

Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee – säkularer Trend und Verhältnisse um 1980 (Schlußbericht eines KFKI-Projektes)

Von HORST LASSEN und WINFRIED SIEFERT

Zusammenfassung

Durch den Umfang der Arbeiten zum KFKI-Projekt „Tide und Windstau“ wurde es notwendig, die Arbeitsergebnisse in mehreren Teiluntersuchungen zu schildern. Der 1. Teil, „Örtliche und zeitliche Variation des Meeresspiegels“, ist bereits in H. 50 der „Küste“ veröffentlicht. In dem vorliegenden 2. Teil werden Aspekte zur Gezeitenbewegung in der südöstlichen Nordsee und zum säkularen Trend behandelt. Es werden Angaben zur Exaktheit und über die Zuverlässigkeit von Wasserstandsdaten getroffen und auf die Schwierigkeiten bei säkularen Trendbezeichnungen des „Meeresspiegels“ hingewiesen. Die zu diesen Vorausberechnungen verwendeten Daten sind trotz ihrer Fülle immer noch zu unvollständig, um abgesicherte Prognosen hervorzubringen.

Für den Meeresbereich des Untersuchungsgebietes fehlt über größere Zeiträume zuverlässiges und zusammenhängendes Datenmaterial der physikalischen Zustandsgrößen von Einflußfaktoren auf die Meereshöhe. Diese Faktoren können Meeresspiegelschwankungen hinsichtlich ihres zeitlichen Ablaufs ganz entscheidend beeinflussen, wobei einige Parameter zum Teil ganz überraschend auftreten und nur kurzlebige Parameter sein können. Daher ist es zur Zeit nicht möglich, einen hypothesenfreien säkularen Trend anzugeben und diesen für die Zukunft überschaubar darzustellen. Gegenwärtig zeichnet sich ein Steigen des Tidemittelwassers um 1 bis 1,5 dm/Jh ab. Aber die Frage, ob der Wasserstand in Zukunft weiter steigen wird, ist nicht mit Sicherheit zu beantworten, auch wenn Ergebnisse aus extrapolierten Zeitreihen durch statistische Tests untermauert werden.

Das Problem kann nur im Rahmen interdisziplinärer Zusammenarbeit geklärt werden. Auch sollten die unter 3.5 genannten Pegelstationen soweit ausgebaut werden, daß alle erforderlichen Daten zur sicheren Gezeitendarstellung mit der Tideaufzeichnung erfaßt werden. Von diesen Stationen am Rande des Küstenvorfeldes ist Helgoland von zentraler Bedeutung.

Die aus gewonnenen Meßdaten entwickelten und dargestellten mittleren Tideverhältnisse um 1980 in der südöstlichen Nordsee liefern gegenüber 1975/79 (SIEFERT und LASSEN, 1985) verbesserte Informationen über den Verlauf von Flutstundenlinien und Linien gleicher Tidewasserstände, weil weitere Stationen hinzukommen, so daß jetzt Daten von rd. 240 Meßstellen vorliegen. Durch die Verwendung von Hochseepegeldaten und eines nur geringfügig unsicheren Anschlusses an das deutsche Höhennetz war es möglich, den Meeresbereich in die Gezeitenbeschreibung einzubeziehen.

Summary

Due to the complexity and extensiveness of the KfKI Project "Tidal and Wind Set-Up", the results have to be reported in several papers each dealing with a specific area of the study. The first part entitled "Spatial and Temporal Water Level Variations" has already been published in Volume 50 of "Die Küste". This second paper treats aspects of the tidal motion in the southeastern North Sea and its secular trend. The accuracy and reliability of the water level information are discussed, as well as the difficulties related to the determination of the secular trend. The data base used to make this analysis is voluminous but still not complete enough to make foolproof predictions.

Reliable and simultaneous data of the physical factors affecting the water heights are missing for the seaward portion of the study area. These factors, which can also occur intermittently, can affect the time dependent pattern of the water level fluctuations. For this reason, it is not possible at this time to state the secular trend and make predictions for the future without simultaneously making certain hypotheses. There appears to be a rise in the mean tidal water level from 1 to 1.5

dm/year. One cannot however answer the question with certainty as to whether the sea level will continue to rise, even when extrapolated time series seem to confirm this trend.

This problem can only be solved through interdisciplinary cooperation. In addition, the tidal gauges discussed in section 3.5 should be modified in order to obtain all of the data necessary to describe the tides. Helgoland is the most important station located at the boundary of the study area.

The available data up to 1980 as compared with those reported for 1975/79 (Sieffert and Lassen, 1985) yield an improvement in the description of the flood tide hourly patterns and the lines of given tidal water levels. This is because additional measurement stations were used and data from approximately 240 gauges are available. It was possible to relate the data for open sea reach in the description of the tidal motion through use of open sea gauge information and a seamly reliable tie-in with the German bench mark system.

Inhalt

Zusammenfassung	85
Summary	85
1. Einleitung	86
2. Auswertung	91
3. Ergebnisse	96
3.1 Mittleres Tidemittelwasser	96
3.2 Schwierigkeiten bei der Bestimmung eines säkularen Trends	104
3.2.1 Grundlegende Gedanken	104
3.2.2 Daten	106
3.2.3 Zur Küstensenkung	109
3.3 Mittlere Tideverhältnisse um 1980	111
3.3.1 Allgemeine Übersicht	111
3.3.2 Zu den Darstellungen	116
3.3.3 Tideablauf im Küstenvorfeld und in der südöstlichen Deutschen Bucht um 1980	121
3.4 Zum großflächigen säkularen Trend	129
3.5 Weitere Hinweise	133
4. Auswahl von Säkularpegeln	134
5. Hinweise auf weitere Unterlagen, die den Verwaltungen zur Verfügung stehen	135
6. Schriftenverzeichnis	136

1. Einleitung

In der vorliegenden Arbeit geht es um die Lösung einer Reihe von Fragen zur Tidedynamik in der Deutschen Bucht, mit der wir uns wegen Vorsorgemaßnahmen im Küstenschutz künftig noch intensiver als bisher befassen müssen. Gerade gegenwärtig beginnt sich die Einsicht durchzusetzen, daß das vorhandene Wissen zum Tideablauf in der Nordsee noch weiterer Ergänzungen bedarf.

Grundlage dieser Untersuchungen sind die Berichtszeiträume 1975/79 und 1982/86 aus dem vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) geförderten KFKI-Projekt „Tide- und Windstauverhältnisse in der südöstlichen Nordsee“. Durch die Zusammenstellung und Bewertung der aus verschiedenen Zeiträumen und über ein großes Gebiet ermittelten Informationen werden differenziertere Aussagen über die Tideverhältnisse und -veränderungen im genannten Untersuchungsbereich erarbeitet, als es bislang aus Einzelbeobachtungen möglich ist.

Bei Aufstellung der Konzeption zum genannten KFKI-Projekt war es zunächst nur die Absicht, erstmals für den Zeitraum 1975/79 eine umfassende Dokumentation über den Tideablauf im Küstenvorfeld der Nordsee von der Emsmündung bis zum Hindenburgdamm

anzufertigen. Dies geschah (SIEFERT und LASSEN, 1985). Bis zu diesem Zeitraum waren die großen Fahrwasservertiefungen in Ems, Weser und Elbe, die Abdeichung der Meldorfer Bucht und der Bau des Eidersperrwerkes beendet.

Jedoch aus der Erkenntnis, daß die zwar konkrete, aber nur qualitative Einzelaussage durch das Ergebnis einer weiteren Untersuchungsperiode besser beurteilt werden kann, ist die Konsequenz gezogen worden, das vorhandene umfangreiche Datenmaterial von Wasserstandsaufzeichnungen auch für einen zweiten Zeitraum, nämlich 1982/86, auszuwerten. Das neue Vorhaben gliederte sich in folgende Teilaufgaben:

- 1) Ausdehnung des Untersuchungsbereiches 1975/79 aufgrund von Auswertungen weiterer Wasserstandsaufzeichnungen aus den 1970er Jahren im Dollart, im Jadebusen, in der Elbe von Cuxhaven bis Brunsbüttel und im angrenzenden dänischen Küstengebiet bis Esbjerg.
- 2) Erweiterung des Untersuchungsbereiches in die Nordsee hinaus durch Auswertung von Hochseepegelmessungen des DHI (1976 bis 1980) und aus dem DEBEX-Programm 1981 (WIESE, 1981) unter Einbeziehung des Pegels Helgoland.
- 3) Auswertung aller vorhandenen Pegelaufzeichnungen im Küstenbereich für den Berichtszeitraum 1982/86 einschließlich verschiedener Pegel im niederländischen Küstenbereich bis Pegel Terschelling und Plattform „K13“.
- 4) Anschauliche Beschreibung der mittleren Tideverhältnisse eines Pegelortes durch Darstellung einer mittleren Tidekurve und Bestimmung des örtlichen mittleren Tidemittelwassers (MTmw) für beide Berichtszeiträume.
- 5) Erfassung der Überlagerungen von Tide und Windstau in der südöstlichen Nordsee und den Tideästuar, um die Entwicklung und den Ablauf von Sturmfluten in diesem begrenzten Gebiet besser abschätzen und Anregungen zur Verbesserung der Sturmflutvorhersage geben zu können.
- 6) Untersuchungen zur gezielten Unterhaltung von festen Pegeln, um die heute nicht mehr vertretbare hohe Anzahl von Pegelorten zu reduzieren. Dafür sollte jedoch ein häufiger Wechsel mobiler Pegel stattfinden, um die Tidecharakteristik in bestimmten Küstenbereichen und bei besonderen Naturereignissen weiter zu verbessern. Die Einbeziehung dieser örtlichen Ergebnisse in das allgemeine Tidegeschehen durch Regressionsgleichungen mit vorhandenen Bezugspegeln wird dabei vorausgesetzt.
- 7) Bewertung und Zusammenstellung der aus den verschiedenen Zeiträumen ermittelten Informationen zu einer Gesamtdarstellung des Tideablaufs in der südöstlichen Nordsee unter Einbeziehung des Tidemittelwassers.

Die Erweiterung des Untersuchungsgebietes in die Nordsee und in den niederländischen und dänischen Küstenbereich ist erforderlich, um einmal die östliche Amphidromie der Nordsee weitgehend zu erfassen, zum anderen für allgemeine Tideaussagen über den gesamten Wattkomplex und zum grundsätzlichen Verständnis der Tideabläufe. Damit werden erstmals die Tideverhältnisse im gesamten deutschen Küstenvorfeld nach Messungen dokumentiert.

Im Zusammenhang mit dem Forschungsvorhaben wurden Informationen von insgesamt 240 Pegelorten für die Berichtszeiträume 1975/79 und 1982/86 – 45 % der Pegel sind in beiden Zeiträumen gemeinsam – aufbereitet und analysiert (Abb. 1 und Tab. 1).

Folgende Dienststellen des Bundes, der Länder sowie weitere Institutionen stellten die Unterlagen wie Wasserstandslisten und Pegelregistrierungen dankenswerterweise zur Verfügung:

- Wasser- und Schiffsamt Tönning
- Wasser- und Schiffsamt Cuxhaven
- Wasser- und Schiffsamt Bremerhaven
- Wasser- und Schiffsamt Wilhelmshaven

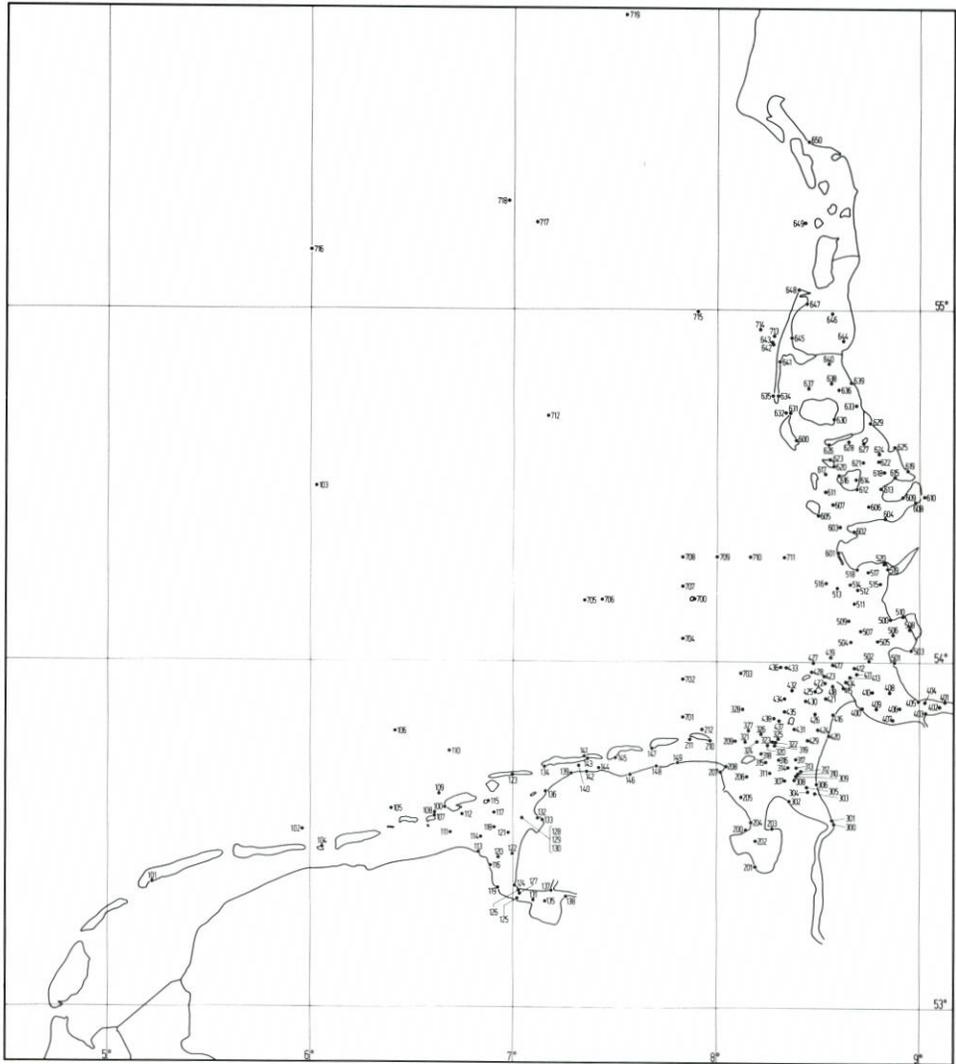


Abb. 1. Übersichtsplan der untersuchten Pegel

- Wasser- und Schiffsamt Emden
- Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum
- Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide
- Staatliches Amt für Wasser und Abfall Stade
- Staatliches Amt für Wasser und Abfall Brake
- Staatliches Amt für Wasser und Abfall Aurich
- Niedersächsisches Landesamt für Wasser und Abfall
- Forschungsstelle Küste, Norderney
- Staatliches Amt für Insel- und Küstenschutz Norden
- Niedersächsisches Hafenamts Norden
- Strom- und Hafenbau Hamburg

Tabelle 1. Verzeichnis der Pegel

100	BORKUM-Südstrand	207	Wangersiel	420	Spieka Neufeld
101	West-Terschelling	208	Schilling	421	Duhner Watt
102	Wierumergronden	209	L. T. Mellumplate	422	Kleiner Vogelsand
103	79411=79406=79414	210	Wangerooge O	423	Mittelgrund W
104	Engelsmanplaat N	211	Wangerooge W	424	Spieker Watt
105	Huibertgat	212	Wangerooge N	425	Neuwerk
106	78401=78404			426	Sahlenburger Tief
107	Horsborngat '86 =Rottumeroog NO	300	BREMERHAVEN-Doppel- schleuse	427	L. T. Gr. Vogelsand
108	Horsborngat '85	301	Bremerhaven.	428	Scharhörn = Radarbake „C“
109	Hogrif		Alter Leuchtturm	429	Dorumer Watt
110	76402=76406	302	Fedderwarder Siel	430	Kleinwatt
111	Oude Wester Eems	303	Imsum	431	Knechtsand O
112	Borkum-Fischerbalje	304	Wremer Loch	432	Unterer Wittsand
113	Eemshaven	305	Robbensüdsteert	433	Scharhörnriff
114	Emshoern	306	Wremer Tief	434	Westertill
115	Luetje Hoern	307	Fedderwarder Priel	435	Knechtsand
116	Bocht van Watum N	308	Langluetjen	436	Radarbake „A“
117	Westerbalje	309	Robbenplate W	437	Knechtsand W
118	Randzel SO	310	Robbenplate O	438	Robinsbalje
119	Paap	311	Kaiserbalje	500	BÜSUM
120	Dukegat	312	Schmarrener Loch	501	Friedrichskoog-Hafen
121	Pilsumer Watt	313	Robbenplate	502	Putengatt
122	Manslagter Nacken	314	Robbennordsteert	503	Deichsiel Sommerkoog Steertloch
123	Juist, Hafen	315	Hohe Weg	504	Trischen W
124	Rysum	316	Dwarsgat	505	Flackstrom
125	Oterdum	317	Meyers Legde	506	Sommerkoog Steertloch W
126	Knock A. P.	318	Hohe Weg N	507	Bielshöven Loch
127	Knock	319	Tegeler Plate S	508	Helmsander Koog A. P.
128	Leybucht, Leyhoern	320	Tegeler Plate W	509	Tertius-Süderpiep
129	Leybucht	321	Mellumplate	510	Wöhrdener Loch
130	Greetsieler Nackenlegde	322	Eversandloch	511	Blauort
131	Reide	323	Tegeler Plate O	512	Wesselburener Loch
132	Buscher Heller	324	Tegeler Plate '86	513	Isern Hinnerk
133	Leybucht siel A. P.	325	Eversand	514	Linnenplate
134	Norderney Riffgat	326	Tegeler Plate N	515	Heringsand
135	Dollard N	327	Tegeler Plate '71	516	Außeneider
136	Norddeich	328	L. T. Alte Weser	517	Doves Loch
137	Emden, Neue Seeschleuse			518	Süderhöft
138	Pogum			519	Eidersperrwerk A. P.
139	Hilgenriedersiel	400	CUXHAVEN-Steubenhöft	520	Legden
140	Norderneyer Watt	401	Brunsbüttel		
141	Wichter Ee	402	Balje	600	WITTDÜN
142	Nessmersiel	403	Osteriff	601	St. Peter W
143	Baltrum	404	Neufeld-Reede O	602	Adamsiel
144	Baltrumer Watt	405	Neufelder Rinne	603	Kolumbusloch
145	Langeoog	406	Medem-Reede O	604	Everschopsiel
146	Bensersiel	407	Otterndorf	605	Süderoogsand
147	Spiekeroog	408	Bullenloch	606	Südfall
148	Neuharlingersiel	409	Medem-Reede W	607	Süderoog Hever
149	Harlesiel	410	Spitzsand	608	Finkhaushallig
		411	Hakensand	609	Nordstrand Süderhafen
200	WILHELMSHAVEN.	412	Diekmannsloch O	610	Husum
	Alter Vorhafen	413	Zehnerloch = Radarbake „W“	611	Stegel
201	Vareler Schleuse	414	Mittelgrund	612	Ochsensand
202	L. T. Arngast	415	Buchtloch	613	Struklahnungshörn
203	Eckwardersiel	416	Arensch	614	Pellworm
204	Oelpier	417	Gelbsand = Radarbake „X“	615	Holmer Siel
205	Voslapp	418	Eitzensand	616	Pellworm, Hoogerfähre
206	Hooksielplate	419	Elbsand Norderelbe		

Tabelle 1 (Fortsetzung)

617	Norderoog	636	Föhrer Ley S	703	79413
618	Nordstrandischmoor	637	Hörnuntief	704	Helgoland S
619	Arlau Schleuse	638	Föhrer Ley N	705	78400
620	Hooge, Landsende	639	Südwesthörn	706	79412=78405=78406=79404 =79405
621	Rummelloch O	640	Osterley	707	Helgoland NW
622	Butterloch	641	Rantumdam	708	Helgoland N
623	Hooge, Anleger	642	Westerland	709	Steingrund NW
624	Strand	643	Westerland, Meßpfahl	710	Steingrund NO
625	Bordelumer Außensiel	644	Rickelsbüll Koog A. P.	711	Süderhever
626	Langeneß, Hilligenley	645	Munkmarsch	712	Forschungsplattform „Nordsee“
627	Gröde	646	Jordsand	713	79407
628	Langeneß, Neuwarft	647	List	714	79409
629	Schlüttsiel	648	List W	715	77406=78403=78402=77407
630	Wyk/Föhr	649	Korresand	716	78408=79410
631	Amrum-Odde '77	650	Esbjerg	717	81401
632	Amrum-Odde '85			718	81400
633	Dagebüll	700	HELGOLAND	719	77409
634	Hörnum	701	Jade/Tonne 7		
635	Hörnum W	702	Schlüsseltonne		

Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg*

Rijkswaterstaat

Kystinspektoratet Lemvig

Reederei Forschungsschiffahrt Bremen

Die Projektgruppe hatte folgende Mitglieder, denen für ihr Interesse und ihr Engagement zu danken ist:

RD Dipl.-Oz. ANNUTSCH	Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg
BD Dipl.-Ing. BLIESENER	Wasserwirtschaftsamt Bremen
BD Dipl.-Ing. DIETZE	Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest, Aurich
BD Dr.-Ing. KUNZ	Niedersächsisches Landesamt für Wasser und Abfall,
ab Januar 1988	Forschungsstelle Küste, Norderney
BOR Dipl.-Ing. PAUL	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
ab Januar 1988	
RD Dipl.-Meteor. SCHMIDT	Seewetteramt Hamburg
BD Dr.-Ing. STRÖHMER	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
bis Ende 1987	
LBD Dipl.-Ing. WÖBKEN	Staatliches Amt für Wasser und Abfall, Brake
bis Ende 1987	
Prof. Dr.-Ing. SIEFERT	Strom- und Hafengebäudeamt Hamburg, Cuxhaven
(Obmann)	
Dipl.-Ing. LASSEN	Strom- und Hafengebäudeamt Hamburg, Cuxhaven
(ständiger Mitarbeiter)	

Besonders hervorzuheben ist die vertrauensvolle und fruchtbare Zusammenarbeit mit Herrn Annutsch.

