutlich. Das alles resultiert in stärkeren Steig- und Fallgeschwindigkeiten mit entsprechenden Auswirkungen auf die Tideströmungen.

Cuxhaven: Die Cuxhavener Daten für 1906/10 (westl. Hafenkopf), 1931/35 (östl. Hafenkopf) und 1975/79 (Steubenhöft) wurden ebenfalls den Gewässerkundlichen Jahrbüchern entnommen, allerdings mit einer Korrektur des PN gem. Kapitel 3.4.1. Danach gelten folgende Werte:

Parameter	Einheit	1906/10	1931/35	1975/79
MThw	cm NN-5 m	626	632	645
MTnw	cm NN-5 m	342	350	346
MThb	cm	284	282	299
T _F	h	5.38	5.42	5.40
T _E	h	6.47	6.43	6.45
T _F /T _E	-	0,83	0,85	0,84

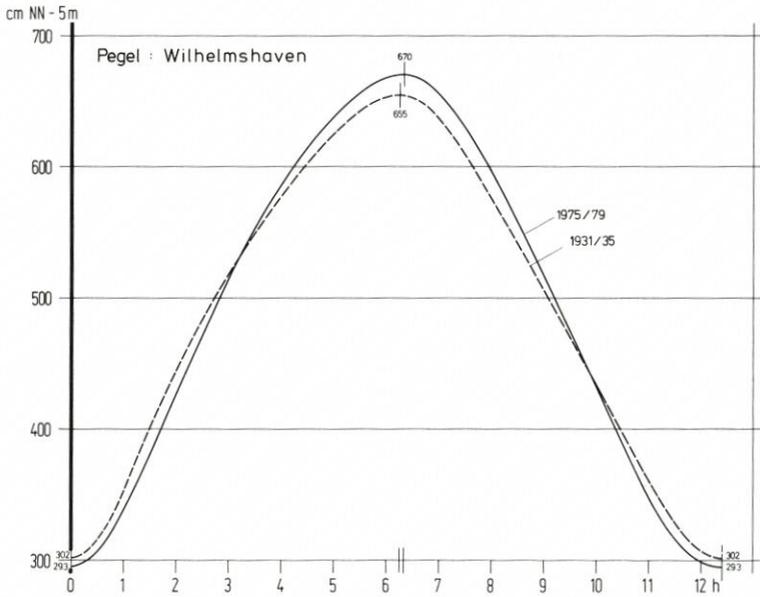


Abb. 28. Mittlere Tidekurven 1931/35 und 1975/79 für Wilhelmshaven

MThw steigt an, MTnw und T_F sind etwa konstant. Entsprechend zeigen die mittleren Tidekurven auf Abb. 29 vor allem die 1975/79 in der ersten Fluthälfte deutlich gegen früher erhöhte Steiggeschwindigkeit.

Hörnum und Osterley: Für beide Orte werden die Zeiträume 1918/19 und 1975/79 verglichen, wobei nicht genau bekannt ist, wie weit entfernt der Pegel Osterley 1982

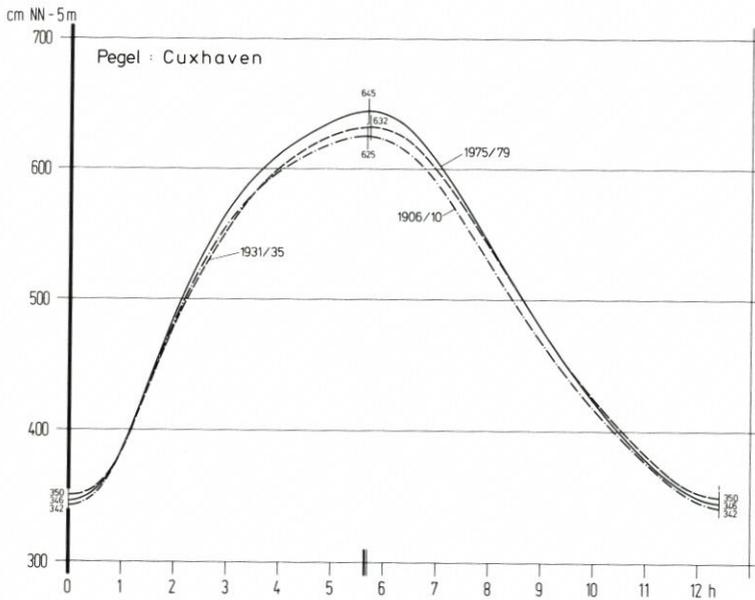


Abb. 29. Mittlere Tidekurven 1906/10, 1931/35 und 1975/79 für Cuxhaven

(Nr. 6.23 in Abb. 1) von dem Standort 1918/19 bei den Untersuchungen von PFEIFFER stand. Erstaunlich ist in diesem Zusammenhang, daß die Originalaufzeichnungen von 1918/19 den Schluß zulassen, daß sie von PFEIFFER damals nicht ausgewertet und in seine Überlegungen einbezogen worden waren. Die Ergebnisse sind:

Pegel	Parameter	Einheit	1918/19	1975/79
Hörnum	MThw	cm NN-5 m	561	586
	MTnw	cm NN-5 m	386	387
	MThb	cm	175	199
	T _F	h	5.40	6.16
	T _E	h	6.45	6.09
	T _F /T _E	-	0,84	1,02
Osterley	MThw	cm NN-5 m	582	616
	MTnw	cm NN-5 m	408	385
	MThb	cm	174	231
	T _F	h	4.34	5.03
	T _E	h	7.51	7.22
	T _F /T _E	-	0,58	0,69

Die großen Veränderungen in den mittleren Tidekurven werden auf Abb. 30 deutlich, zugleich aber auch die unterschiedliche Tideentwicklung: In der Osterley zeigt sich ähnliches wie in Norderney, Wilhelmshaven und Cuxhaven. Bei Hörnum dagegen bleibt das T_{nw}-Niveau, und nur das Thw steigt beträchtlich, wobei die T_F-Zunahme wegen der sehr flachen Thw-Scheitel nicht überbewertet werden darf.

Die Tideveränderungen größtenteils mit dem Bau des Hindenburgdammes erklären zu wollen, stößt auf gewisse Schwierigkeiten, da sich die Wasserstände bei List anders entwickelt haben, als sie es bei solcher Annahme hätten tun dürfen (s. u.).

List: Für List wurden die Zeiträume 1906/08, 1931/35 und 1975/79 mit folgenden Ergebnissen aus den Gewässerkundlichen Jahrbüchern berechnet:

Parameter	Einheit	1906/08	1931/35	1975/79
MThw	cm NN-5 m	553	562	572
MTnw	cm NN-5 m	389	410	392
MThb	cm	164	152	180
T _F	h	6.16	6.17	6.17
T _E	h	6.09	6.08	6.08
T _F /T _E	-	1,02	1,02	1,02

Die Entwicklung mit steigendem Thw, heute etwa gleichem T_{nw} wie vor dem Bau des Hindenburgdammes und konstanten T_F kann kaum als Ausdruck des Dammbaues angesehen werden, sondern entspricht der allgemeinen Tendenz in unserem Küstenvorfeld.

Für List wurden wie für Norderney Regressionen mit Cuxhaven berechnet. Die Abweichungen sind mit max. 4 cm und 7 min ebenfalls so klein, daß auch die Veränderungen in List mit hinreichender Genauigkeit über Cuxhaven berechnet werden könnten.