* Seit dem 1. 7. 90 Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

2. Auswertung

Um die einheitliche Vorgehensweise bei Auswertung beider Untersuchungszeiträume im Hinblick auf die Zielsetzung zur Bestimmung des Tidegeschehens zu gewährleisten, wurden die entwickelten Ableitungen und Dimensionierungen von 1975/79 zu den Punkten

- Grundlage der Bearbeitung
- Bezugs- und Anschlußpegel
- Berechnung der MTnw- und MThw-Höhen
- Konfidenzintervall für den Mittelwert
- Berechnung der Flut- und Ebbedauern

auch für den Berichtszeitraum 1982/86 übernommen. Sie können in ihren Einzelheiten bei SIEFERT und LASSEN (1985, S. 8 bis 18) nachgelesen werden.

Die Vorgehensweise zur Entwicklung der mittleren Tidekurve bis zur Bestimmung der für den Kurvenverlauf benötigten 25 Stützpunkte (halbstündliche Gezeitenordinaten) ist die gleiche wie 1975/79, also Auswahl der Tiden, Festlegung von MTnw, MThw, T_F und T_E und Einteilung der Flut- und Ebbeäste zur Bestimmung der Stützpunkthöhen. Jedoch die Darstellung der Kurvenform ist durch die Verwendung der graphischen Datenverarbeitung – gegenüber der manuellen Zeichenmethode für 1975/79 – in der Genauigkeit verbessert worden. Über die 25 Stützpunkte werden mit Hilfe von Spline-Funktionen* 281 Punkte zur Wiedergabe der mittleren Tidekurve eingerechnet. Um die mittleren Tideverhältnisse anschaulich wiederzugeben, müssen die Mittelwerte halbstündlicher Gezeitenordinaten mit mm-Angaben in den Rechengang eingeführt werden, weil der Plotter auf 0,02 mm in der Darstellung reagiert, d.h. beim verwendeten Abbildungsmaßstab 1:20 auf 0,4 mm in der Natur. Nicht begründete Formveränderungen des Kurvenverlaufs können einmal an dem nicht exakten Mittelwert einer Stützpunkthöhe liegen und zum anderen an der nicht genügenden Anzahl vorhandener Tiden (< 20), die näherungsweise dem MTnw und MThw entsprechen. Die Qualitätsverbesserung in der Abbildung der Tidekurven gegen 1975/79 gab Veranlassung, alle mittleren Tidekurven aus dieser Zeit neu zu überarbeiten und zu plotten. So wurden insgesamt 395 mittlere Tidekurven produziert (Abb. 2 zeigt interessante Beispiele).

In Ergänzung zu den bei SIEFERT und LASSEN (1985) abgebildeten mittleren Tidekurven werden noch einige weitere interessante Beispiele in den Abb. 2a bis 2m gezeigt. Da die Kurven nicht komplett veröffentlicht werden können, ist der Hinweis angebracht, daß sie selbstverständlich über das KFKI jedem Benutzer zur Verfügung gestellt werden.

Abb. 2a und 2b zeigen die normalen mittleren Tideverhältnisse um Borkum für 1975/79 und 1982/86. Beide mittlere Tidekurven, die für Borkum-Südstrand 1975/79 und die für Borkum-Fischerbalje 1982/86, bilden die Grundlage zur Darstellung von Tidephasenbildern in der südöstlichen Nordsee mit Linien gleicher Wasserstände. Beide Kurven haben einen glatten Verlauf und bei beiden ist $T_F < T_E$.

Abb. 2c gibt die mittlere Tidekurve 1982/86 des Pegels Juist-Hafen wieder. Flut- und Ebbeast haben kennzeichnende Unregelmäßigkeiten, die bei Tidebewegungen in Prielsystemen mit deren Füll- und Entleerungsvorgängen großer Wattflächen zusammenhängen. Daher sind auch die Tideeintrittszeiten gegen die umliegenden Pegel verzerrt und konnten in der weiteren Bearbeitung nicht berücksichtigt werden.

Abb. 2d und 2e vermitteln eine Vorstellung über die mittleren Tideverhältnisse in der Jade bei Wilhelmshaven um 1856 und für 1982/86. Für 1856 fehlt jeglicher Höhenbezug.

* Für die Bereitstellung von Spline-Funktions-Programmen sei Herrn KÖVES (WSA Cuxhaven) herzlich gedankt

Abb. 2a-2m. Mittlere Tidekurven (Auswahl)

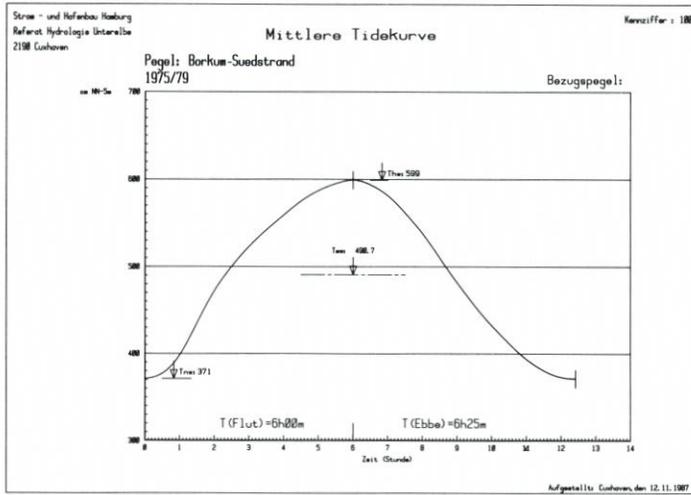


Abb. 2a

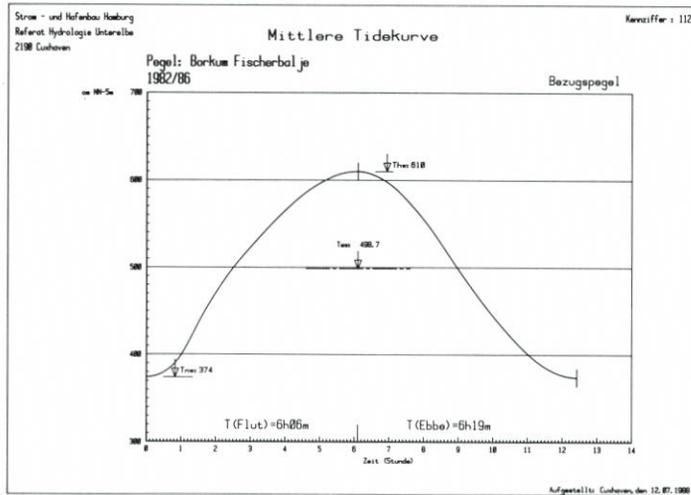


Abb. 2b

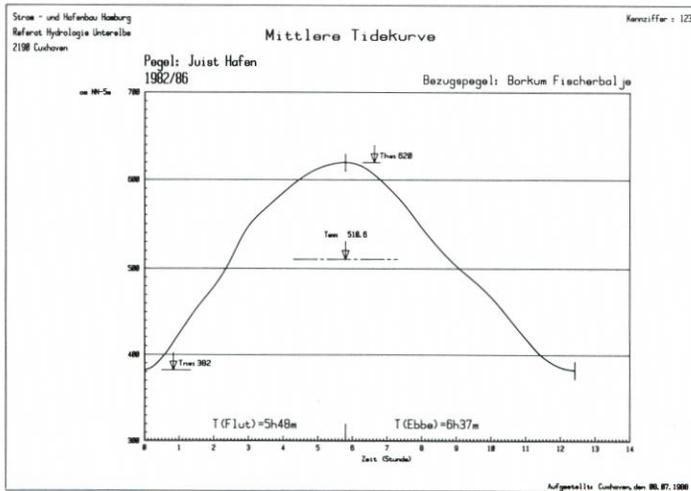


Abb. 2c

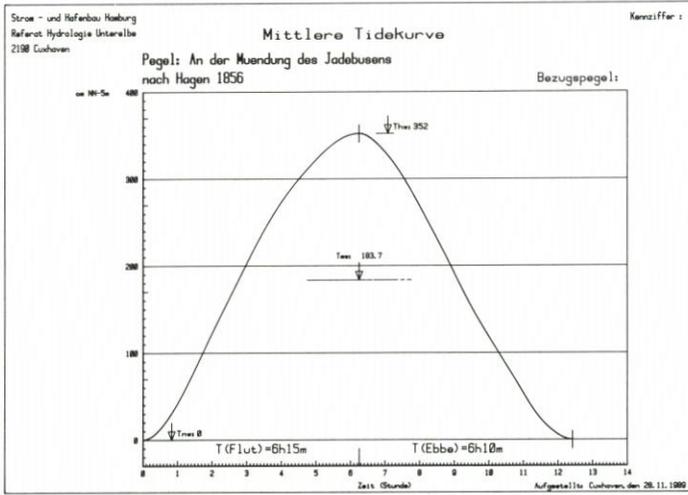


Abb. 2d

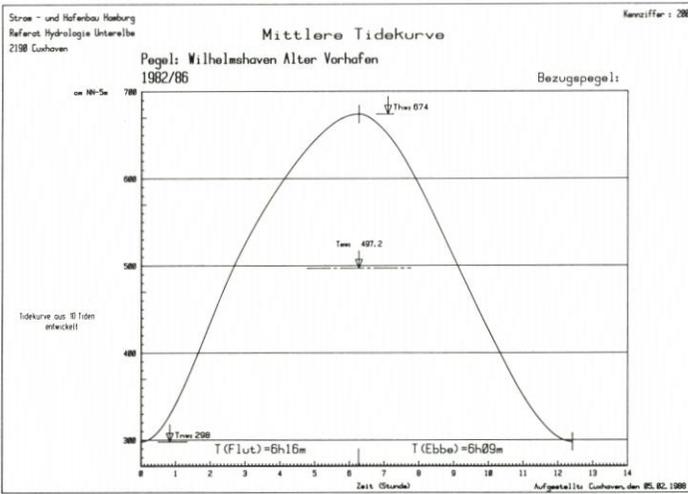


Abb. 2e

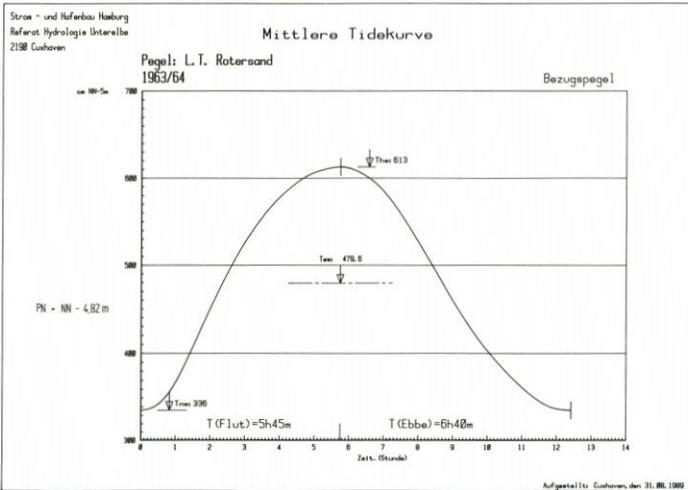


Abb. 2f

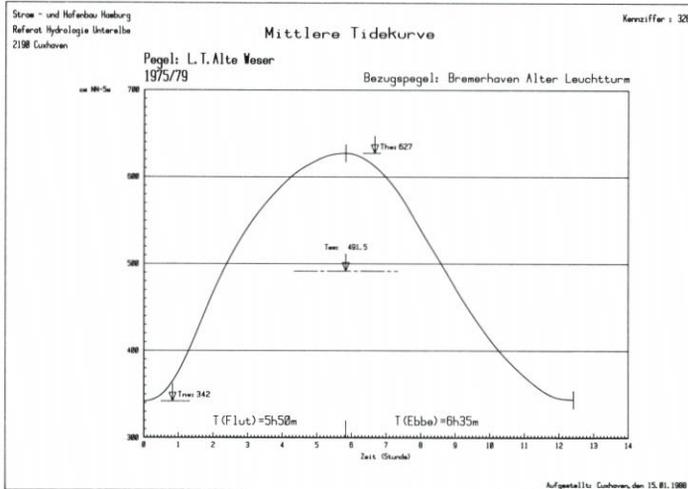


Abb. 2g

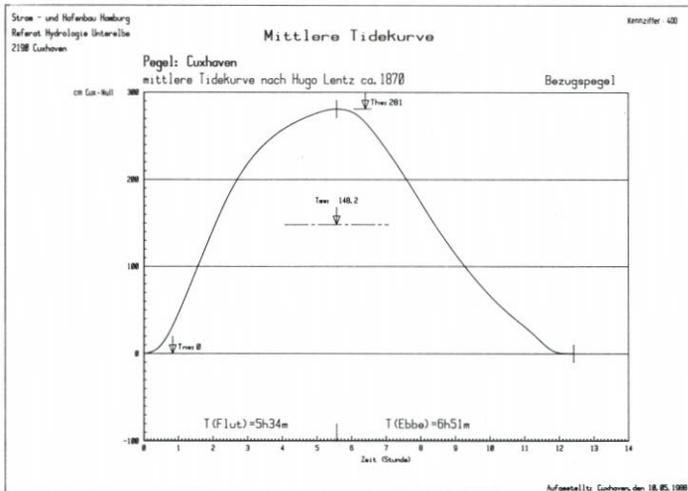


Abb. 2h

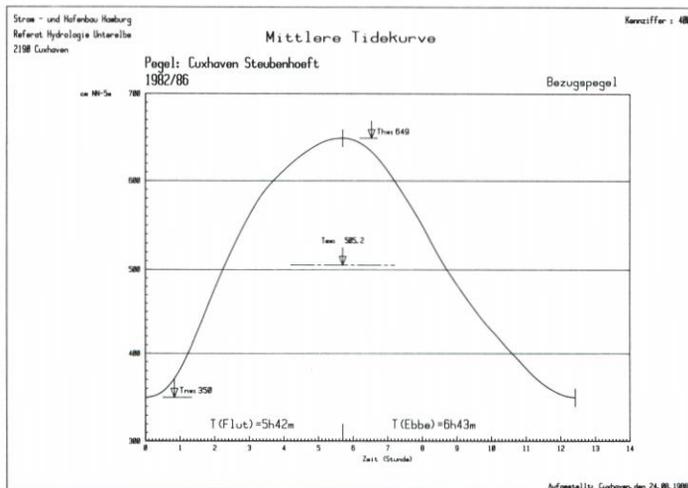


Abb. 2i

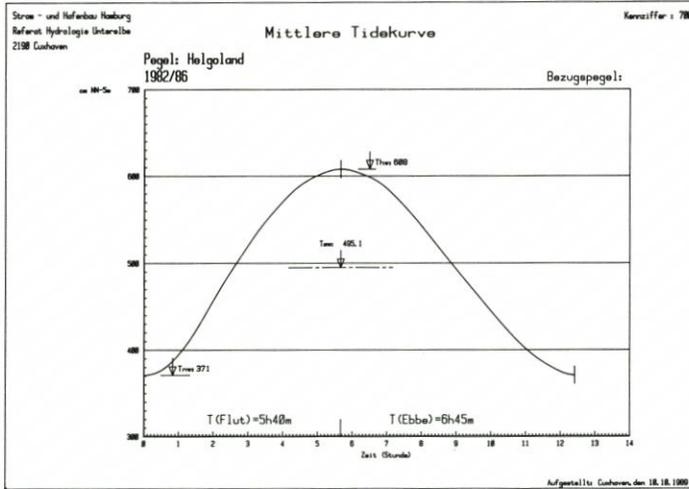


Abb. 2k

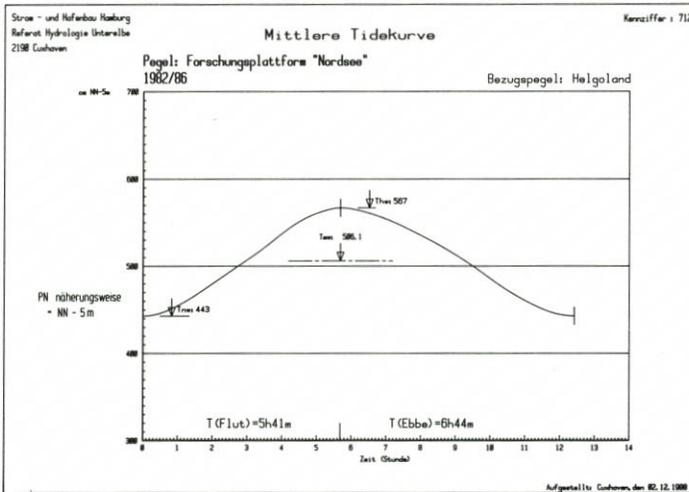


Abb. 2l

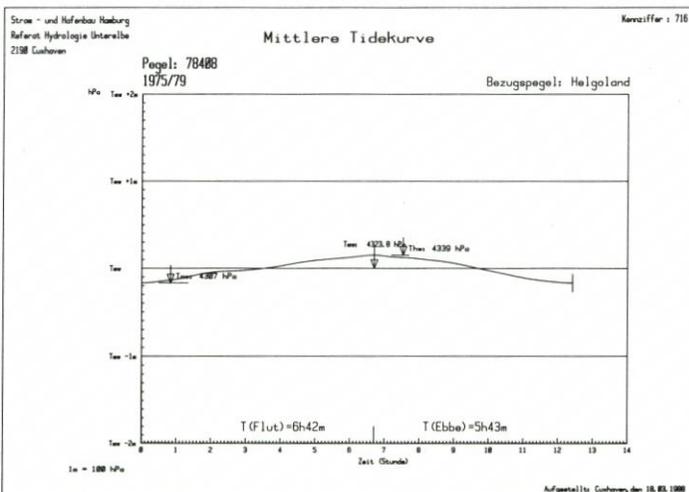


Abb. 2m

Daher werden beide Kurven über das Tidemittelwasser (nächstes Kapitel) betrachtet. Im Verlauf von 130 Jahren hat der MThb um 22 cm zugenommen, wobei das MThw 1982/86 um 8 cm höher und das MTnw 1982/86 um 14 cm tiefer liegt als 1856. Flut- und Ebbedauern sind in dem gesamten Zeitraum fast identisch. Die Kurven haben einen glatten Verlauf. Hinsichtlich der Genauigkeit der Kurve von 1856 ist dennoch Vorsicht geboten.

Abb. 2f und 2g zeigen die mittleren Tideverhältnisse in der Außenweser beim LT Roter Sand 1963/64 und bei LT Alte Weser 1975/79. Unter Einbeziehung des Tidemittelwassers ergibt sich, daß das bisherige PN LT Roter Sand ~ 13 cm zu tief liegt. Während das MThw bei beiden Leuchttürmen fast gleich hoch über MTmw liegt, ist das MTnw beim LT Alte Weser tiefer als bei LT Roter Sand. Beide Tidekurven haben einen glatten Verlauf und sind sich sehr ähnlich. T_F und T_E differieren zwischen beiden Orten um 5 m, wobei T_F immer $< T_E$ ist.

Abb. 2h und 2i enthalten die mittleren Tidekurven von Cuxhaven um 1870 und von 1982/86. Beide Kurven weisen keine besonderen Eigentümlichkeiten auf. Da es für 1870 keinen exakten Höhenbezug gibt, werden auch hier beide Kurven über das Tidemittelwasser verglichen. Der Tidehub vergrößerte sich in den Jahren um 18 cm, wobei sich das MThw um 11 cm erhöhte, das MTnw um 7 cm erniedrigte. Das Verhältnis T_F/T_E änderte sich um 3 %, wobei T_F immer $< T_E$.

Abb. 2k beschreibt die mittleren Tideverhältnisse für 1982/86 im freien Meer um Helgoland. Auch hier ist $T_F < T_E$. Die Kurve hat einen glatten Verlauf. Höhenbezug ist NN (LASSEN, 1989).

Abb. 2l zeigt die mittlere Tide im Nordseebereich bei der Forschungsplattform Nordsee. MThb nimmt im Vergleich zur Küste weiter ab und beträgt hier nur noch 124 cm. $T_F < T_E$.

Abb. 2m beschreibt die Gezeitenverhältnisse südlich des amphidromischen Zentrums der M_2 -Gezeit. Hier ist ein kleiner Thb von ~ 30 cm vorhanden. $T_F > T_E$.

3. Ergebnisse

3.1 Mittleres Tidemittelwasser

Zur Verfolgung küstendynamischer Prozesse ist gegenüber dem Berichtszeitraum ein weiterer Parameter, das mittlere Tidemittelwasser (MTmw) nach DIN 4049 1. Teil, als örtliche Bezugsgröße für Wasserstandsbetrachtungen in das Programm 1982/86 aufgenommen worden. Im engeren Sinne entspricht das MTmw der internationalen Bezugsebene für ozeanographische Gezeitenbewegungen, dem mittleren Meeresspiegel (MSL = mean sea level). Beide, MSL wie auch MTmw, beziehen sich auf die gleiche Beschreibung eines bestimmten mittleren Wasserstandes – der waagerechten Schwerelinie einer Tidekurve –, verwenden jedoch voneinander abweichende Berechnungsmethoden, die aber die gleiche kennzeichnende Größe, die umschriebene Fläche einer Tidekurve in einem bestimmten Zeitraum, beinhalten. Bezüglich der erreichbaren Genauigkeit erweisen sich beide Methoden im Vergleich der Ergebnisse als gleichwertig (LASSEN, 1989).

Das MTmw wird durch die Integration der mittleren Tidekurve über die bereits genannten 281 Stützpunkte der Kurvenform berechnet zu

$$MTmw = \frac{1}{T} \int_0^T \eta(t) dt$$

mit T = Tidedauer; η = Wasserstand

Der Ermittlung des MTmw aus mittleren Tidekurven wird im Gegensatz zur internationalen MSL-Berechnungsmethode aus zeitlich gleichabständigen, oft stündlichen Wasserständen einer längeren, mindestens einjährigen Reihe der Vorzug gegeben, einmal um die damit verbundene enorme Datenabhängigkeit (Abspeichern) zu vermeiden, zum anderen, weil für viele Pegel im Küstenvorfeld ohnehin keine jährlich geschlossenen Beobachtungsreihen vorliegen.

Bei Betrachtung von Meeresspiegeländerungen ist das MTmw gegenüber dem MThw, MTnw oder MThb der aussagekräftigere Parameter, der zu verbesserten Kenntnissen im Tidegeschehen führt, da die Form der mittleren Tidekurve in den Rechengang mit einfließt.

So sind nicht erfaßte Tideveränderungen, z. B. durch Standortwechsel des Pegels, Pegelsackungen sowie Unstimmigkeiten im Höhenanschluß zum NN (PN)-Horizont bei Benutzung der MTmw-Bezugsebene ohne Bedeutung.

Das Problem der schwankenden MTmw-Höhen, hervorgerufen durch unterschiedliche meteorologische Einflüsse auf die Wasserstandsentwicklung im astronomischen und im gewässerkundlichen Jahr, kann durch Vergleiche zur MTmw-Basis bzw. durch Zurückführung auf die MTmw-Bezugsebene vermieden werden. Die ungleiche Verlagerung der Wassermassen in der Küstenzone verursacht außerdem noch divergierende Relativbewegungen der jährlichen MTmw und führt zu reviertypischen Abweichungen, wie die Differenzen der regionalen Mittel von 1982/86 zur Zeitreihe 1975/79 in der folgenden Tabelle zeigen:

Δ MTmw	
1982/86 gegenüber 1975/79	
Bereich Ems-Jade	+ 3 cm
Bereich Weser-Elbe	+ 7 cm
Bereich Büsum-List	+ 9 cm

Die Abstände der MThw und MTnw vom MTmw sind für die Berichtszeiträume 1975/79 und 1982/86 in der südöstlichen Nordsee ohne zeitliche Änderung. Aus den zusammengefaßten relativen Ergebnissen dieser Jahre sind die entsprechenden Isohypsen für den Zeitabschnitt 1975/1986 entwickelt und bei LASSEN (1989) dargestellt (seine Abb. 3 und 4). Die Linienstruktur dieser Karten zeigt den Zusammenhang für die gleichmäßige Zunahme der Differenzen vom amphidromischen Zentrum bis etwa zur Grenze des Küstenvorfeldes, um dann einen durch die Topographie des Meeresbodens bedingten abweichenden regionalen Verlauf zu nehmen. Diese Erscheinung ist typisch für alle Gezeiten: in der Küstenregion verformt sich die Tide.

In der Darstellung der MTmw-Isohypsen – bezogen auf NN – bei LASSEN (1989) an Hand der gemittelten Ergebnisse von 1975/79 und 1982/86, jedoch unter Berücksichtigung zonaler Schwankungen, gibt der Kurvenverlauf einen Überblick über den MTmw-Anstieg vom offenen Meer mit einer leichten Krümmung zur Küste hin. Die Mittelwerte von Abb. 3 stellen den Zustand 1975/1986 dar und demonstrieren, daß es im Küstenvorfeld keine präzise Festlegung der MTmw-Isohypsen geben kann, sondern daß der jährliche Kurvenverlauf durch den Einfluß der Meteorologie auf die Wasseroberfläche beeinflusst wird und somit nur für den betrachteten Zeitraum Gültigkeit hat.

Aus den Details dieser Informationen und denen der mittleren Tidekurvenform von Hochseepiegel 81400 (718)* und 81401 (719) ist zu vermuten, daß es im Umfeld des

* Die dreistelligen Nummern beziehen sich auf Abb. 1 und Tab. 1 und 2



Abb. 3. Linien gleicher MTmw (bezogen auf NN, Lassen, 1989)

amphidromischen Zentrums der M_2 -Gezeit und im Zentrum selbst keinen Punkt mit $MThb = \pm 0$ geben kann. Tatsächlich verbleibt in der Natur ein gewisser Tidehub um 30 cm.

Aus den genauen Kenntnissen der Wasserstände von der Küste seawärts ergibt sich, daß MTmw als Bezugsfläche nicht parallel zu NN liegt. Wie schon erwähnt, weicht MTmw im Küstenvorfeld mit einer leichten Krümmung von der idealen Bezugsfläche ab, um etwa bei Helgoland das Geoid asymptotisch im Niveau des mittleren Meeresspiegels (MSL) mit einer Höhe von 4,92 m PN (PN = NN-5 m) für den Zeitraum 1975/86 zu erreichen, und entspricht damit aller Wahrscheinlichkeit nach dem mittleren Niveau der Nordsee in diesem Zeitraum. Daher wird diese Höhe den weiteren Gezeitenanalysen in dieser Arbeit für die südöstliche Nordsee zugrunde gelegt.

Ein Ziel der Überlegungen war es eigentlich, diese MSL-Höhe mit einer durch Satelliten-

Tabelle 2. Koordinaten der Pegelstandorte

	Name der Pegels	Geographische Koordinaten				
		Breite		Länge		
		°	' "	°	' "	
100	BORKUM-Südstrand	53	34 44 N	06	39 47 E	100
101	West-Terschelling	53	21 51 N	05	13 14 E	101
102	Wierumergronden	53	30 59 N	05	57 34 E	102
103	79411 = 79406 = 79414	54	30 00 N	06	01 42 E	103
104	Engelsmanplaat N	53	27 52 N	06	03 26 E	104
105	Huibergat	53	34 31 N	06	23 56 E	105
106	78401 = 78404	53	48 00 N	06	25 00 E	106
107	Horsborngat '86 = Rottumeroog NO	53	33 20 N	06	36 40 E	107
108	Horsborngat '85	53	33 55 N	06	36 46 E	108
109	Hogrif	53	37 10 N	06	38 05 E	109
110	76402 = 76406	53	44 30 N	06	41 06 E	110
111	Oude Wester Eems	53	30 20 N	06	41 20 E	111
112	Borkum-Fischerbalje	53	33 32 N	06	44 55 E	112
113	Eemshaven	53	27 00 N	06	49 42 E	113
114	Emshörn	53	29 42 N	06	50 31 E	114
115	Lütje Hörn	53	35 52 N	06	52 40 E	115
116	Bocht van Watum N	53	24 48 N	06	53 20 E	116
117	Westerbalje	53	33 49 N	06	54 17 E	117
118	Randzel SO	53	31 19 N	06	54 25 E	118
119	Paap	53	20 47 N	06	55 26 E	119
120	Dukegat	53	26 07 N	06	55 37 E	120
121	Pilsumer Watt	53	30 21 N	06	58 32 E	121
122	Manslagter Nacken	53	26 39 N	06	59 47 E	122
123	Juist, Hafen	53	40 32 N	06	59 48 E	123
124	Rysum	53	21 13 N	07	00 27 E	124
125	Oterdum	53	18 52 N	07	01 13 E	125
126	Knock A. P.	53	20 19 N	07	01 38 E	126
127	Knock	53	19 43 N	07	01 53 E	127
128	Leybucht, Leyhörn	53	32 56 N	07	02 25 E	128
129	Leybucht	53	32 57 N	07	02 28 E	129
130	Greetsieler Nackenlegde	53	32 59 N	07	02 40 E	130
131	Reide	53	18 37 N	07	05 55 E	131
132	Buscher Heller	53	32 57 N	07	07 11 E	132
133	Leybuchtziel A. P.	53	32 36 N	07	08 36 E	133
134	Norderney Riffgat	53	41 53 N	07	09 18 E	134
135	Dollard N	53	18 25 N	07	09 19 E	135
136	Norddeich	53	37 33 N	07	09 32 E	136
137	Emden, Neue Seeschleuse	53	20 18 N	07	11 13 E	137
138	Pogum	53	19 20 N	07	15 36 E	138
139	Hilgenriedersiel	53	40 42 N	07	17 09 E	139
140	Norderneyer Watt	53	42 03 N	07	19 17 E	140
141	Wichter Ee	53	43 34 N	07	20 58 E	141
142	Neßmersiel	53	41 04 N	07	21 42 E	142
143	Baltrum	53	43 26 N	07	21 50 E	143
144	Baltrumer Watt	53	41 44 N	07	25 16 E	144
145	Langeoog	53	43 29 N	07	30 09 E	145
146	Bensersiel	53	40 33 N	07	34 33 E	146
147	Spiekeroog	53	45 05 N	07	40 58 E	147
148	Neuharlingersiel	53	42 04 N	07	42 15 E	148
149	Harlesiel	53	42 35 N	07	48 35 E	149

Tabelle 2 (Fortsetzung)

	Name der Pegels	Geographische Koordinaten				
		Breite		Länge		
		°	' "	°	' "	
200	WILHELMSHAVEN, Alter Vorhafen	53	30 58 N	08	08 46 E	200
201	Vareler Schleuse	53	24 38 N	08	11 26 E	201
202	L. T. Arngast	53	29 04 N	08	11 31 E	202
203	Eckwardersiel	53	31 20 N	08	16 34 E	203
204	Ölpier	53	33 37 N	08	10 06 E	204
205	Voslapp	53	36 43 N	08	07 19 E	205
206	Hooksielplate	53	40 15 N	08	08 59 E	206
207	Wangersiel	53	41 06 N	08	01 16 E	207
208	Schilling	53	41 59 N	08	02 54 E	208
209	L. T. Mellumplate	53	46 24 N	08	05 38 E	209
210	Wangerooge O	53	46 25 N	07	58 09 E	210
211	Wangerooge W	53	46 41 N	07	52 09 E	211
212	Wangerooge N	53	48 22 N	07	55 45 E	212
300	BREMERHAVEN – Doppelschleuse	53	32 04 N	08	34 44 E	300
301	Bremerhaven, Alter Leuchtturm	53	32 47 N	08	34 09 E	301
302	Fedderwarder Siel	53	36 02 N	08	21 33 E	302
303	Imsum	53	37 24 N	08	29 05 E	303
304	Wremer Loch	53	37 42 N	08	27 06 E	304
305	Robbensüdsteert	53	38 29 N	08	26 46 E	305
306	Wremer Tief	53	39 01 N	08	29 46 E	306
307	Fedderwarder Priel	53	39 37 N	08	20 06 E	307
308	Langluetjen	53	39 40 N	08	23 01 E	308
309	Robbenplate W	53	40 27 N	08	23 34 E	309
310	Robbenplate O	53	40 49 N	08	24 11 E	310
311	Kaiserbalje	53	40 55 N	08	15 48 E	311
312	Schmarrener Loch	53	41 12 N	08	25 01 E	312
313	Robbenplate	53	41 50 N	08	23 35 E	313
314	Robbennordsteert	53	41 50 N	08	21 13 E	314
315	Hohe Weg	53	42 50 N	08	14 39 E	315
316	Dwarsgat	53	43 13 N	08	18 31 E	316
317	Meyers Legde	53	43 20 N	08	23 30 E	317
318	Hohe Weg N	53	44 15 N	08	13 15 E	318
319	Tegeler Plate S	53	45 36 N	08	17 15 E	319
320	Tegeler Plate W	53	45 45 N	08	15 10 E	320
321	Mellumplate	53	46 17 N	08	08 36 E	321
322	Eversandloch	53	46 17 N	08	17 34 E	322
323	Tegeler Plate O	53	46 20 N	08	16 40 E	323
324	Tegeler Plate '86	53	46 21 N	08	12 04 E	324
325	Eversand	53	46 50 N	08	18 20 E	325
326	Tegeler Plate N	53	47 36 N	08	13 12 E	326
327	Tegeler Plate '71	53	48 12 N	08	09 29 E	327
328	L. T. Alte Weser	53	51 54 N	08	07 43 E	328
400	CUXHAVEN – Steubenhöft	53	52 05 N	08	43 10 E	400
401	Brunsbüttel	53	53 18 N	09	07 37 E	401
402	Balje	53	52 23 N	09	05 59 E	402
403	Osteriff	53	51 20 N	09	01 51 E	403
404	Neufeld-Reede O	53	53 09 N	09	01 46 E	404
405	Neufelder Rinne	53	53 22 N	08	59 48 E	405
406	Medem-Reede O	53	52 06 N	08	54 13 E	406

Tabelle 2 (Fortsetzung)

	Name der Pegels	Geographische Koordinaten		
		Breite	Länge	
		° ' "	° ' "	
407	Otterndorf	53 50 10 N	08 52 11 E	407
408	Bullenloch	53 54 50 N	08 51 11 E	408
409	Medem-Reede W	53 52 03 N	08 47 19 E	409
410	Spitzsand	53 54 52 N	08 46 09 E	410
411	Hakensand	53 57 59 N	08 41 26 E	411
412	Diekmannsloch O	53 59 01 N	08 40 49 E	412
413	Zehnerloch=Radarbake „W“	53 57 26 N	08 39 33 E	413
414	Mittelgrund	53 56 38 N	08 38 13 E	414
415	Buchtloch	53 55 33 N	08 37 28 E	415
416	Arensch	53 51 00 N	08 34 28 E	416
417	Geldsand=Radarbake „X“	53 59 34 N	08 34 25 E	417
418	Eitzensand	53 55 55 N	08 34 24 E	418
419	Gelbsand Norderelbe	54 00 50 N	08 33 52 E	419
420	Spieka Neufeld	53 47 23 N	08 33 15 E	420
421	Duhner Watt	53 53 45 N	08 32 15 E	421
422	Kleiner Vogelsand	53 56 25 N	08 32 08 E	422
423	Mittelgrund W	53 57 37 N	08 31 53 E	423
424	Spiekaer Watt	53 48 26 N	08 29 57 E	424
425	Neuwerk	53 55 00 N	08 29 13 E	425
426	Sahlenburger Tief	53 51 08 N	08 29 06 E	426
427	L. T. Gr. Vogelsand	53 59 50 N	08 28 40 E	427
428	Scharhörn=Radarbake „C“	53 58 18 N	08 28 09 E	428
429	Dorumer Watt	53 46 41 N	08 26 57 E	429
430	Kleinwatt	53 53 23 N	08 26 18 E	430
431	Knechtsand O	53 48 33 N	08 23 05 E	431
432	Unterer Wittsand	53 55 10 N	08 22 19 E	432
433	Scharhörnriff	53 59 05 N	08 20 36 E	433
434	Westertill	53 53 46 N	08 20 07 E	434
435	Knechtsand	53 51 37 N	08 20 06 E	435
436	Radarbake „A“	53 59 10 N	08 18 58 E	436
437	Knechtsand W	53 49 59 N	08 18 28 E	437
438	Robinsbalje	53 50 25 N	08 17 00 E	438
500	BÜSUM	54 07 17 N	08 51 25 E	500
501	Friedrichskoog-Hafen	54 00 04 N	08 52 35 E	501
502	Putengatt	54 00 13 N	08 45 03 E	502
503	Deichsiel Sommerkoog Steertloch	54 02 08 N	08 57 35 E	503
504	Trischen W	54 03 30 N	08 39 44 E	504
505	Flackstrom	54 03 41 N	08 47 34 E	505
506	Sommerkoog Steertloch W	54 04 47 N	08 52 09 E	506
507	Bielshöven Loch	54 05 27 N	08 42 33 E	507
508	Helmsander Koog A. P.	54 05 38 N	08 57 05 E	508
509	Tertius-Süderpiep	54 07 12 N	08 39 03 E	509
510	Wöhrdener Loch	54 07 50 N	08 55 10 E	510
511	Blauort	54 10 07 N	08 40 45 E	511
512	Wesselburener Loch	54 12 29 N	08 41 43 E	512
513	Isern Hinnerk	54 12 47 N	08 35 39 E	513
514	Linnenplate	54 13 25 N	08 39 31 E	514
515	Heringsand	54 13 33 N	08 48 27 E	515
516	Außeneider	54 13 34 N	08 32 24 E	516
517	Doves Loch	54 15 31 N	08 44 43 E	517

Tabelle 2 (Fortsetzung)

	Name der Pegels	Geographische Koordinaten		
		Breite ° ' "	Länge ° ' "	
518	Süderhöft	54 15 57 N	08 41 33 E	518
519	Eidersperrwerk A. P.	54 16 03 N	08 50 34 E	519
520	Legden	54 16 53 N	08 49 31 E	520
600	WITTDÜN	54 38 01 N	08 23 07 E	600
601	St. Peter W	54 18 53 N	08 35 54 E	601
602	Adamsiel	54 22 28 N	08 40 33 E	602
603	Kolumbusloch	54 23 15 N	08 36 27 E	603
604	Everschopsiel	54 24 38 N	08 49 43 E	604
605	Süderoogsand	54 25 11 N	08 30 04 E	605
606	Südfall	54 26 48 N	08 44 51 E	606
607	Süderoog Hever	54 27 06 N	08 34 18 E	607
608	Finkhaushallig	54 27 32 N	08 58 47 E	608
609	Nordstrand Süderhafen	54 28 22 N	08 55 00 E	609
610	Husum	54 28 27 N	09 01 34 E	610
611	Stegel	54 29 17 N	08 32 07 E	611
612	Ochsensand	54 29 48 N	08 41 27 E	612
613	Struklahnungshörn	54 29 54 N	08 48 31 E	613
614	Pellworm	54 31 22 N	08 41 06 E	614
615	Holmer Siel	54 31 49 N	08 52 40 E	615
616	Pellworm, Hoogerfähre	54 32 09 N	08 36 02 E	616
617	Norderoog	54 32 18 N	08 32 07 E	617
618	Nordstrandischmoor	54 32 39 N	08 49 34 E	618
619	Arlau Schleuse	54 32 54 N	08 56 29 E	619
620	Hooge, Landsende	54 33 37 N	08 34 28 E	620
621	Rummelloch O	54 34 20 N	08 43 20 E	621
622	Butterloch	54 34 31 N	08 47 47 E	622
623	Hooge, Anleger	54 34 48 N	08 33 27 E	623
624	Strand	54 35 45 N	08 47 57 E	624
625	Bordelumer Außensiel	54 36 57 N	08 52 32 E	625
626	Langeneß, Hilligenley	54 37 20 N	08 33 06 E	626
627	Gröde	54 37 43 N	08 43 35 E	627
628	Langeneß, Neuwarft	54 37 54 N	08 38 58 E	628
629	Schlüttsiel	54 41 03 N	08 45 21 E	629
630	Wyk/Föhr	54 41 43 N	08 34 39 E	630
631	Amrum-Odde O	54 42 42 N	08 21 42 E	631
632	Amrum-Odde W	54 42 46 N	08 20 22 E	632
633	Dagebüll	54 43 56 N	08 41 17 E	633
634	Hörnum	54 45 35 N	08 17 55 E	634
635	Hörnum W	54 45 36 N	08 16 32 E	635
636	Föhrer Ley S	54 46 40 N	08 36 02 E	636
637	Hörnumtief	54 46 50 N	08 27 01 E	637
638	Föhrer Ley N	54 47 46 N	08 33 44 E	638
639	Südwesthörn	54 47 54 N	08 39 39 E	639
640	Osterley	54 51 01 N	08 33 04 E	640
641	Rantumdam	54 51 20 N	08 18 09 E	641
642	Westerland	54 54 20 N	08 16 41 E	642
643	Westerland, Meßpfahl	54 54 37 N	08 16 20 E	643
644	Rickelsbüll Koog A. P.	54 54 53 N	08 37 24 E	644
645	Munkmarsch	54 55 22 N	08 21 49 E	645
646	Jordsand	54 59 30 N	08 34 00 E	646

Tabelle 2 (Fortsetzung)

	Name der Pegels	Geographische Koordinaten		
		Breite	Länge	
		° ' "	° ' "	
647	List	55 01 07 N	08 26 29 E	647
648	List W	55 03 26 N	08 24 13 E	648
649	Korresand	55 14 30 N	08 26 00 E	649
650	Esbjerg	55 28 00 N	08 27 00 E	650
700	HELGOLAND	54 10 50 N	07 53 27 E	700
701	Jade/Tonne 7	53 50 30 N	07 50 00 E	701
702	Schlüsseltonne	53 57 00 N	07 50 00 E	702
703	79413	53 58 06 N	08 07 12 E	703
704	Helgoland S	54 04 00 N	07 50 00 E	704
705	78400	54 10 30 N	07 21 00 E	705
706	79412=78405=78406=79404=79405	54 10 40 N	07 26 10 E	706
707	Helgoland NW	54 13 00 N	07 50 00 E	707
708	Helgoland N	54 18 00 N	07 50 00 E	708
709	Steingrund NW	54 18 00 N	08 00 00 E	709
710	Steingrund NO	54 18 00 N	08 10 00 E	710
711	Süderhever	54 18 00 N	08 20 00 E	711
712	Forschungsplattform „Nordsee“	54 42 06 N	07 10 09 E	712
713	79407	54 55 42 N	08 16 54 E	713
714	79409	54 56 50 N	08 12 50 E	714
715	77406=78403=78402=77407	54 59 48 N	07 54 20 E	715
716	78408=79410	55 09 48 N	06 00 00 E	716
717	81401	55 14 30 N	07 06 42 E	717
718	81400	55 18 00 N	06 58 20 E	718
719	77409	55 49 00 N	07 33 00 E	719

verfahren bestimmten zu vergleichen. Aber für die eindeutige Zuordnung einer Höhenbestimmung aus Satellitenmessung zum NN-System fehlt zur Zeit die genaue Kenntnis der NN-Undulation, die als Summe aus Geoidundulation und ortsabhängigem Abstand zwischen Geoid und Normalnull angesehen werden kann. Daher muß darauf verzichtet werden. Dieser Vergleich steht also noch aus.

Von besonderer Bedeutung für das bisher Gesagte sind Hochseepegeldata, da sie verbesserte Aussagen zum Gezeitenablauf im freien Meer ermöglichen. Hochseepegel sind Druckpegel. Der Pegel registriert am Meeresboden den Gesamtdruck der über dem Druckaufnehmer liegenden Wassersäule plus Luftdruck. Druckwerte dieser Pegel, die aus verschiedenen früheren Meßprogrammen des Deutschen Hydrographischen Instituts (DHI) und aus dem DEBEX-Programm 1981 vorliegen, mußten ausgewertet und bis zur Tidekurvenform für eine möglichst vollständige Gezeitenbeschreibung aufbereitet werden.