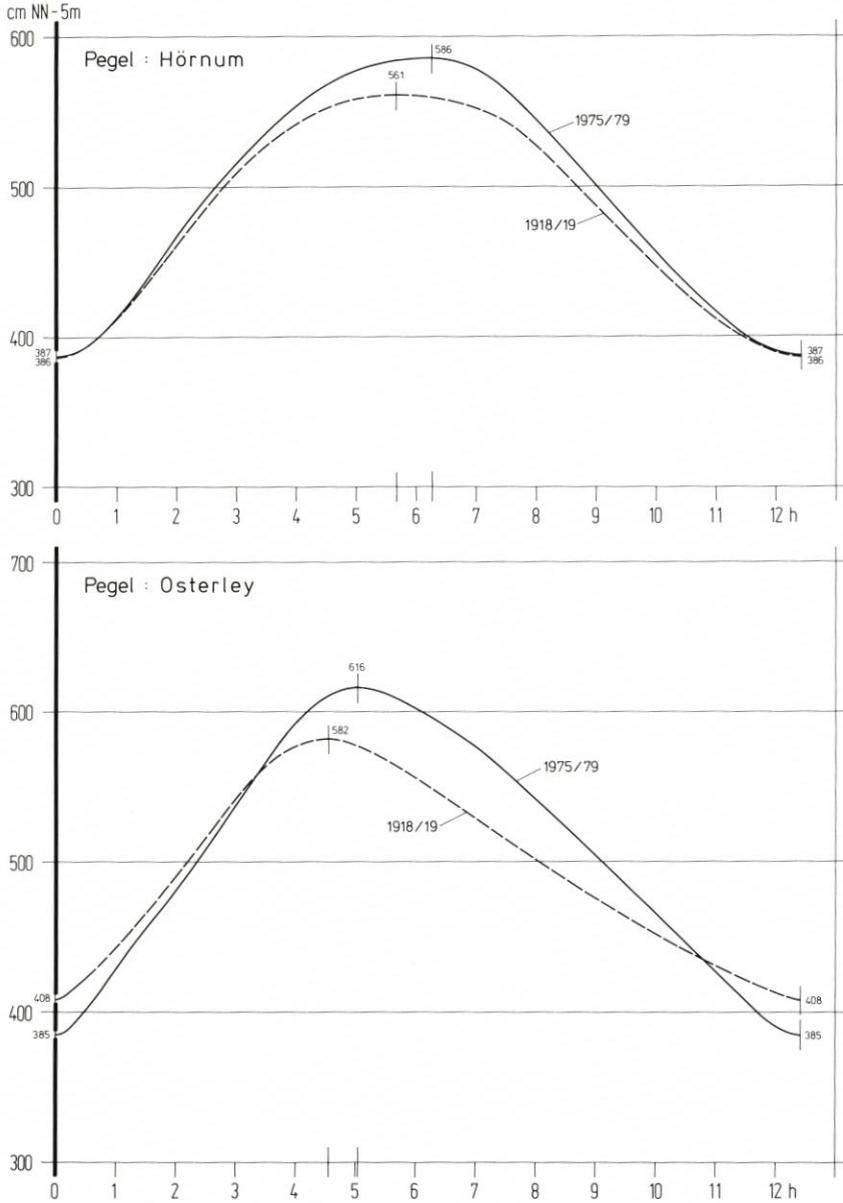


Abb. 30. Mittlere Tidekurven 1918/19 und 1975/79 für Hörnum und Osterley

4. Anregungen für zukünftige Arbeiten

Diese umfangreiche Bearbeitung von Wasserstandsmessungen für das deutsche Küstengebiet hat erwartungsgemäß eine Reihe von Erkenntnissen und Vorschlägen hervorgebracht. Sie werden hier kurz zusammengefaßt:

- MThw und MTnw von Anschlußpegeln können über Regressionen zu Bezugspegeln bereits repräsentativ aus 100 bis 200 Tiden (2 bis 3 Monate) bestimmt werden.
 - T_F und T_E können hinreichend genau aus 29 Tiden (möglichst erste Hälfte Juni) berechnet werden.
 - Beide Erkenntnisse führen zu dem Schluß, daß Anschlußpegel als Ergänzungen zu einem durchdachten, festen Netz von Bezugspegeln zur Bestimmung der mittleren Tideverhältnisse nur kurzfristig an einzelnen Standorten eingesetzt zu werden brauchen; es wäre zur genaueren Ermittlung der Tideverhältnisse sehr wertvoll, wenn die Standorte der Anschlußpegel möglichst häufig gewechselt würden.
 - Jeder dieser Anschlußpegel-Standorte sollte etwa nach fünf Jahren wieder besetzt werden.
 - Selbst weniger Pegel als heute, aber an sinnvollen Standorten in festem Turnus bei guter Wartung eingesetzt, würden unsere Kenntnisse wesentlich verbessern.
 - Es gibt Gebiete mit auch heute noch unklaren Tideverhältnissen. Dazu gehören vor allem: das Watt zwischen den Ostfriesischen Inseln und der Küste^{*)}, das Hoheweg-Watt, die Westküste von Eiderstedt, die Westufer von Süderoog Sand, Amrum, Sylt, Vortrapptief und Hörnumtief sowie die Deutsche Bucht nordwestlich der Linie Borkum-Helgoland-Sylt. Es wird empfohlen, in diesen Bereichen nach og. Schema mit Anschlußpegeln zu arbeiten und in der Deutschen Bucht als nächsten Schritt für einige Wochen Tiefseepiegel auf den Linien Juist-Forschungsplattform und von dort nach Sylt auszulegen.
 - Der Pegel auf der Forschungsplattform Nordsee sollte fachgerecht und mit moderner Technologie betrieben und ausgewertet werden; Höhenanschluß (wie auch für Helgoland) ist wünschenswert.
 - Eine Erweiterung der vorgelegten Ergebnisse auf die niederländischen und dänischen Küsten ist anzustreben.
 - Man sollte zentrale Pegel mit digitalen Registriereinrichtungen für Wasserstand, -temperatur, Luftdruck, -temperatur und Strömung als Dauermeßstationen einrichten.
 - Zur Messung von Sturmflutwasserständen ist ein unter diesen Gesichtspunkten festzulegendes Pegelnetz erforderlich.
 - Bei der Diskussion von Wasserstandsänderungen müssen stets die Tideströmungen einbezogen werden.
 - Es wäre ohne allzu großen Aufwand möglich, die mittleren Tideverhältnisse in vergangenen Jahrzehnten zu rekonstruieren.
 - Schließlich sollte es möglich sein, die Anzahl von acht verwendeten verschiedenen Registrierbogen-Größen und -Maßstäben zu reduzieren.
- Der Wert der bisher geleisteten Arbeit kann wesentlich gesteigert werden, wenn in wenigen Jahren eine Erweiterung und Überprüfung der Erkenntnisse vorgenommen wird.

5. Schriftenverzeichnis

- DEFANT, A.: Die Gezeiten der Nordsee, Beobachtung und Theorie. Ann. der Hydr., H. 8, 1923.
GÖHREN, H.: Das Korrelationsverfahren bei der Auswertung häufig unterbrochener oder zeitlich begrenzter Wasserstandsbeobachtungen im Tidegebiet. Dt. Gew. Mitt., H. 5, 1964.
GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitt. des Franzius-Inst., H. 30, 1968.
GÖHREN, H.: Tidewasserstände und Windstau im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 3, 1968.
GÖHREN, H.: Über Strömungsverhältnisse und Sandtransport in den Flachwassergebieten vor der südöstlichen Nordseeküste. Hamb. Küstenf., H. 29, 1974.

^{*)} Einige Daten des Bauamtes für Küstenschutz, Norden, wären noch nachzutragen.

- GRAFF, J. u. BLACKMAN, D. L.: Analysis of Maximum Sea Levels in Southern England. Proc. 16th ICCE, ASCE, New York, 1979.
- KOCH, M. u. LUCK, G.: Untersuchungen zur Erfassung der Strömungsverhältnisse auf den östlichen Weserwatten. Jber. 1972 der Forschungsstelle Norderney, Bd. 24, 1973.
- KREYSZIG, E.: Statistische Methoden und ihre Anwendungen. Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen, 1977.
- LASSEN, H., LINKE, G. u. BRAASCH, G.: Säkularer Meeresspiegelanstieg und tektonische Senkungsvorgänge an der Nordseeküste. Zeitschr. Vermessungswesen und Raumordnung, H. 2, 1984.
- LÜDERS, K.: Über die Genauigkeit verschiedener Verfahren zum Entwerfen der „mittleren Tidekurve“. Neues Archiv für Nds., H. 19, 1950.
- MÜLLER, F. u. FISCHER, O.: Sylt. In: Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Westküste, II. Teil, 7. Folge. Verl. D. Reimer, Berlin, 1938.
- PUGH, D. T. u. VASSIE, J. M.: Extreme Sea Levels from Tide and Surge Probability. Proc. 16th ICCE, ASCE, New York, 1979.
- ROHDE, H.: Zur Geschichte des Pegels Helgoland. Dt. Gew. Mitt., H. 5, 1982.
- SAGER, G.: Atlas der Elemente des Tidenhubs und der Gezeitenströme für die Nordsee, den Kanal und die Irische See. Dt. Akad. der Wiss. zu Berlin, Inst. für Meereskunde, Rostock, 1963.
- SIEFERT, W.: Ergänzende Wasserstandsuntersuchungen im Elbmündungsgebiet und im Wurster Watt. Hamb. Küstenf., H. 27, 1973.
- SIEFERT, W.: Über das Sturmflutgeschehen in Tideflüssen. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 63, 1978.
- SIEFERT, W.: Bemerkenswerte Veränderungen der Wasserstände in den deutschen Tideflüssen. Die Küste, H. 37, 1982.
- SIEFERT, W., FAHSE, H., MIESSNER, F., RICHTER, H.-H., TAUBERT, A. u. WIELAND, P.: Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins - Ergebnisse eines KFKI-Meßprogramms. Die Küste, H. 35, 1980.
- SIEFERT, W., MIESSNER, F., RICHTER, H.-H. u. WIELAND, P.: Triftströmungen vor der Küste zwischen Eider und Elbe. Die Küste, H. 38, 1983.
- STANGE, K.: Angewandte Statistik. 2. Teil, Springer-Verlag, Berlin, 1971.
- THORADE, H.: Probleme der Wasserwellen. Verlag Henri Grand, Hamburg, 1931.
- WALTHER, F.: Grundlagen für die Entwicklung der Meeresströmungen in den Seegaten und Wattgebieten der ostfriesischen Küste. Die Wasserwirtschaft, H. 1 und 2, 1949.
- WIESE, H.-W.: Messungen der Wasserstände in der Deutschen Bucht während DEBEX '81. Erste Ergebnisse mit neuen Hochseepegeln. Intermaritec, 1982.
- WSA BREMERHAVEN: Tidewasserstände in der Außenweser. Teilber. 1 (1975), 2 (1977) und 3 (1979), unveröff.
- WWA BRAKE: Studie zum statistischen Zusammenhang zwischen dem Tidehochwasserstand am Pegel LT Alte Weser und den Pegeln Bremerhaven, Fedderwardersiel, Spieka-Neufeld, Cuxhaven. Unveröff., 1982.