Mit dem im NN-System bestimmten MTmw eines Pegels im Küstenvorfeld lassen sich in einem bestimmten Umkreis für weitere Pegelorte deren PN-Höhen mit guter Annäherung an die Ergebnisse der üblichen Meßverfahren ableiten. Die praktische Anwendung dieses Näherungsverfahrens zur PN-Höhenableitung soll an einem konkreten Beispiel erläutert werden.

In der Elbmündung nördlich des Scharhörnriffs wird seit 1984 ein Pegel in der Radarbake A betrieben. Bedingt durch seine extreme geographische Lage konnte die Beziehung zwischen PN-Radarbake A und NN bisher nur über das bekannte MTmw des Pegels LT Großer Vogelsand abgeleitet werden. Da es z. Zt. nur möglich ist, mit hydrostatischen Nivellements Höhenübertragungen vom Festland zu Seepegeln mit ausreichender Genauigkeit durchzuführen

ren, hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde im Zusammenwirken mit dem WSA Cuxhaven 1990 ein hydrostatisches Nivellement im seewärtigen Elbbereich zur PN-Bestimmung verschiedener Seepegel, u. a. auch für die Radarbake A, ausführen lassen.

Ein Vergleich beider unterschiedlich ermittelter PN-Höhen für die Radarbake A (wobei die hydrostatisch bestimmte Höhe nur als vorläufiges Ergebnis vorliegt) zeigt eine Übereinstimmung bis auf 4 cm. Beide Ergebnisse können jedoch noch mit schwer erfassbar naturbedingten Unsicherheiten und Unzulänglichkeiten in den Höhenanschlußpunkten behaftet sein.

Das Näherungsverfahren zur PN-Höhenableitung mittels MTmw setzt aber voraus, daß für beide Pegelorte, dem Ausgangspegel (LT Gr. Vogelsand) und dem Anschlußpegel (Radarbake A) die mittleren Tideverhältnisse über längere Zeit bekannt sind, um aus deren Spektrum MThw und MTmw mit einer zuverlässigen Genauigkeit zu bestimmen. Die Güte der Differenz zwischen MThw und MTmw beider Pegelorte beeinflußt die Genauigkeit der Höhe für den Anschlußpegel.

In den vorliegenden Untersuchungen zeigte es sich, daß die PN-Höhen der Pegel in der Küstenregion über deren MTmw in engem Zusammenhang mit den natürlichen Wasserstandsverhältnissen stehen. Daher ist es möglich, mit einer Plausibilitätsstudie die Qualität der PN-Höhen von Pegeln im Küstenbereich und Küstenvorfeld bei vergleichenden hydrologischen Untersuchungen zu beurteilen.

3.2 Schwierigkeiten bei der Bestimmung eines säkularen Trends

3.2.1 Grundlegende Gedanken

Von besonderem Interesse sind die aus Pegelbeobachtungen ermittelten Bewegungen des relativen MSL zwischen Land und Meer. Eine solche Entwicklung scheint sich aufgrund verschiedener Forschungsschwerpunkte zu konkretisieren. Aber die Frage bleibt offen, wie man bei uns die Veränderungen beschreiben und mathematisch erfassbar machen will, solange es in der Bundesrepublik Deutschland keine einheitliche Meinung über eine Prognoseebene gibt. Zur Darstellung dieser dynamischen Vorgänge muß angestrebt werden, eine gemeinsame Sprache zu sprechen. Z. B. sollte bei säkularen Trendangaben die mathematische Beschreibung des Analysezeitraumes mit den dazugehörigen statistischen Kenngrößen nicht fehlen, und die ermittelten Trendrichtungen sollten sich, wie international üblich, auf MTmw bzw. MSL beziehen. Außerdem sollte die Anregung von STEWART et al. (1990) aufgegriffen werden, von RMSL (relativer MSL) zu sprechen. Dieser ist eigentlich, wie später noch ausgeführt wird, der von Ort zu Ort interessierende.

Ein Grundproblem der Trendanalyse liegt darin, daß sich mit statistischen Untersuchungsmethoden (um die handelt es sich hier ausschließlich) nur Wahrscheinlichkeiten bestimmen lassen, die je nach Auswahl der Variablen mehr oder weniger abgesichert sind. Werden die aus Wasserstandsbeobachtungen ermittelten und zu Jahreswerten aufbereiteten Scheitelwerte der Tidekurve, das Tidehochwasser (Thw) und das Tideniedrigwasser (Tnw), und die hieraus abgeleiteten Tidehalbwasser (T1/2w) bzw. Tidemittelwasser (Tmw) als Schätzung im Sinne der mathematischen Statistik angesehen, so lassen sich aus den Berechnungen Erkenntnisse gewinnen, die Prognosen für einen MSL-Trend für eine begrenzte Zeit ermöglichen. Dieser Aussage liegt aber für die Zukunft eine ähnliche Wasserstandsentwicklung wie in der abgelaufenen Zeit zugrunde.

Im Hinblick auf die sichere Grundlage für Analysen ist die statistische Zuverlässigkeit der Tideparameter von besonderer Bedeutung, weil die vorhandenen brauchbaren Wasserstands-

daten als Stichprobe aus einer unbegrenzt gedachten Grundgesamtheit entnommen wurden, in der vorliegenden Arbeit für Cuxhaven und Wilhelmshaven ab etwa 1850. Dabei ist der Initialzustand unbekannt. Hieraus folgt, daß unterschiedliche Zeitreihen ab 1850 bis heute jeweils nur eine von vielen möglichen Realisationen des ihr zugrunde liegenden statistischen Prozesses darstellen. Die gewässerkundlichen Jahresmittel sind innerhalb dieses Zeitreihenmodells als zufallsbedingte Realisationen aus einer großen Menge aller möglichen Mittel zu interpretieren.

Je nach örtlicher Lage sind die täglichen Wasserstände mit unterschiedlichen Ungewissheiten behaftet. Eine große Anzahl von Einflüssen klimatischen, meteorologischen, ozeanographischen, tektonischen oder morphologischen Ursprungs treten mit wechselseitiger Wirkung auf und überlagern den Effekt der gezeitenerzeugenden Kräfte. Diese Einflußfaktoren bewirken also zusätzliche kurzfristige Veränderungen einer Tide und sind hinsichtlich des zeitlichen Verlaufes kaum meßbar. Sie beeinflussen aber die Aufbereitung von Wasserständen bis zur Mittelbildung und haben zur Folge, daß die in den gewässerkundlichen Jahrbüchern ausgewiesenen arithmetischen Mittel von Hoch- und Niedrigwasser auch von Dauer und Größe dieser „Störeffekte“ abhängig sind. Als Beispiel sei das durch die lange Ostwindperiode des Winters 1946/47 beeinflusste und daher von anderen Jahresmitteln stark abweichende MThw und MTnw 1947 für die deutsche Nordseeküste genannt.

Für den Umgang mit unvermeidlichen Abweichungen, die nun einmal bei Messungen auftreten, fehlen in den gewässerkundlichen Jahrbüchern Angaben zur Standardabweichung und zum Vertrauensbereich der Monats- und Jahresmittel vom Thw bzw. Tnw. Aus der Sicht eines Hydrologen ist das im Zeitalter der elektronischen Datenverarbeitung ein unbefriedigender Zustand. Diese Prüfgrößen dienen zur Bewertung der inneren Zuverlässigkeit des Datenmaterials, lassen grobe Fehler erkennen, sind das Kriterium für die Bewertung der Güte einer Meßstation und können bei späteren Analysen wichtige Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung klären.

Nach diesen kurzen Bemerkungen stellt sich die Frage, was man unter Genauigkeit von hydrographischen Größen zu verstehen hat. Es liegt nahe, damit nur die instrumentelle Meßgenauigkeit zu bezeichnen, über die GÖHREN (1968) und SIEFERT (1970) berichteten. Hier soll darunter aber ein Erwartungswert für die Genauigkeit hydrographischer Mittelwerte verstanden werden, der abhängig ist von der Meßgenauigkeit, den Wasserstandsdifferenzen täglicher Ungleichheiten der gezeitenerzeugenden Kräfte und den Abweichungen zufälliger Ereignisse auf den Wasserstand. Hierüber fehlen bis heute jegliche Angaben. Nach Überschlagsrechnungen können Standardabweichungen gewässerkundlicher Jahresmittel bei einem Datenkollektiv von rd. 700 Werten wegen der starken Streuung täglicher Tidewasserstände nur mit rd. ± 30 bis ± 35 cm und einem hieraus resultierenden Vertrauensbereich der Mittelwerte von ± 2 cm (statistische Sicherheit 95 %) angegeben werden. Ausgeklammert bleiben bei dieser Betrachtung Höhenbezugsprobleme zu NN bzw. PN. Für hydrologische Mittelwerte läßt sich kein Grenzwert zur Standardabweichung einführen, bei dem unter bestimmten Voraussetzungen dieser Wert zur weiteren Analyse verworfen werden sollte, da es keinen geeichten Meßwert als Vergleichsnormale gibt, um das Datenkollektiv signifikant beurteilen zu können.

In diesem Zusammenhang kann der Begriff des Fehlers im engeren Sinn auch nicht definiert werden; nachweislich grobe Fehler sollen hier ausgenommen sein.

Das Problem, ob sich mit Standardabweichungen „Qualitätsunterschiede“ der Jahresmittel von Pegelorten an der deutschen Nordseeküste nachweisen lassen, muß daher abschließend verneint werden. Abweichungen in den Standardabweichungen deuten hier auf unterschiedliche Abhängigkeit der Mittelwerte von den täglichen Natureinflüssen hin.

3.2.2 Daten

Unter Berücksichtigung der geschilderten Verhältnisse kommt den Genauigkeitsanforderungen an das Datenmaterial zur Trendbestimmung im linearen Ansatz eine höhere Bedeutung zu als bisher angenommen wird, da Prognosen auf der Basis von Jahresmittelwerten schwer zu erstellen sind. Vielfach wird daher in Berechnungsmodellen versucht, unerwünschte Einflüsse starker Streuungen einzelner Jahreswerte auf den zu erwartenden Schätzwert durch übergreifende Mittelwerte größerer Zeitspannen zu eliminieren. Dies bringt jedoch kaum eine höhere Genauigkeit im Trend, führt aber durch Glättung der Mittelwerte zur (scheinbaren) rechnerischen Verbesserung der statistischen Prüfgrößen.

In Verbindung mit einer Trendanalyse des Pegels Cuxhaven aus einjährigen und aus dreijährigen übergreifenden Mitteln für den Zeitraum 1855 bis 1987 sei dies hier kurz skizziert (Tab. 3). Das praktische Beispiel gibt einen Einblick in die Zusammenhänge zwischen Trendermittlungen aus einjährigen und übergreifenden dreijährigen Thw-, Tnw- und Tmw-Jahreswerten der Epoche 1855 bis 1987. Danach erfahren die statistischen Kenngrößen zur Qualitätsbestimmung der Ausgleichsergebnisse zum Teil erhebliche prozentuale Genauigkeitssteigerungen, ohne aber die Werte der Schwerpunktkoordinaten sowie den Regressionskoeffizienten wesentlich zu beeinflussen. Vor einer Überbewertung statistischer Prüfgrößen ist daher eindringlich zu warnen. Auch lassen sich mit der Berechnungsmethode der einfach linearen Regression Einflüsse unerkannter Fehler oder äußerst extremer Wasserstände auf das Ergebnis nicht abschätzen.

In vielen geäußerten Ansichten kommt der Wunsch zum Ausdruck, Trendrichtungen aus repräsentativen Stichproben der unbekanntem Grundgesamtheit für Voraussagen über den Analysezeitraum hinaus zu extrapolieren. Das ist aber nur unter der Annahme zulässig, daß die Einflußfaktoren auf das Tidegeschehen auch in Zukunft gegenüber denen im vorliegenden Zeitintervall keiner Veränderung unterliegen. Weiter ist die Genauigkeit dieser Extrapolation vom Konfidenzstreifen der Regressionsgeraden abhängig, der überall eine unterschiedliche Breite hat und an der Stelle \bar{x} , \bar{y} am schmalsten ist; d. h., mit zunehmendem Abstand vom Mittelwert wird die Prognose ungenauer. Folglich ist sie im Ergebnis letzten Endes nicht hypothesenfrei.

Einige Autoren stellen die Verwendbarkeit älterer Wasserstandsaufzeichnungen zur säkularen MSL-Trendbestimmung in Frage; bei Benutzung neuerer Unterlagen gibt es in der Regel jedoch meist keine derartigen Bedenken. In diesem Zusammenhang ist es sicherlich richtig, festzustellen, daß die Präzision von Wasserstandsmessungen mit zunehmendem Alter abnimmt. Zwischen Abhängigkeit von Genauigkeit und Alter hydrographischer Messungen gibt es noch keine zusammenhängenden Untersuchungen. Es ist zu vermuten, daß etwa ab 1850 das Datenmaterial in der Aussagekraft zuverlässiger wird. Damit bleibt aber die Frage offen, ob ältere Wasserstandsdaten mit dem gleichen Gewicht in die Berechnung eingeführt werden dürfen wie Daten jüngeren Ursprungs. Bis heute ist es üblich, keine Genauigkeitsunterschiede zwischen den weniger präzisen älteren und den neueren Wasserstandsdaten zu treffen, wobei teilweise versucht wird, Daten bis etwa 1930 durch bestimmte Korrekturen qualitativ zu verbessern.

Den interpretierten säkularen MSL-Trendanalysen fehlt es auch an Schärfe, da die wichtigen Parameter für die Berechnung, die Wasserstände, nicht auf dem freien Meer, sondern nur im Küstenbereich bzw. an der Küste registriert werden. Und gerade hier machen sich die hinsichtlich ihres zeitlichen Verlaufes unterschiedlich wirkenden Störeffekte auf die Wasseroberfläche durch ungleiche Tideabläufe für Pegelorte, wie z. B. im südöstlichen Nordseeküstenbereich, bemerkbar. Je nach örtlicher Lage differieren die mittleren Wasser-

Tabelle 3. Statistische Kenngrößen zur säkularen Trendberechnung 1855 bis 1987 für Cuxhaven

D	MThw			MTnw			MTmw		
	1jährige Mittel	3jährige Mittel	d %	1jährige Mittel	3jährige Mittel	d %	1jährige Mittel	3jährige Mittel	d %
B	-	0,3445	+ 124	0,3900	0,5326	+ 37	0,5083	0,7243	+ 42
r	-	0,5868	+ 50	0,6248	0,7302	+ 17	0,7134	0,8514	+ 19
x	1921,0	1921,00	± 0	1921,00	1921,00	± 0	1921,00	1921,00	± 0
y	cm	633,81	-	346,03	346,03	-	499,61	499,40	-
Sy	cm	12,1469	- 31	7,8711	6,6378	- 16	7,6009	6,6160	- 13
Vy 95 %	cm	2,1592	- 31	1,3991	1,1799	- 16	1,3511	1,1761	- 13
a	cm	463,45	-	228,50	230,20	-	370,0231	365,39	-
b	-	0,1850	+ 4	0,1276	0,1258	- 1	0,1401	0,1455	+ 4
n	-	133		133			133		

B = Bestimmtheitsmaß
 r = Korrelationskoeffizient
 Sy = Standardabweichung
 a, b = Regressionsgerade von x auf y
 x, y = Schwerpunktkoordinaten der Variablen, (Zeit und Wasserstandshöhe)
 Vy 95 % = Vertrauensbereiche der Mittelwerte
 n = Anzahl
 d = Differenz
 D = Dimension

stände als Meßgrößen zur Bestimmung eines Säkularanstieges mit Auswirkung auf abweichende Regressionsfunktionen, wie der jährliche Säkularanstieg verschiedener Pegel in Tab. 4 zeigt.

JENSEN (1984) kommt in seinen Untersuchungen über die Säkulartrendfunktionen (Verschiebung des Zeitfensters um $\Delta t = 1$ Jahr bis zum Ende der Zeitreihe) zu ähnlichen Trendwerten.

Tabelle 4. Säkuläre Veränderungen (cm/Jh.)

Zeitraum Pegel	MThw	MTnw	MTmw	MT1/2w	Herkunft der Daten
<u>1931-1987</u>					
Borkum-Südstrand	0,266	0,102	0,197	0,200	D. G. J. nur bis 1980
Norderney	0,123	0,060	-	0,090	Jensen
Wilhelmshaven	0,316	-0,085	0,132	0,112	D.G.J.
Cuxhaven	0,248	-0,065	0,102	0,104	D.G.J.
Büsum	0,243	0,012	-	0,142	Jensen
Wittdün	0,405	-0,078	0,195	0,159	D.G.J.
List	0,243	-0,150	-	0,043	Jensen
Helgoland	0,144	-0,010	0,084	0,071	Jensen (1931-1944) (1955-1987)
<u>1951-1987</u>					
Helgoland	0,139	-0,095	0,027	0,021	DHI
<u>1888-1987</u>					
Cuxhaven	0,208	0,121	0,158	0,165	D.G.J.
Wilhelmshaven	0,286	0,043	0,178	0,184	D.G.J. (WSA W.)
<u>1885-1987</u>					
Cuxhaven	0,185	0,128	0,147	0,180	D.G.J.
Wilhelmshaven	0,285	0,098	0,195	0,186	D.G.J.

Die Ergebnisse der Tab. 4 zeigen, daß Regressionsfunktionen und die dazugehörigen MSL-Trendabschätzungen nur für ihren örtlichen und zeitlichen Rahmen betrachtet werden dürfen, weil die durch meteorologische Einflüsse bedingte unterschiedliche Verlagerung der Wassermassen in der südöstlichen Nordsee stark voneinander abweichende MSL-Entwicklungen hervorruft. Daher ist das Datenmaterial trotz seiner Fülle immer noch zu unvollständig, um die Erwartung einer abgesicherten MSL-Prognose zu erfüllen.

Der aus mittleren Wasserständen abgeleitete säkulare MThw-Trend eines Ortes (z. B. 21 cm für Cuxhaven der Zeitreihe 1888 bis 1987) beinhaltet als Mittelwert alle Anteile aus veränderlichen Wirkungen der bereits definierten Vorgänge auf die Meeresoberfläche, die sich vom reinen MSL-Anstieg nicht vollständig trennen lassen, auch wenn man dies im allgemeinen auf Grund der hinreichend vielen Daten in erster Näherung für das Mittel der Zufallsstichprobe annimmt. So hat jeder Wirkungsfaktor eine für sich spezifische Kurve, die durch Intensität, Raum und Zeit bedingt ist, deren Verlauf aber kaum oder nur in groben Zügen bekannt ist. Folglich ist es in diesem Fall wenig sinnvoll, von einem säkularen MSL-Trend zu reden, da man durch den Auswerteprozess für die weitere Interpretation hauptsächlich die Resultierende der Wirkung oder Wechselwirkung anderer Informationen erhält und nicht den reinen MSL-Parameter.

Eine bessere Auflösung des Problems – Trennung des MSL-Parameters vom Gesamteffekt der genannten Wirkung – wird auch unter dem Gesichtspunkt einer Gezeitenerfassung auf dem freien Meer durch Hochseepegel-Meßstationen nicht möglich sein. Wohl sind hier bestimmte küstenspezifische Einflüsse auf die Gezeiten nicht vorhanden, aber der Windstau als relevanter Parameter meteorologischer Einflüsse unterscheidet sich kaum in seiner Größe von dem im Küstenbereich*. Der Windstau hat auch hier Einfluß auf das Ergebnis. Im freien Meer läßt sich also auch kaum ein reiner MSL-Trend ermitteln. Damit dürfte es sehr schwer fallen, die Güte der bisherigen sogenannten MSL-Trendangaben um eine Größenordnung zu steigern, es sei denn, man verbessert die Wasserstandsregistrierung durch die gleichzeitige Registrierung meteorologischer Daten zwecks späterer Datenkorrektur und vervollkommenet das Auflösungsvermögen der bisher verwendeten Auswerteverfahren.

Festzustellen bleibt nach diesen Erkenntnissen, daß die interessierenden Ergebnisse höchstens Momentaufnahmen von in kontinuierlicher Veränderung sich befindenden Naturvorgängen in der südöstlichen Nordsee sein können und damit nicht den reinen MSL-Trend repräsentieren, sondern hauptsächlich örtliche Parameter für Bemessungswasserstände von Küstenschutzmaßnahmen darstellen.

Schon DIETRICH (1954) kommt in seinen Tideuntersuchungen zu dem Schluß, daß ein reiner MSL-Trend aufgrund von Pegelauswertungen in seinem Ausmaß aus dem Gesamtwert nicht zu analysieren ist, weil die Wasserstände u. a. Einflüsse von realen klimatisch-eustatischen, tektonischen und eis-isostatischen Bewegungen enthalten; auch hängt die Höhe des errechneten Mittelwertes wesentlich vom Beobachtungszeitraum ab.

Nach Eliminierung der ozeanographisch-meteorologischen Einflüsse berechnet DIETRICH aus Daten des Pegels Esbjerg für die Zeit von 1880 bis 1950 übrigens eine Anhebung des Nordseespiegels um $1,14 \pm 0,28$ mm/Jahr.

Aus diesen Ausführungen ist auch leicht abzuleiten, daß die Sicherheit einer Prognose oder Aussage nicht dadurch wächst, daß man Ergebnisse von mehreren Stationen mittelt. Dann ist ein flächenhafter Vergleich zu fordern, wie er in Kap. 3.4 behandelt wird.

3.2.3 Zur Küstensenkung

Im Hinblick auf die aus Wasserständen errechnete Vertikalkomponente der MTmw-Bewegung darf der Hinweis auf mögliche tektonische Senkungsvorgänge im Küstenbereich nicht außer acht gelassen werden. Früher nahm man an, daß epirogene Bewegungen die Hauptursache für einen relativen MSL-Anstieg sind. Bis heute ist der Nachweis solcher Bewegungen auch auf der Grundlage von Präzisionsnivellements kompliziert.

Damit wird das Problem der Meßbarkeit von rezenten Krustenbewegungen für deren Nachweis von zentraler Bedeutung. Weil die Vertikalbewegungen so gering sind, ist es oft schwer, das „Unmeßbare“ zu messen.

Zur Erforschung der Küstensenkung wurde die Durchführung des Nordseeküsten-Nivellements (NKN) zwischen der niederländischen und dänischen Grenze unter Einschluß höhenstabiler Punkte im Hinterland als gemeinschaftliche Sonderaufgabe verschiedener Behörden beschlossen.

Das NKN 1 ist von 1926 bis 1931 im Zusammenwirken preußischer Dienststellen entstanden. Dagegen wurde das NKN 2 von 1949 bis 1955/59 von den Vermessungsabteilungen des Bundes und der Länder beobachtet. Unterirdische Festlegungen und Rohrfestpunkte

* Hierauf wird in einer vorgesehenen dritten Veröffentlichung aus diesem Projekt eingegangen.

in geologisch stabilen Schichten verfestigen die Nivellementslinien und sollen tatsächliche Krustenbewegungen in mehrjährigen Abständen anzeigen.

Aus der Gegenüberstellung der Differenzen NKN 2–NKN 1 lassen sich keine signifikanten Höhenveränderungen nachweisen (ADV, 1960). In dem Bericht der ADV wird darauf hingewiesen, daß die Änderung der Höhenlage zwischen Land und Meer durch unterschiedliche Faktoren hervorgerufen werden, die sich in ihrer Wirkung abschwächen, ausgleichen oder verstärken.

LEONHARD (1987) kombiniert Ergebnisse aus dem Reichshöhennetz mit denen der NKN 1 + 2 und stellt signifikante Senkungserscheinungen der Nivellementspunkte an den Flüssen fest, dagegen auch stabile Gebiete auf den Geestrücken zwischen Elbe und Weser.

Inzwischen ist das NKN 3 durch eine neue und außerordentlich homogene Meßepoche im Rahmen der Gesamtwiederholung des „Deutschen Haupthöhennetzes“ in den Jahren 1980 bis 1985 mit anschließender Neubeobachtung der niedersächsischen NKN-Küstenlinien entstanden. Als Ergebnis der Auswertung des niedersächsischen Anteils am NKN 3 läßt sich nach bisher unveröffentlichten Hinweisen festhalten, daß sich der Trend zur Absenkung der ostfriesischen Nordseeküste bestätigt hat. Der Absenkungsbetrag liegt hier zwischen 5 und 10 cm/Jh. Demgegenüber sind nach ersten vorläufigen niedersächsischen Berechnungen in und um Cuxhaven keine signifikanten Krustenbewegungen festzustellen. Für die schleswig-holsteinische Westküste gibt es noch keine Resultate. Die Nivellements im NKN 3 stehen hier noch aus. Für die niederländische Westküste wird eine Absenkung um 5 cm/Jh angenommen.

Eine andere Betrachtungsweise zur Feststellung einer möglichen Nordseeküstensenkung basiert auf dem durch Zufall entdeckten geometrischen Nivellement von Hamburg nach Cuxhaven, ausgeführt von LENTZ 1855/56. Es stellt die Höhenverbindung zwischen den Pegelnullpunkten der „Fluthmesser“ von Hamburg und Cuxhaven her, um die zu jener Zeit bestehenden Auffassungen zum Tidegeschehen im Längsschnitt der Elbe zu verbessern.

Angeregt durch Tagebuchaufzeichnungen zu diesem Nivellement mit grundsätzlichen Überlegungen zur Höhenmessung sowie Beschreibungen über die Anfertigung der Nivellierlatten und Erläuterungen zur umlegbaren Libelle wurde das gesamte Nivellement neu bearbeitet. Hierzu mußten alle Werte von Fußmaß mit der Unterteilung Zoll und Linien in das metrische System umgerechnet, geprüft und aufbereitet werden. Zur Ehre von LENTZ sei gesagt, daß kein Fehler und keine Widersprüche in seinen Feldbüchern entdeckt werden konnten. Die Nivellementsstrecke beträgt 140 km und verläuft in SO-NW-Richtung. Gußeiserne Höhenschilder, befestigt an massiven Bauwerken, sollten die Höhenangaben für die Zukunft sichern.

Ausgehend von der Nullmarkenhöhe des „Hamburger Fluthmessers“ 1855 und den LENTZschen Höhenmarken auf der Linie Hamburg–Harburg–Cuxhaven wurden von LASSEN et al. (1984) nach eingehenden Prüfungen späterer Nivellements anderer Behörden mit ihren Festpunkten über beobachtete orthometrische Höhenunterschiede untereinander verknüpft.

Die Auswertung brachte überraschende Ergebnisse. Einmal ist an der Bauwerkssetzung des Cuxhavener Leuchturmes nicht zu zweifeln. Da die Höhenkontrollmarke am Leuchtturm von 1856 bis ca. 1900 als unverändert betrachtet worden ist, müssen die hierauf bezogenen Wasserstandshöhen als im hohen Maß verzerrt angesehen werden.

Andererseits sind die Höhenwertänderungen von Einzelpunkten wie auch die Höhendifferenzen der Nivellementslinien im Bereich Cadenberge–Cuxhaven–Altenwalder-Höhe für den gesamten Untersuchungszeitraum deutlich unter denen, die vom Arbeitskreis „Rezente Höhenänderungen“ der Deutschen Geodätischen Kommission als Senkungsbeiträge im Elbe-Weser-Dreieck mit 2 bis 8 cm/Jh angegeben werden (ADV, 1960). Gewiß mag dieses lineare Rechenmodell vereinfachend dargestellt sein. Es wird auch nicht verkannt, daß es unvermeid-

liche Probleme gibt, weil die verwendeten Messungen verschiedener Institutionen aus unterschiedlichen Epochen mit abweichenden Genauigkeiten stammen. Im Hinblick auf die im Cuxhavener Bereich festgestellten geringen Höhenunterschiede in einem mehr als 100jährigen Zeitraum kann man hier aber nicht von signifikanten Krustenbewegungen oder einer Höheninstabilität reden. Damit scheint sich die geologisch begründete Abschätzung von 1 cm/Jh als Ausmaß für eine Küstensenkung im Elbe-Weser-Raum zu bestätigen.

Dem ermittelten Absenkungsbetrag der ostfriesischen Nordseeküste zwischen 5 und 10 cm/Jh und dem erwähnten geringen Ausmaß der Bodenbewegung in und um Cuxhaven steht ein säkularer MTmw-Anstieg der Pegel Cuxhaven und Wilhelmshaven von rd. 15 cm im Zeitraum 1888 bis 1987 gegenüber. Bei einer angenommenen Küstensenkung z. B. müßte sich in einem gewissen Zeitraum eine Änderung zum Pegelnull (PN) ergeben. Nur fragt es sich, ob die PN-Höhenberichtigungen der Pegel Cuxhaven und Wilhelmshaven (hier änderte sich im Laufe der Jahre das $PN = NN - 5$ m auf $PN = NN - 5,02$ m bzw. $PN = NN - 5,04$) als echte Krustensenkungsbeträge anzusehen sind oder ob sie in Abhängigkeit zu Bauwerksbewegungen bzw. Standortwechseln der Pegel stehen. Die Kenntnis von PN-Berichtigungen allein bleibt unbefriedigend; wesentlich ist es, zu erkennen, woher diese Änderungen stammen, um bei Wasserstandsvergleichen Datenverbesserungen folgerichtig anzubringen. Inwieweit sich so der tektonische Anteil an den registrierten Wasserständen nachweisen läßt, ist schwer zu beantworten. Verschiedentlich wird daher versucht, aus den Vertikalbewegungen der Pegelstationen Bodenbewegungen abzuleiten und diese vom Trend der Pegelregistrierung abzuziehen, um an der Küste einen „reinen“ Trend zu erhalten. Die hier unterstellte Bodenbewegung reicht zur Bestätigung tektonischer Aktivitäten nicht aus. Die Ursache der begrenzten Genauigkeit liegt hauptsächlich in den zeitlich stark abweichenden Messungsaktionen. Um so mehr ist es in diesem Zusammenhang wichtig, durch zeitlich zusammenhängende Nivellements im Nordseeküstenbereich Unklarheiten über tektonische Aktivitäten zu beseitigen.

Aus allem folgt, daß man einen beobachteten säkularen Trend im Küstenbereich und eine Absenkung der Nordseeküste nicht voreilig verknüpfen sollte, solange man zu diesem Thema noch differenzierende Untersuchungen benötigt.

3.3 Mittlere Tideverhältnisse um 1980

3.3.1 Allgemeine Übersicht

Bis heute besteht eine gewisse Aversion gegen die seltenen zeichnerischen Darstellungen von Formveränderungsabläufen der Oberfläche der Tide in der Nordsee, weil der exakte Nachweis über den Verlauf von Flutstundenlinien und die Lage eines Scheitels der Summe der Partialtiden durch unzulängliche Gezeitenmessungen im freien Meer auf Schwierigkeiten stoßen. Unter physikalischen Gesichtspunkten werden hauptsächlich Pegelraten aus dem Küstenbereich zur Gezeitenbestimmung für die Nordsee in numerische Rechenmodelle eingesetzt. Davon hängt aber ganz wesentlich die angestrebte Genauigkeit der Berechnungen ab. Bei älteren Ergebnissen zeigen sich aufgrund unzureichender Daten große Widersprüche in den Lagekoordinaten des Scheitels der südlichen M_2 -Amphidromie, der wegen der Dominanz dieser Partialtide bestimmend für das Gesamtgeschehen ist, und Auswirkungen auf den Kurvenverlauf der dazugehörigen Flutstundenlinien:

Ausführlich interpretiert SPINGAT (1989) die Auflösungsgenauigkeit von Flutstundenlinien-Darstellungen verschiedener Autoren.

Erste konkrete Kenntnisse zum Ablauf der Flutstundenlinien in der südlichen Nordsee

liefert HANSEN 1948, der mit allgemeinen Bewegungsgleichungen und der Kontinuitätsgleichung rechnete. Aufgrund von Beobachtungen an 120 Pegelorten verbessert das DHI später die von HANSEN angegebenen Gezeitenbeschreibungen.

Aus der Literatur werden die geographischen Koordinaten für den Scheitel der M_2 -Gezeit gegenübergestellt:

	Berechnungsjahr	Breite N	Länge O
MERZ	1923	55° 42'	5° 25'
DEFANT	1923	55° 30'	6° 10'
DOODSEN	1924	55° 34'	5° 40'
MÖLLER	1933	55° 42'	5° 30'
HANSEN	1948	55° 32'	5° 16'
DHI	1970	55° 26'	5° 17'

Eine geographische Minute hat bei 55° 35' N und 5° 25' O eine Ausdehnung in der Breite von ~1,8 km und in der Länge von ~1,1 km.

Es wurde bisher niemals versucht, amphidromische Bewegungen auf der Basis aller verfügbaren Wasserstandsmessungen zu untersuchen. Für das weitere Vorgehen zur Formveränderungsanalyse der Tide in der südöstlichen Nordsee und dem angrenzenden Küstenstreifen werden die erstmals aus zusammenhängenden beobachteten Wasserstandsreihen aller verwendbaren Pegel ermittelten Tideverhältnisse an Hand der Isohypsen (Linien gleicher Tidewasserstände) aus dem früher behandelten Zeitraum 1975/79 (SIEFERT und LASSEN, 1985) durch Resultate eines zweiten Berichtszeitraumes 1982/86 ergänzt und abgesichert.

Aus der Synthese beider Untersuchungszeiträume zu einer Gesamtdarstellung 1975/1986 (oder etwas allgemein „um 1980“) ergeben sich flächenhafte Momentaufnahmen von Tidewasserständen zu bestimmten Tidezeiten, bezogen auf Borkum-Südstrand als wesentlichsten deutschen Pegel. Den detaillierten Eindruck über die mittleren Tideverhältnisse vermittelt eine Serie zweidimensionaler identischer Kartenausschnitte mit Isohypsen z. Zt. $Tn_{w_{Bor}}$ (Abb. 12), z. Zt. $Tn_{w_{Bor}} + 2^h$ (Abb. 13), z. Zt. $Tn_{w_{Bor}} + 4^h$ (Abb. 14), z. Zt. $Tn_{w_{Bor}} = 6^h$ nach $Tn_{w_{Bor}}$ (Abb. 15), z. Zt. $Th_{w_{Bor}} + 2^h$ (Abb. 16) und z. Zt. $Th_{w_{Bor}} + 4^h$ (Abb. 17) und durch Linien gleicher Thw- bzw. Tnw-Eintrittszeitdifferenzen (Abb. 7, 8) sowie durch Linien gleicher MThw, MTnw und MThb (Abb. 4, 5, 6).

Grundlage dieser Zustandsbeschreibungen sind die auf NN - 5 m bezogenen Wasserstandshöhen der mittleren Tidekurven der etwa 230 Pegelorte. Um auch für Hochseepegelstationen, bei denen aufgrund des Meßprinzips und der geographischen Lage keine Verknüpfung mit dem NN-Horizont möglich ist, einen Bezug zum Pegelnull (PN) der Küstenpegel zu finden, wird, wie bereits erwähnt, für das MTmw der Hochseepegel und den Scheitelbereich der M_2 -Amphidromie die Höhe des Helgoländer MTmw 1975/86 mit 4,92 m NN - 5 m als Bezugsebene eingeführt.

Noch einige Anmerkungen sind nötig:

Der Pegel Borkum-Südstrand wurde 1981 außer Betrieb gesetzt und verliert damit für den Untersuchungszeitraum 1982/86 seine Funktion als direkter Bezugspegel. Daher muß der Pegel Borkum-Fischerbalje als Bezugspegel für die Auswertung der Wasserstände 1982/86 genommen werden. Dies machte später bei der Gesamtdarstellung der Tidecharakteristik 1975/86 eine Abstimmung der Wasserstandsdaten 1982/86 auf Pegel Borkum-Südstrand durch Berücksichtigung der Tideintrittszeiten zwischen beiden Pegelorten erforderlich.

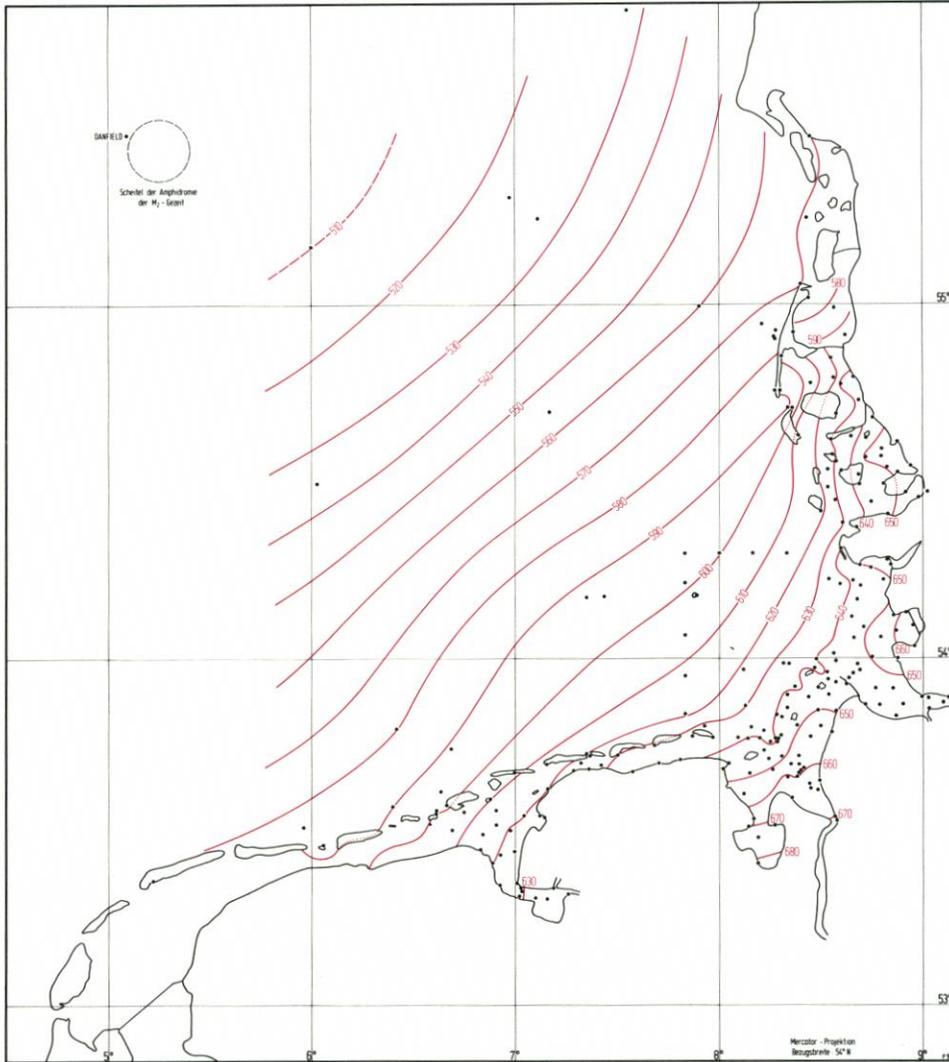


Abb. 4. Linien gleicher MThw 1980, angegeben in cm NN - 5 m

In der Deutschen Bucht arbeitete bis zu den Sturmfluten im Jan. und Feb. 1990 auf der Forschungsplattform ein Pegel mit unbekannter PN-Höhe. Die Wasserstandsaufzeichnungen dienten hauptsächlich meteorologischen Belangen. Entsprechend ungenau sind die Tideaufzeichnungen wegen zu kleinen Vorschubs und unzureichender Zeitkontrolle. Sie genügen nicht den Anforderungen der Pegelvorschrift. Trotz dieser Inhomogenität sind Daten in das Auswerteverfahren 1975/79 übernommen worden, weil zu diesem Zeitpunkt keine Tideaufzeichnungen im freien Meer zur Verfügung standen. Unter diesem Aspekt entsprach die Reedereigemeinschaft Forschungsschifffahrt als Betreiber der Station dankenswerterweise der berechtigten Forderung nach zuverlässigen Tideaufzeichnungen für ein halbes Jahr. Die Datenaktualisierung und die sorgfältige Auswertung aller zur Verfügung stehender Materia-

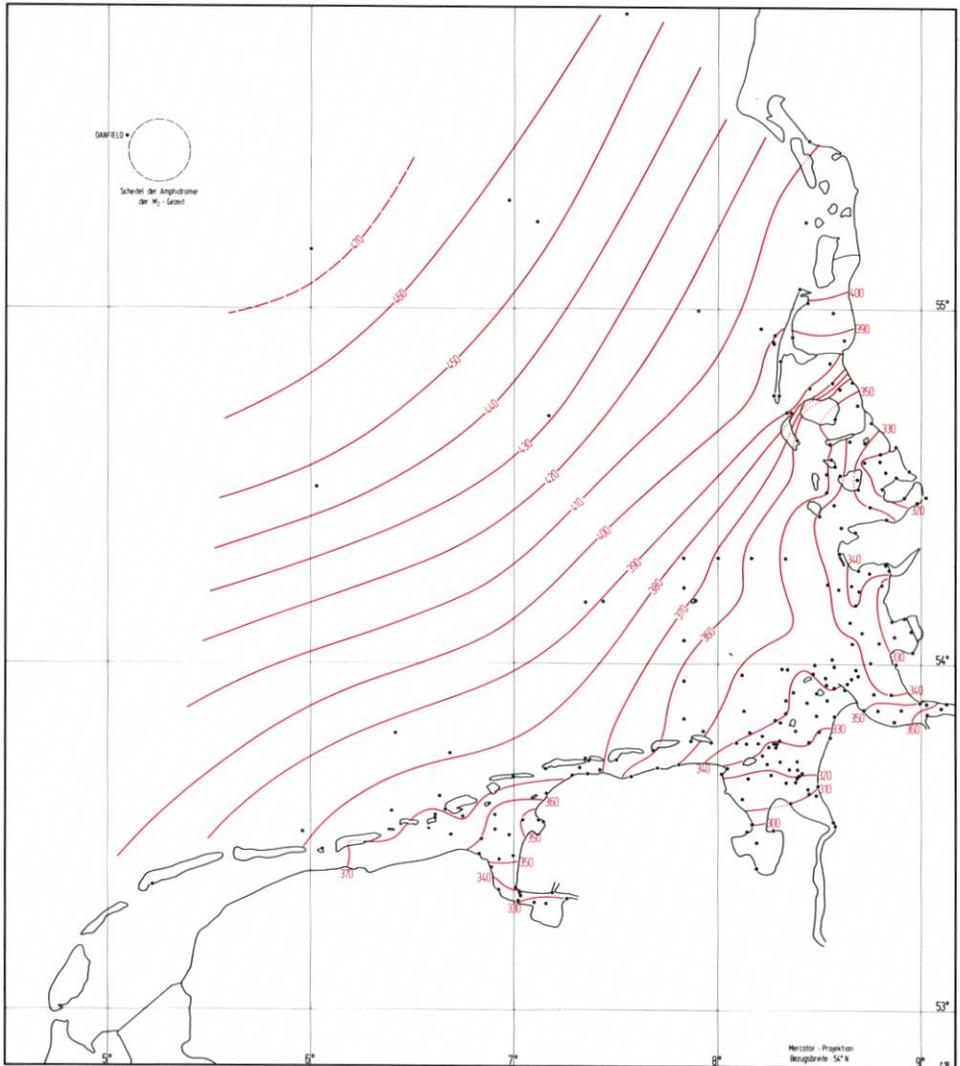


Abb. 5. Linien gleicher MTnw um 1980, angegeben in cm NN - 5 m

lien verbesserten erwartungsgemäß die für 1975/79 ermittelten Tidedaten an der Forschungsplattform. Dieser Dokumentation werden daher nur die Tideparameter aus 1982/86 zugrunde gelegt.

Die aus Einzelinformationen entwickelten und für die südöstliche Nordsee von SIEFERT und LASSEN (1985) mit den dortigen Abb. 5 bis 10 und 14 bis 20 dargestellten Gezeitenbewegungen 1975/79 werden unter dem Gesichtspunkt ergänzender Tideinformationen nachträglich ausgewerteter Hochsepegeldaten bis in das freie Meer, also beträchtlich über die Bereichsgrenze 1975/79 hinaus, aktualisiert. Dementsprechend ist es möglich, die Tideverhältnisse um 1980 in der Ausdehnung von Terschelling über den Scheitel der M_2 -Amphidromie nach Esbjerg und über den Küstenstreifen zurück bis in die Niederlande zu interpretieren.

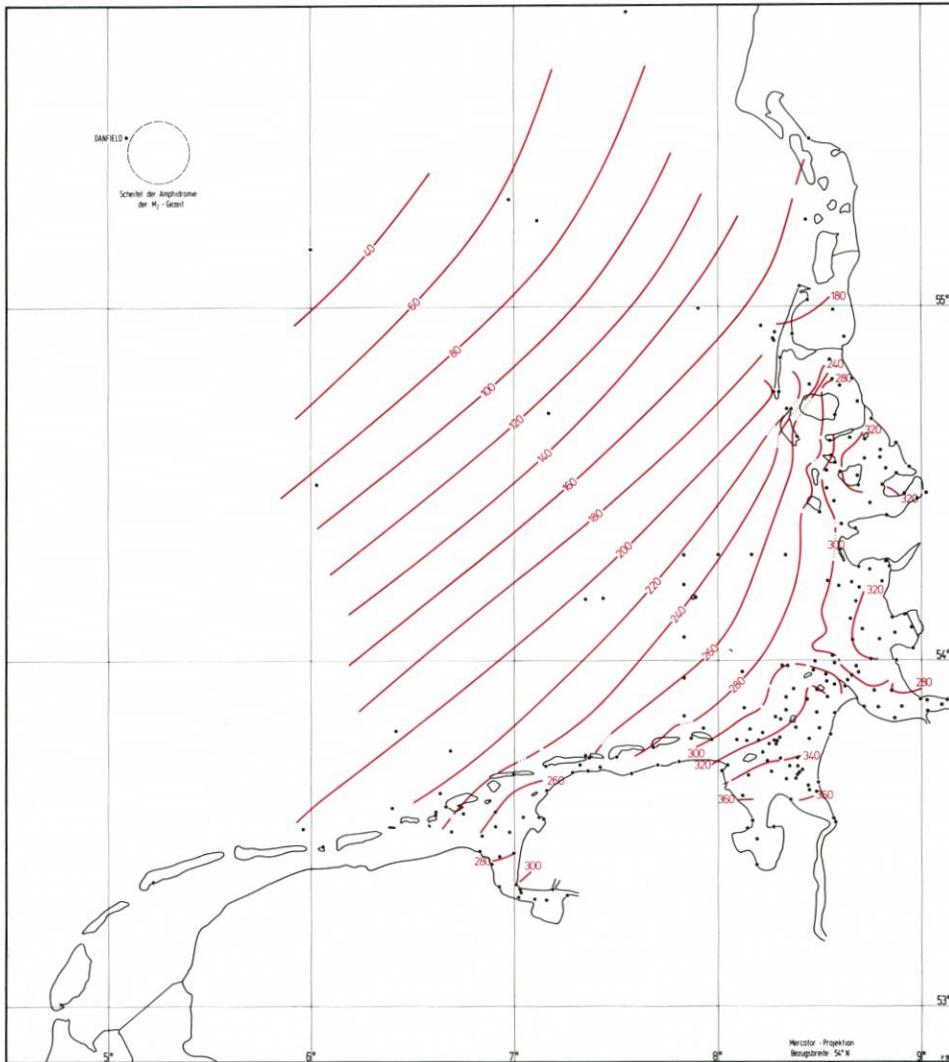


Abb. 6. Linien gleicher MThb um 1980, angegeben in cm

Zur besseren Verfolgung der Linienführung in den Karten werden diese in Insel- und Festlandsbereichen punktiert dargestellt. Sofern Linien gleicher Werte unsicher sind, ist dies durch Linienstrichelung erkennbar.

Die folgenden Erläuterungen zu den Tideverhältnissen im Bereich der südöstlichen Nordsee zu bestimmten Tidezeiten am Pegel Borkum-Südstrand sind als Ergänzung zu den Tidebeschreibungen 1975/79 aufzufassen bzw. wegen der größeren Informationsdichte als Verbesserungen.

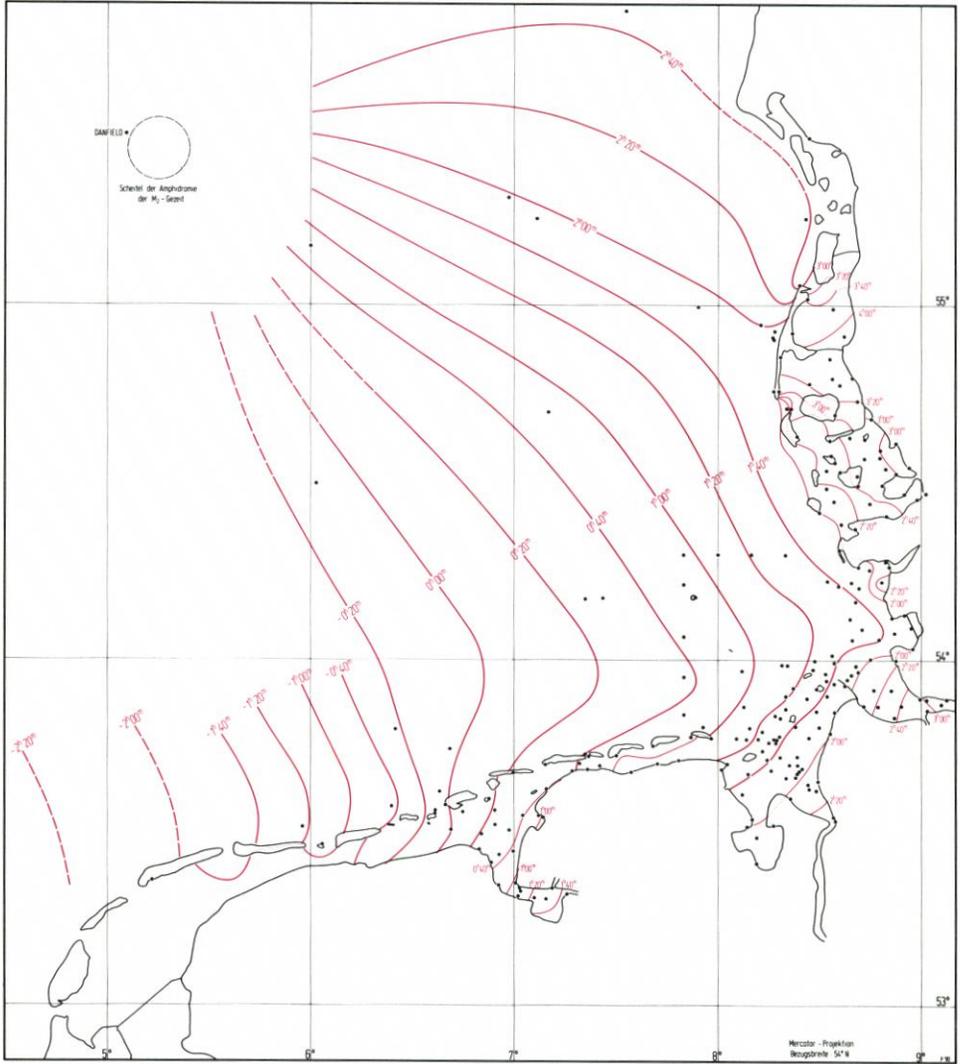


Abb. 7. Linien gleicher Thw-Eintrittszeiten um 1980, angegeben in 20 Minuten-Intervallen vor/nach Eintritt Borkum-Südstrand

3.3.2 Zu den Darstellungen*

3.3.2.1 MThw um 1980 (Abb. 4)

Die Abb. zeigt ein Bild mit gleichmäßigem Ansteigen des MThw von 500 cm auf 600 cm aus dem Bereich des Scheitels der M_2 -Gezeit nach Südost bis zur Linie Borkum-Helgoland-Amrum. Im Inneren der Deutschen Bucht steigt das MThw bis zur Grenze des Wattsockels

* Alle in diesem und im nächsten Kap. genannten Höhenwerte sind bezogen auf das Niveau NN – 5,00 m.

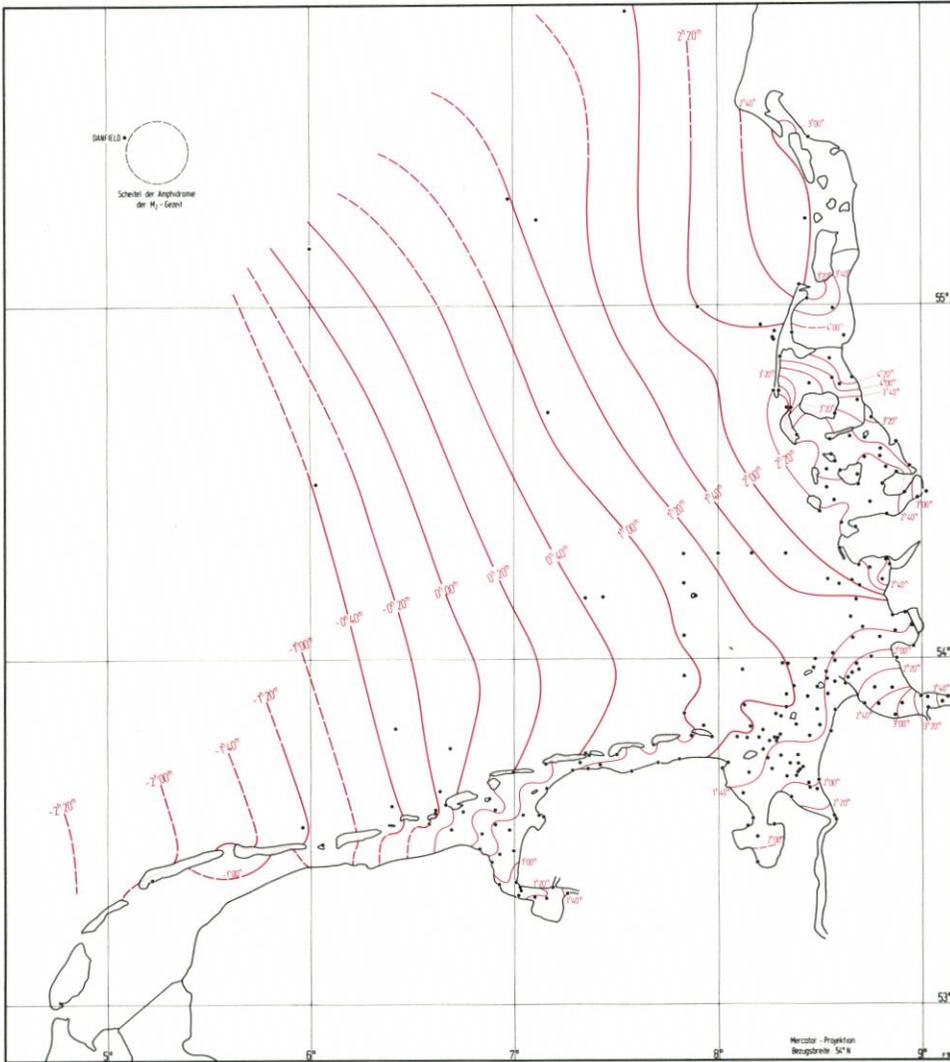


Abb. 8. Linien gleicher Tnw-Eintrittszeiten um 1980, angegeben in 20 Minuten-Intervallen vor/nach Eintritt Borkum-Südstrand

auf 640 cm weiter an. Durch die Topographie des Küstenvorfeldes bedingt, entwickeln sich die MThw-Höhen nach Süden sehr unterschiedlich. Von den Niederlanden über die Ems bis in das Jade-Weser-Ästuar erhöhen sich die MThw von ~ 630 cm bis auf Werte > 670 cm. Im Bereich der Außen- und Unterelbe bleibt das MThw unter 650 cm. Im Dithmarscher und nordfriesischen Wattgebiet steigt das MThw von West nach Ost und erreicht südlich der Linie Amrum-Langeneß-Küste Werte < 650 cm. Nördlich dieser Linie beträgt das MThw 620 cm bis 630 cm. Nördlich des Hindenburgdammes bleibt das MThw unter 600 cm.

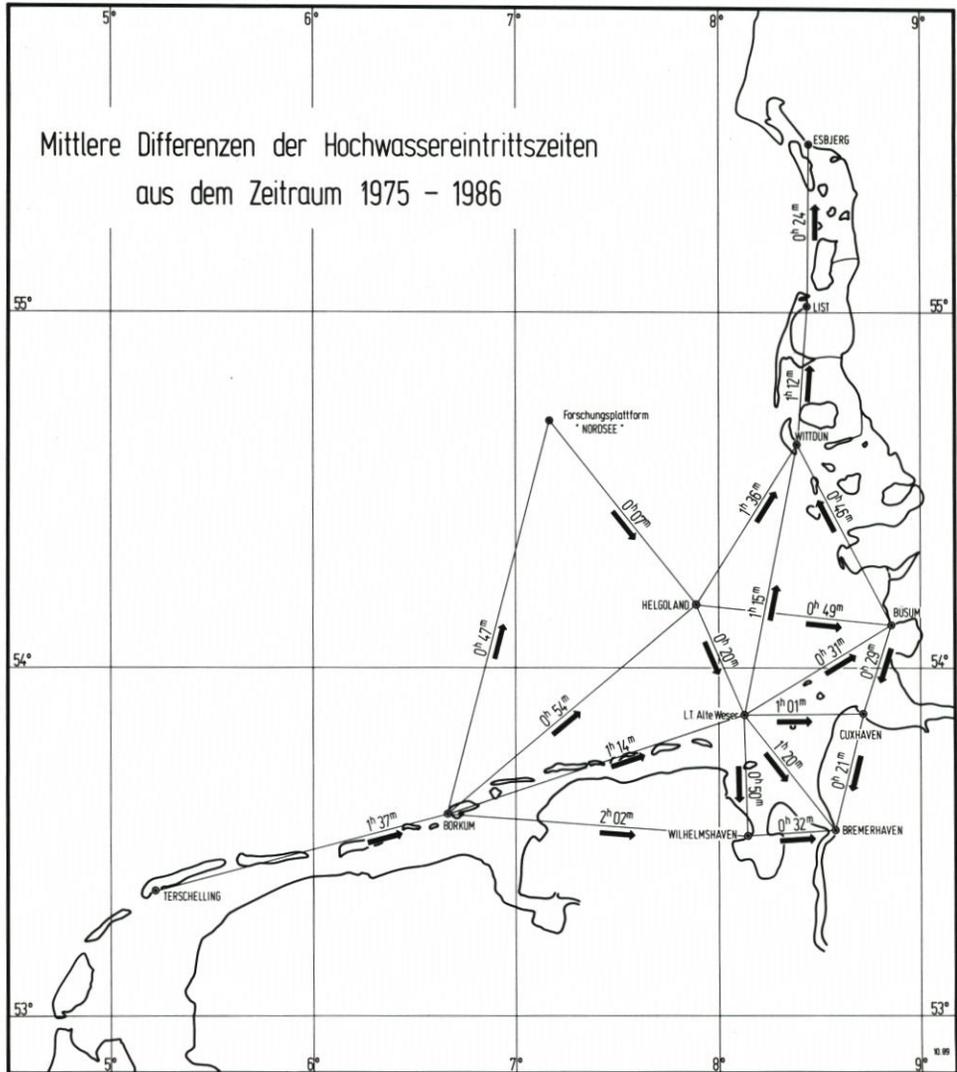


Abb. 9. Mittlere Differenzen der Hochwassereintrittszeiten zwischen verschiedenen Pegelorten um 1980

3.3.2.2 MTnw um 1980 (Abb. 5)

Die Abb. zeigt für die MTnw-Entwicklung ein ähnliches Verhalten wie das der MThw. Vom Scheitel der M_2 -Gezeit fällt das MTnw gleichmäßig nach Südost bis zur Linie Baltrum–Helgoland–Amrum auf 370 cm. Auch hier wird in Küstennähe der Einfluß der Topographie des Küstenvorfeldes auf die Wasserstände deutlich. In der Außenems ist nach Süden eine etwa gleichmäßige Abnahme der MTnw bis auf Werte < 330 cm erkennbar. Im Jade-Weser-Bereich fallen die MTnw nach Süden bis auf Werte unter 310 cm. In der Außen- und Unterelbe ist nach einer Abnahme der MTnw auf 340 cm ein Anstieg stromauf auf über 360 cm festzustellen. Im Raum Buisum–Pellworm sinkt das MTnw von West nach Ost auf Werte unter 330 cm

Von Borkum bis Wangerooge von 220 cm auf 280 cm ansteigend.

Vor den Weser-Elbe-Eider-Watten auf etwa 300 cm zunehmend.

Von Eiderstedt über Amrum bis Fanö von 280 cm auf 160 cm abnehmend.

Zum Dollart hin und zum Jade-Weser-Bereich gleichmäßig auf Werte von 300 cm bzw. auf über 360 cm ansteigend.

In der Außenelbe bleiben die Werte unter 300 cm.

Im Dithmarscher Watt wie auch östlich von Pellworm werden MThb mit über 320 cm gemessen. Von hier in Richtung Norden bis zum Hindenburgdamm nimmt der MThb auf 230 cm ab und erreicht nördlich des Hindenburgdamms Werte von weniger als 180 cm.

3.3.2.4 Eintrittszeiten der mittleren Tidehoch- und Niedrigwasser um 1980

Erstmals werden die Thw- und Tnw-Eintrittszeiten auf der Basis von Messungen bis in das Zentrum der M_2 -Gezeit ermittelt. Linien gleicher Thw- und Tnw-Eintrittszeiten geben die Zeitunterschiede gegen Borkum-Südstrand an.

3.3.2.5 Mittlere Thw-Eintrittszeit um 1980 (Abb. 7)

Die Eintrittszeit des Hochwassers verläuft entlang den ostfriesischen Inseln. Vor den Inseln hat die Linienstruktur eine SW-NO-Richtung bis nach Büsum und in die Ästuarie hinein. Im Bereich der Eider bis hin zum Hörnum Tief verlaufen die Linien von NNW nach SSO. In der südlichen Nordsee ist eine NW-SO-Zeitlinienstruktur erkennbar, die weiter nördlich, etwa ab Forschungsplattform Nordsee, einen mehr westlichen Verlauf in Richtung zum Zentrum der M_2 -Gezeit nimmt. Interessant ist die 2^h -Liniendarstellung. Nach anfänglicher SW-NO-Richtung von der Jade über die Watten sowie Weser und Elbe bis zur Meldorfer Bucht entwickelt sich diese Linie aus dem Dithmarscher Watt heraus zu einer Form, die sich bis zur Südspitze Sylts der Grenze des nordfriesischen Wattsockels in mehr nördlicher Richtung anpaßt, um von der Westküste Sylts fast orthogonal zur Küstenlinie in westlicher Richtung zum Zentrum der M_2 -Gezeit abzuschwenken. Auffällig ist auch der sehr langsame Tidefortschritt in das Hörnum Tief hinein.

3.3.2.6 Mittlere Tnw-Eintrittszeiten um 1980 (Abb. 8)

Für die mittleren Eintrittszeiten des Niedrigwassers ergibt sich im Westen zunächst ein ähnliches Bild wie bei den Thw-Eintrittszeiten. In der Nordsee hat die Linienstruktur bis etwa zur $1^h 40^m$ -Zeitlinie eine NW-SO-Richtung und im südlichen Küstenbereich einschließlich der Ästuarie eine SW-NO-Richtung. Im Dithmarscher und nordfriesischen Watt mit dem angrenzenden seewärtigen Bereich ist ebenfalls eine NW-SO-Richtung erkennbar, wobei die Zeitlinien im freien Meer nördlich des 54. Breitengrades einen fast nördlichen Verlauf nehmen, ohne daß in diesem Kartenausschnitt eine Richtungsänderung zum Zentrum der M_2 -Gezeit nachzuweisen ist. Aus dem Dithmarscher Watt heraus entwickelt sich mit Wattsockelparallelität die $2^h 20^m$ -Zeitlinie bis zur Südspitze Sylts, um bei Westerland orthogonal zur Küste seewärts mit später nördlicher Richtung ihren Fortgang zu nehmen. Auffällig sind außerdem die langsamen Tidefortschrittsgeschwindigkeiten um Föhr.

3.3.2.7 Mittlere Eintrittszeitdifferenzen dZF und dZE um 1980 (Abb. 9 und 10)

Zur Gewährleistung einer generellen Übersicht und zur zeitlichen Verknüpfung der wichtigsten Pegelorte in der südöstlichen Nordsee, wie auch als Ergänzung zu den Gezeitentafeln, sind in den Abbildungen die mittleren Thw- bzw. Tnw-Eintrittszeitdifferenzen zwischen verschiedenen Pegelorten zusammengestellt. Diese Auswertung stimmt bis auf wenige Minuten mit den astronomisch herzuleitenden überein.

Für Büsum war eine Neuberechnung vorzunehmen, weil sich durch die Abdämmung der Meldorfer Bucht Abweichungen zwischen den Eintrittszeitdifferenzen 1975/79 und 1982/86 an verschiedenen Pegelorten ergeben. So ist z. B. die mittlere Tidelaufzeit des Thw-Scheitels 1982/86 vom LT Alte Weser bis Büsum um 17^m kürzer als 1975/79 und beträgt nur noch 30^m, während für den Tnw-Scheitel die mittlere Zeitverschiebung zwischen beiden Orten jetzt nur noch mit 5^m anzunehmen ist. Die verbesserte Tideerfassung 1982/86 am Pegel Forschungsplattform Nordsee hat auch hier erhebliche Eintrittszeitverschiebungen zu anderen Orten gegenüber den ursprünglich für 1975/79 gen. bewirkt.

3.3.2.8 Mittlere Verhältnisse von Flut- und Ebbedauer T_F/T_E um 1980 (Abb. 11)

Die mittleren Flut- und Ebbedauern sind, soweit möglich, für alle Pegel, die auch das Tnw aufzeichnen, berechnet worden; aus diesen wurden die Verhältnisse von Flut- zu Ebbedauern abgeleitet.

Im Inneren der Deutschen Bucht und im äußeren Wattgebiet liegen die T_F/T_E -Verhältnisse um 0,9 bis 0,85. Die Küstenkonfiguration bewirkt, daß es in Küstennähe auch einzelne Bereiche gibt, in denen $T_F/T_E > 1$ ist, also die Flutdauer länger anhält als die Ebbedauer, wie z. B. nördlich Sylt, östlich Pellworm, in der Meldorfer Bucht, im Jadebusen und im Dollart. Auch können die T_F/T_E -Verhältnisse in der Küstenregion sehr differenzierte Werte annehmen; z. B. im Einzugsbereich des Hörnum Tiefs hat die Osterley einen Wert um 0,69, während über eine verhältnismäßig kurze Entfernung von hier nach Hörnum Hafen schon Werte um 1,03 erreicht werden. Auch elbaufwärts oberhalb der Ostemündung berechnet sich dieses Verhältnis in der Elbe mit kleineren Werten als 0,8.

Nördlich und westlich Helgoland steigt T_F/T_E von 0,9 bis auf das Maximum 1,17 in der Nähe des Scheitels der M_2 -Gezeit an.

3.3.3 Tideablauf im Küstenvorfeld und in der südöstlichen Deutschen Bucht um 1980

Im folgenden werden Informationen zu Momentaufnahmen (Linien gleicher Wasserstände in der südöstlichen Nordsee) zu einer bestimmten, auf Borkum-Südstrand bezogenen Zeitfolge vorgelegt. Grundlage der Darstellungen sind die aus Gezeitenmeßdaten entwickelten und auf NN - 5 m beschickten mittleren Tidekurven der Pegelorte (auch die der Hochseepegel) unter Berücksichtigung der betreffenden relevanten Zeitverschiebung zu Borkum-Südstrand.

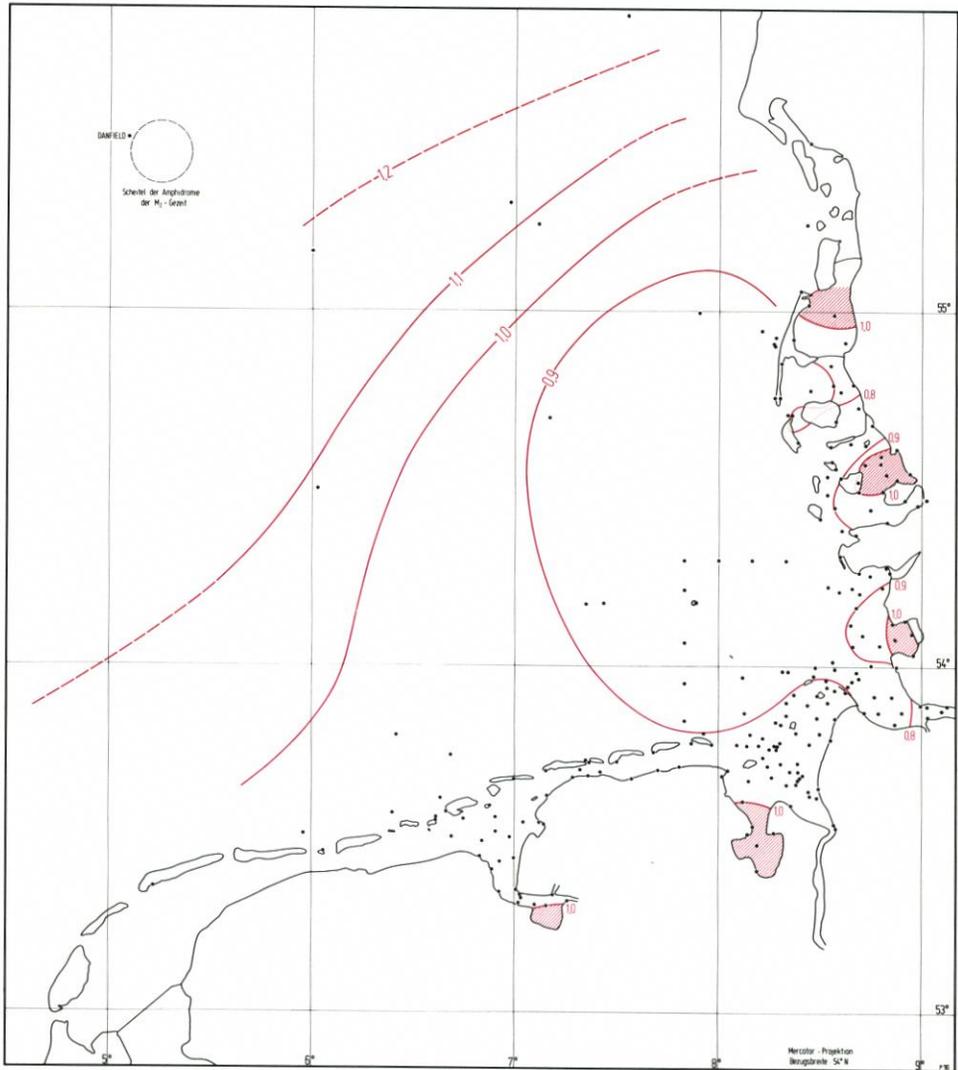


Abb. 11. Verhältnis der mittleren Flut- zur Ebbedauer T_F/T_E um 1980

3.3.3.1 Z. Z t. $T_{nw_{BoR}}$ (Abb. 12)

Um $T_{nw_{BoR}}$ hat sich eine große auffällige Senke vor der Küste Ostfrieslands bis zur Elbemündung gebildet. Dabei finden wir die niedrigsten Wasserstände in der Außenems bis zum Dollart, wohin sich zum Teil das ostfriesische Watt entleert, wie südlich von Norderney deutlich wird. Im Jadebusen ist der Wasserstand sehr weit gefallen. Nördlich Spiekeroog erreicht die Senke wiederum sehr niedrige Wasserstände. Der Weser-Elbe-Eider-Bereich zeigt noch ein deutliches Gefälle in Richtung See. Im nordfriesischen Wattenmeer ist ein gleichmäßig starkes seewärtiges Wasserstandsgefälle vorhanden. Vor der Insel Sylt von List-W bis Westerland beträgt das N-S-Gefälle 30 cm, während sich zwischen Westerland und Hörnum

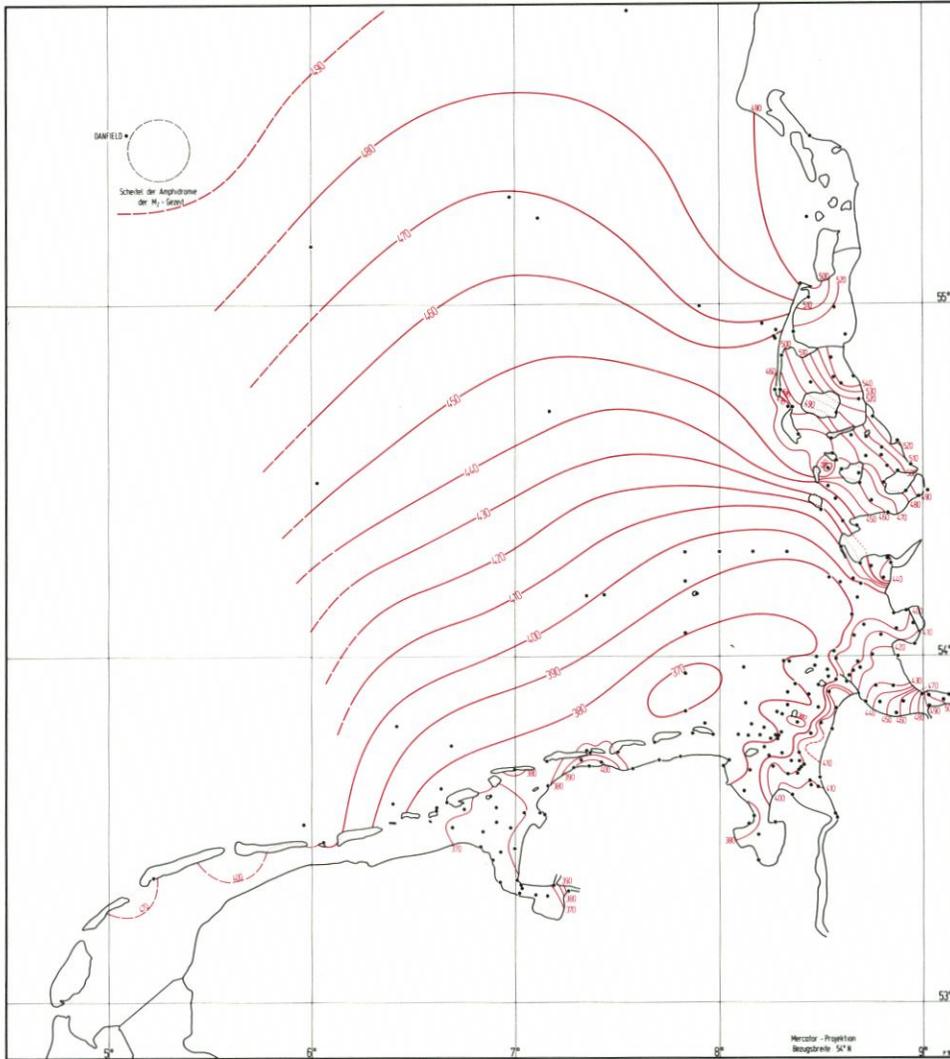


Abb. 12. Linien gleicher Wasserstände z. Zt. T_{nw} am Pegel Borkum-Südstrand um 1980, angegeben in cm NN - 5 m

kein Unterschied in den Wasserständen zeigt. Auf dem freien Meer ist ein fast gleichmäßiges Wasserstandsgefälle von Norden nach Süden bis zur großen Senke vorhanden.

3.3.3.2 Z. Zt. $T_{nw_{Bor}} + 2^h$ (Abb. 13)

In der Deutschen Bucht ist ein sehr gleichmäßiges Gefälle nach Osten zu beobachten. Hinter dem westlichen Teil der Ostfriesischen Inseln und in der Außenems besteht dagegen ein starkes Gefälle nach SSO. Die Reste der Senke z. Zt. $T_{nw_{Bor}}$ sind im Jadebusen (< 300 cm)

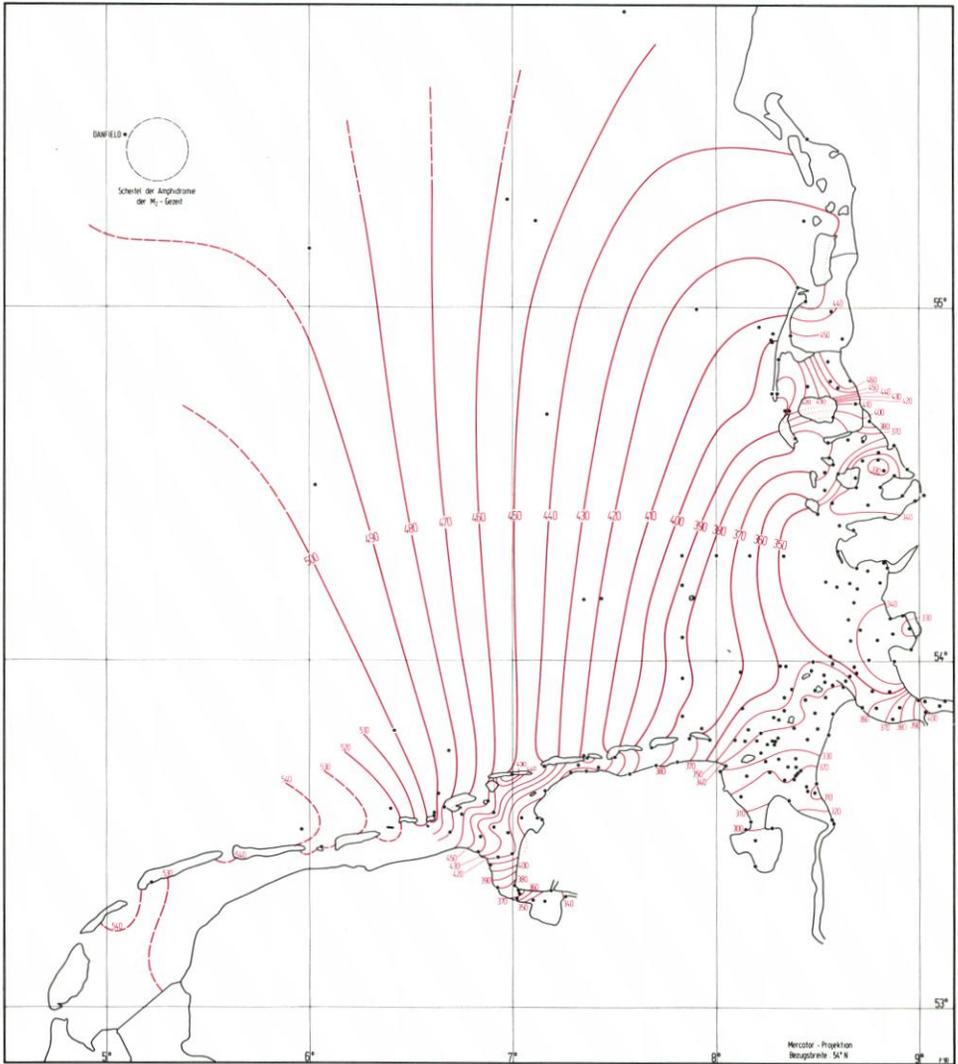


Abb. 13. Linien gleicher Wasserstände z. Zt. Tnw + 2h am Pegel Borkum-Südstrand um 1980, angegeben in cm NN - 5 m

und vor der Dithmarscher Bucht (< 400 cm) auszumachen. Im Bereich südlich Langeneß bis Eiderstedt ergibt sich ein Gefälle in eine Senke östlich Pellworm. Zwischen Langeneß, Sylt und Hindenburgdamm zeigen sich sehr starke Gefälle nach Westen in das Hörnum Tief und nach Süden in die Föhrer Ley. In der Norder Aue herrscht volle Ebbe. Nördlich vom Hindenburgdamm gibt es ein relativ schwaches Gefälle zum Lister Tief. Vor Sylt von Westerland über List-West bis Blavandshuk steigt der Wasserstandsspiegel gleichmäßig an.

3.3.3.3 Z. Zt. $T_{nw_{BOR}} + 4^h$ (Abb. 14)

Zu dieser Zeit wird der Einfluß der Wattbereiche auf den Tideablauf besonders deutlich. Die Reste der Senke um $T_{nw_{BOR}}$ nördlich der Ostfriesischen Inseln finden sich jetzt westlich Römö. Von hier steigen die Wasserstände gleichmäßig um 1,5 m nach SW in Richtung Ameland an. Die höheren Wasserstände dringen von Westen her im tiefen Fahrwasser nördlich der Ostfriesischen Inseln in Richtung Eiderstedt vor. Dabei bilden sich starke Gefälle vor dem Dollart, hinter den Ostfriesischen Inseln, in Jade, Außenweser, über die Watten hinweg bis in die Elbe und weiter zum Dithmarscher Watt. Die Wasserstandshöhen betragen

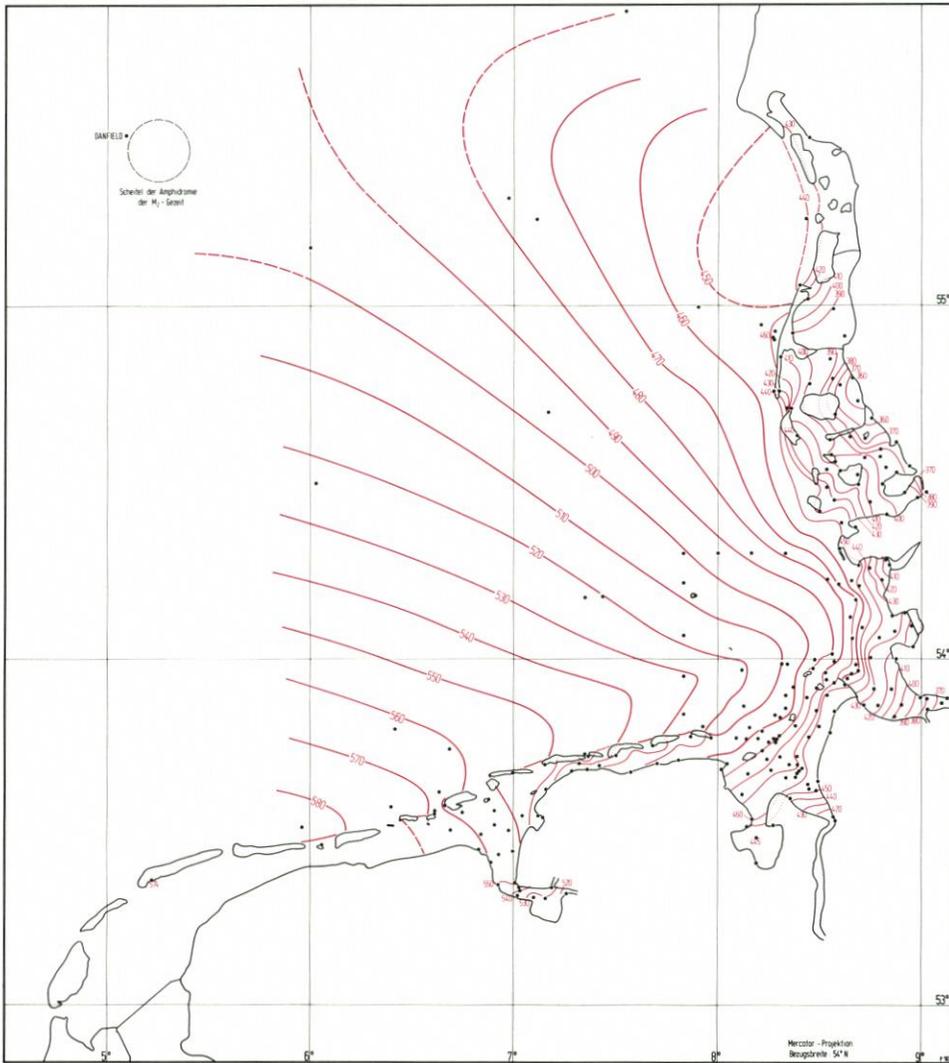


Abb. 14. Linien gleicher Wasserstände z. Zt. $T_{nw} + 4h$ am Pegel Borkum-Südstrand, angegeben in cm NN - 5 m

im Dollart < 530 cm, im Jadebereich < 450 cm, in der Weser < 420 cm, in der Unterelbe < 370 cm und in der Außeneider < 410 cm.

Im nordfriesischen Wattenmeer herrscht starkes Gefälle von West nach Ost. Die niedrigsten Wasserstände treten östlich von Föhr mit < 360 cm auf. Zwischen Hindenburgdamm und Römö werden Wasserstände unter 390 cm gemessen. Westlich Rottumeroog setzt bereits Ebbe ein.

3.3.3.4 Z. Z t. $Th_{w_{Bor}} = 6^h$ nach $Tn_{w_{Bor}}$ (Abb. 15)

Inzwischen hat sich im Gebiet vor Trischen, Scharhörn und Knechtsand eine Zone mit relativ hohen Wasserständen (> 620) gebildet. Von hier fallen die Wasserstände gleichmäßig nach Norden und nach Westen. Die Zone mit Wasserständen > 600 bedeckt dabei das Gebiet südlich der Linie Rotterumeroog–Eiderstedt bis zum Jadebusen sowie Teile des Jade-Weser-Elbe-Ästuars bis zur Außeneider hin. Das Gefälle nach SO in die Ems, Weser, Elbe und Eider ist relativ gering. Im nordfriesischen Wattenmeer, südlich Langeneß, ist ein deutliches Gefälle von Süd nach Nord auszumachen. Um Föhr herum herrschen nach wie vor sehr komplizierte Tideverhältnisse. Nördlich des Hindenburgdamms verläuft das Gefälle von Nord nach Süd.

3.3.3.5 Z. Z t. $Th_{w_{Bor}} + 2^h$ (Abb. 16)

Zu dieser Zeit haben sich die Gefälle total verändert. Die höchsten Wasserstände werden im Jadebusen (> 680 cm), in der Weser (> 660 cm), vor Dithmarschen (> 650 cm) und vor Husum (> 640 cm) gemessen. Von dort fallen die Wasserstände mit langsam flacher werdendem Gefälle nach WNW. Der stärkste Wasserstandsanstieg von 530 cm auf 630 cm befindet sich in der Außenems. Insgesamt herrscht ein ruhiges Bild.

3.3.3.6 Z. Z t. $Th_{w_{Bor}} + 4^h$ (Abb. 17)

Vier Stunden nach $Th_{w_{Bor}}$ ist bereits die Bildung der Senke zu erkennen, die um $Tn_{w_{Bor}}$ in der inneren Deutschen Bucht vorhanden ist. Westlich von Rottumeroog liegen die Wasserstände bereits unter 400 cm, während im Dollart noch ~ 530 cm, in Jade, Weser und Elbe noch > 600 cm und im östlichen nordfriesischen Watt noch > 630 cm gemessen werden. Aus der genannten Senke steigt der Wasserstand nach NO und O vor den Watten gleichmäßig an. Im gesamten Wattgebiet bis zum Hindenburgdamm ist ein gleichmäßig ausgeprägtes starkes Gefälle nach See festzustellen.

Die Kombination von Küstenpegel- und Hochseepegeldaten hat die Tidephasendarstellungen um 1980 gegenüber denen von 1975/79 in jeder Hinsicht positiv beeinflusst. So werden die damaligen unvollständigen Phasenabbildungen von mittleren Tideverhältnissen und Tideabläufen in der freien Nordsee jetzt durch näherungsweise auf NN bezogene Gezeitenlinien dokumentiert. Damit ist erstmals eine Betrachtungsweise mittlerer Tidebewegungen vom Zentrum der M_2 -Amphidromie bis zur Küste im metrischen Maßsystem gegeben.

Im freien Meer war das Gezeitenbild 1975/79 insofern unvollständig und ungenau, weil bis zu diesem Zeitpunkt noch keine Hochseepegeldaten des DHI vorlagen, und ein damaliger Gedankenfehler führte bei der Ableitung des Helgoländer PN zu einer fehlerhaften Höhe (8 cm Differenz gegenüber dem jetzigen Ansatz; vgl. dazu LASSEN, 1989, S. 84).

Im Küstenbereich hat sich die Darstellung der Gezeitenverhältnisse um 1980 aufgrund

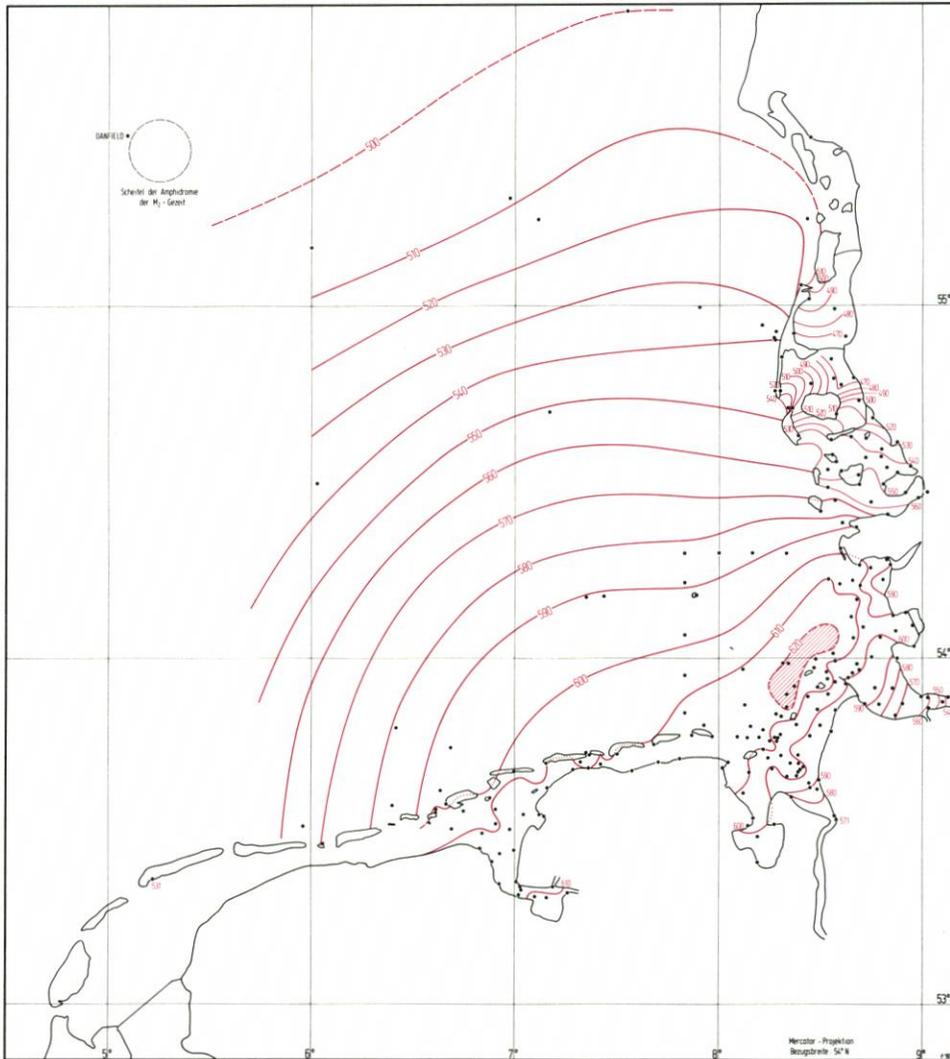


Abb. 15. Linien gleicher Wasserstände z. Zt. Thw (= Tnw + 6h) am Pegel Borkum-Südstrand, angegeben in NN - 5 m

der großen Anzahl von Doppelmessungen und ergänzenden Pegeldata zu 1975/79 stabilisiert. Grundsätzlich sind sich hier die Gezeitenabbildungen aus beiden Berichtszeiträumen ähnlich.

Die Genauigkeit der interpretierten großräumigen Gezeitenanalyse um 1980 innerhalb der südöstlichen Nordsee ist im wesentlichen von der Art der Registrierung hydrologischer Meßwerte sowie von der Sorgfalt bei der Aufbereitung der Pegeldatakollektive abhängig. Von ausschlaggebender Bedeutung ist aber die Zuverlässigkeit der PN-Höhen.

Nur allzu oft werden Anomalien in Meßdaten und berechneten Gezeitenparametern als Phänomene gedeutet, die in Wirklichkeit aber nur Meß- oder Auswertungenauigkeiten sind.

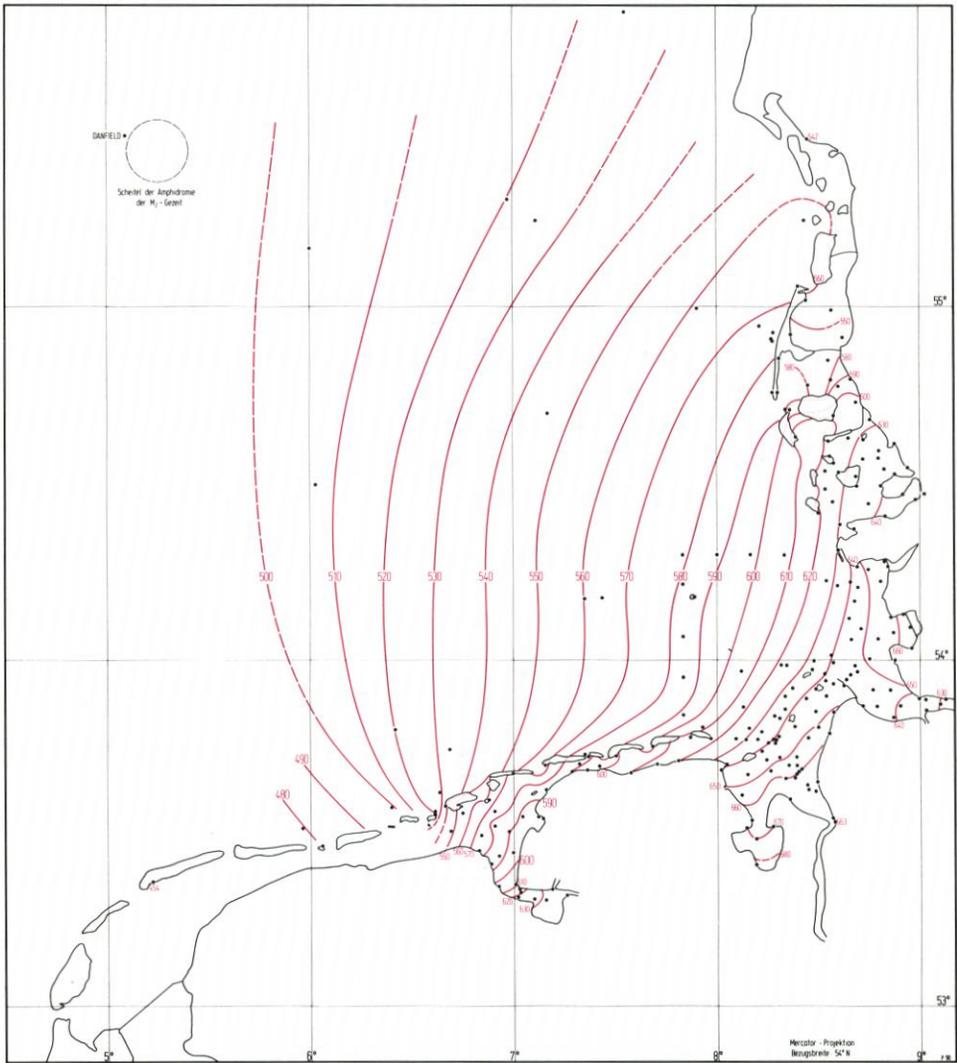


Abb. 16. Linien gleicher Wasserstände z. Zt. Thw + 2h am Pegel Borkum-Südstrand, angegeben in cm NN - 5 m

So ist es auch bei einigen Pegeln im nordfriesischen Wattenmeer und im Wattbereich der Außenweser geschehen: Durch Ungenauigkeiten im PN-Höhenanschluß waren bei diesen Pegeln deren örtliche Tidephasenwerte verfälscht wiedergegeben und führten daher anfänglich zu völlig anderen Bildern im Tideablauf. Diese Unklarheiten konnten unter Einbeziehung des örtlichen MTmw als zeitliche Bezugsebene beseitigt werden. Mit Hilfe dieses indirekten Vergleichsverfahrens wurden signifikante Fehllagen der PN-Höhen von 1 bis 2,5 dm nachgewiesen. Die Wirkung der im örtlichen Bereich um das Maß der jeweiligen PN-Höhenverbesserung bereinigten Formlinien von Tidephasendarstellungen zeigte sich dann später in den harmonischen Gezeitenbildern.

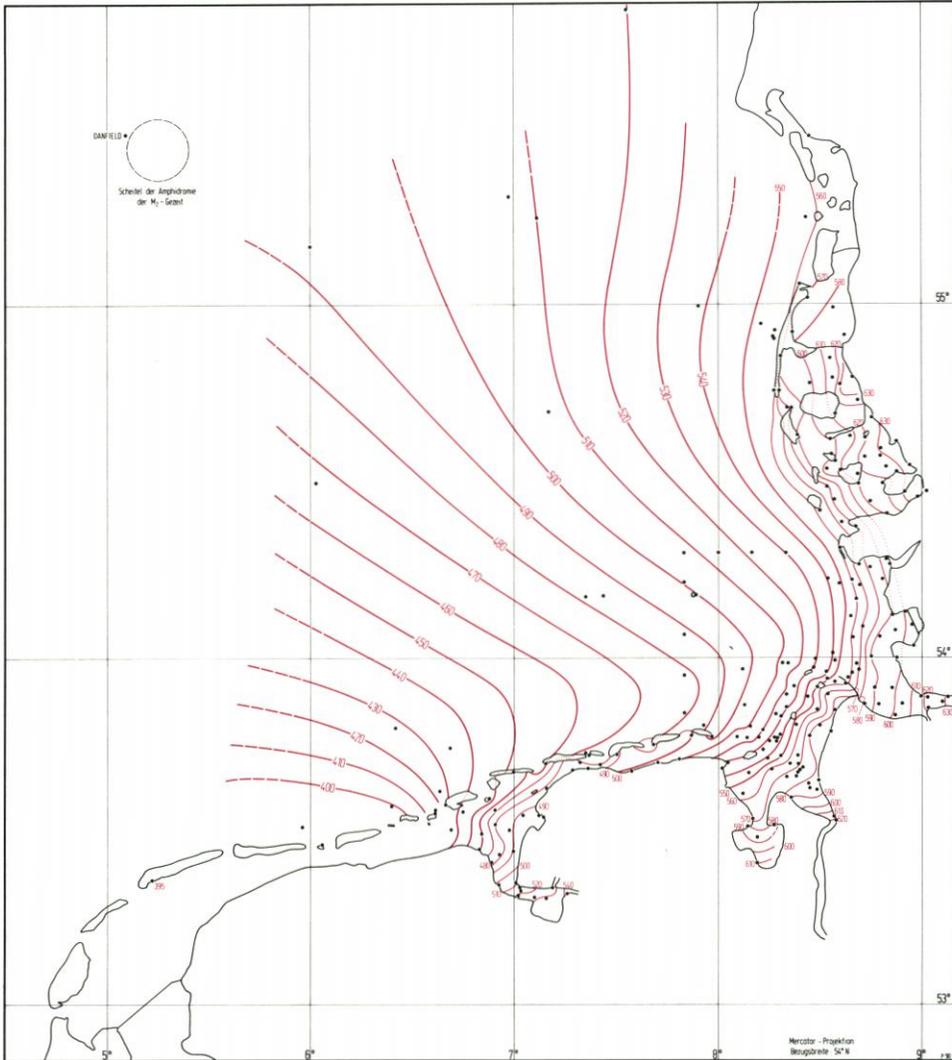


Abb. 17. Linien gleicher Wasserstände z. Zt. Thw + 4h am Pegel Borkum-Südstrand, angegeben in cm NN - 5 m

3.4 Zum großflächigen säkularen Trend

Im Bereich der südöstlichen Deutschen Bucht ist die Analyse eines plausiblen Säkular-trends heute immer noch problematisch, weil verschiedene Einflüsse auf die Tideabläufe teilweise örtlich vielschichtig verknüpft sind und daher mit der jeweiligen Ausrichtung des Küstenverlaufes Nord- und Ostfrieslands entsprechende Unterschiede in ermittelten Trend-aussagen je nach Pegelort erbringen. Eine für die Bestimmung eines MSL-Trends besser geeignete Approximation ist dessen Abschätzung aus großflächigen Veränderungen mittlerer Gezeitendarstellungen im Seebereich. Konkrete Kenntnisse darüber, ob sich aus abweichenden

den Gezeitendarstellungen im seewärtigen Bereich Trendaussagen analysieren lassen, gibt es bisher nicht. Daher wird erstmals der Versuch unternommen, aus Gegenüberstellungen und Bewertungen der Gezeitenabbildungen von MÖLLER (1930), diesem Bericht (um 1980) und dem DHI (1986), deren kartographische Gezeitenbearbeitungen ausschließlich auf beobachteten Tidedaten beruhen, diese auflösende Kartenanalysemethode anzuwenden.

Die Trendschätzung wird natürlich um so brauchbarer, je besser das Datenmaterial von Umfang und Genauigkeit her die wahren Tideverhältnisse im gesamten Untersuchungsgebiet für die jeweilige Auswertung repräsentiert. Im Seegebiet der Nordsee liegt die Problematik bei Verfolgung säkularer Änderungsprozesse in der Bereichsgröße, weil es hier schwierig wird, die erforderlichen Tidebeobachtungen in der nötigen Dichte mit ausreichender Genauigkeit für die abschließende kartographische Darstellung der Thw- und Tnw-Zeitdifferenzlinien und Wasserstandslinien durchzuführen.

MÖLLER hat vorwiegend Gezeitenbeobachtungen in der Deutschen Bucht und in den küstennahen Wattgebieten, hauptsächlich aus dem Zeitraum 1920 bis 1930, aber auch älteres Datenmaterial, zu einer umfassenden Arbeitshypothese zusammengefaßt. Auf der Grundlage von ca. 235 heterogenen und verstreut liegenden Pegel- und Lotpositionen (ohne Flüsse) hat MÖLLER deren Meßdaten für die Erstellung der Gezeitenkarten unter teilweiser Berücksichtigung der Meeresbodentopographie aufbereitet. In ihrer Schlußbetrachtung bemerkt sie, daß die Ergebnisse wegen der unterschiedlichen Datenqualität nur mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten sind, wenn sie auch im allgemeinen das Richtige treffen.

Die vorliegende Arbeit interpretiert die Gezeitenverhältnisse im Küsten- und seewärtigen Bereich der südöstlichen Nordsee mit einer abschließenden Gesamtdarstellung der Tideentwicklung aus zusammengefaßten Küsten- und Hochseepegeldaten von 1975 bis 1986, wobei die Anzahl und die räumliche Verteilung der Hochseepegelstationen für die letzten Feinheiten der Flutstundenlinien in seewärtiger Ausdehnung noch nicht ausreichend sind und daher nur einen detaillierten Eindruck vermitteln können.

Das DHI berücksichtigt bisher im freien Seegebiet der Nordsee nur übergreifende jährliche Pegelanalysen von 120 Küstenorten als Basis für den Ansatz rechnergestützter Gezeitendarstellungen. Bei Einbeziehung von Gezeitenwerten aus dem Seebereich in diese Analyse ist es durchaus möglich, daß die vorliegenden Gezeitenabbildungen eine nachweisbare Formveränderung erfahren.

Linien gleicher mittlerer Hoch- und Niedrigwasser-Eintrittszeiten umkreisen das südliche Zentrum der M_2 -Gezeit in der Deutschen Bucht. Damit erlangt die Position des Zentrums für die Linienkonfiguration eine gewisse Bedeutung. Für das Zentrum der M_2 -Gezeit liegen jedoch verschiedene abweichende geographische Koordinaten vor (Tab. unter Kap. 3.3.1), so daß hier ableitbare Aussagen zu Formveränderungen von Gezeitendarstellungen bis zu einer gewissen Entfernung vom Zentrum nur unter Berücksichtigung der jeweiligen Zentrumsposition zu erwarten sind. Die genannten kartographischen Gezeitendarstellungen sind abgestützt auf die in o. g. Tabelle angegebenen Koordinaten für das Zentrum der M_2 -Gezeit, wobei die in diesem Bericht mit denen des DHI identisch sind.

Gegenüberstellungen der kartographischen Gezeitendarstellungen:

Flutstundenlinien:

Bei MÖLLER und dem DHI sind die Linien gleicher mittlerer Hochwasserzeitunterschiede auf den Durchgang des Mondes durch den Nullmeridian bezogen, während dieser Bericht seine

mittleren Thw-Eintrittszeiten auf Borkum bezieht. Ein Vergleich beider Darstellungsweisen ist möglich, weil für einige Orte beide Zeiten bekannt sind, um die zeitlichen Abweichungen zwischen den Abbildungssystemen zu bestimmen. So werden die Zeitlinien $0^h 20^m$ und $1^h 20^m$ dieser Arbeit mit der 10^h - bzw. 11^h -Linie von MÖLLER und dem DHI gegenübergestellt und durch den unmittelbaren Linienvergleich simplifiziert interpretiert. In Abb. 18 wird deutlich, daß die Flutstundenlinie $0^h 20^m$ mit den 10^h -Linien stark divergiert und auch keine Ähnlichkeit im abgebildeten Linienverlauf gegeben ist. Die 11^h -Linien passen dagegen wesentlich besser zusammen und auch zur $1^h 20^m$ -Linie.

Die Ergebnisse dieser Formveränderungsanalyse weisen eher auf teilweise unzureichende Tideeffassung als auf Trends hin.

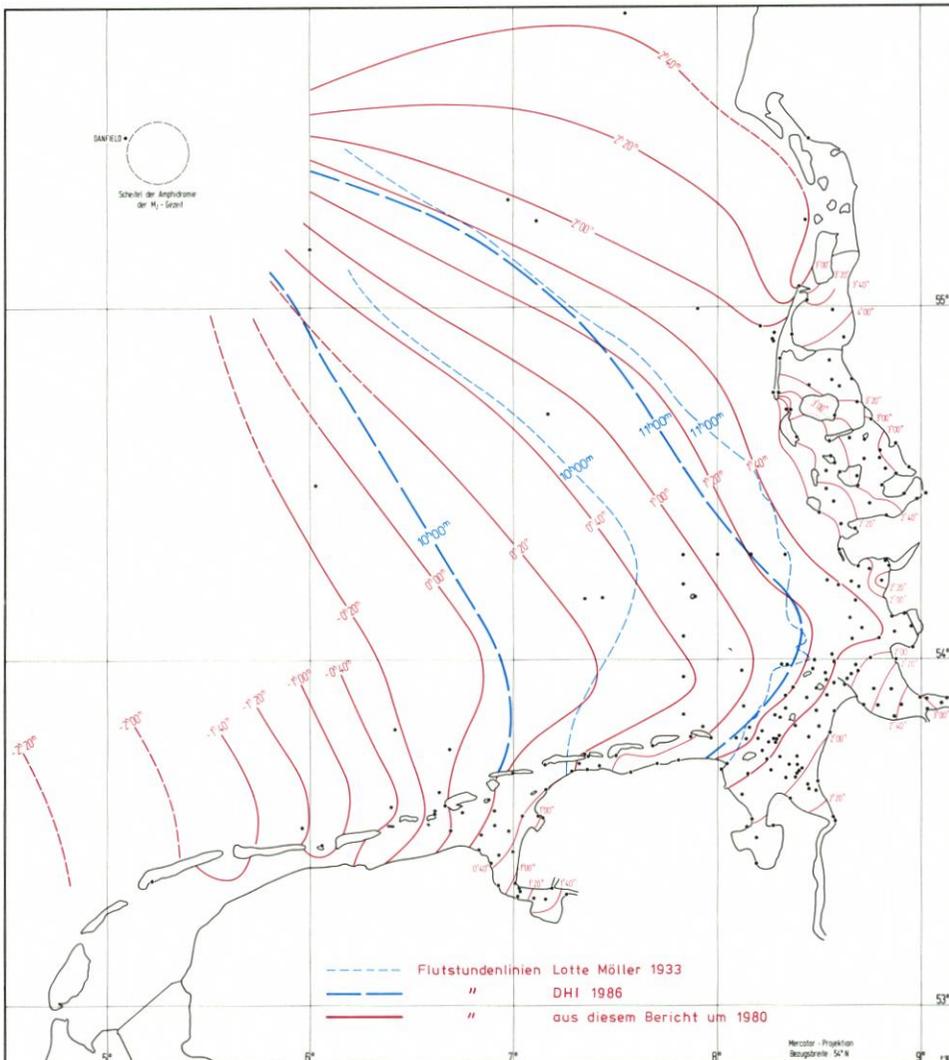


Abb. 18. Vergleich der Linien gleicher Thw-Eintrittszeiten bei Möller (1933), DHI (1986) mit Abb. 7 (um 1980)

Mittlerer Tidehub:

Erstaunlich gut stimmen in der äußeren Deutschen Bucht MÖLLER's MThb-Linien mit denen dieses Berichtes überein (Abb. 19). Im Bereich Jade- bis Elbemündung scheint ein Trend zu höheren MThb erkennbar, wie er sich auch aus Einzelpegel-Analysen darstellt.

Letztlich kann festgestellt werden, daß die Bestimmung eines großflächigen säkularen Trends aufgrund der vorliegenden kartographischen Gezeitendarstellung nicht zu einem quantifizierten Erfolg geführt hat. Bei den Darstellungen langfristiger Veränderungen ist es erforderlich, nachzuweisen, daß die Veränderung auch tatsächlich erfolgt oder nicht erfolgt ist. Für diesen Nachweis reichen die Güte des vorliegenden Datenmaterials und die Anordnung der Meßpositionen nicht aus. Verbesserte Informationen über den seewärtigen Tideab-

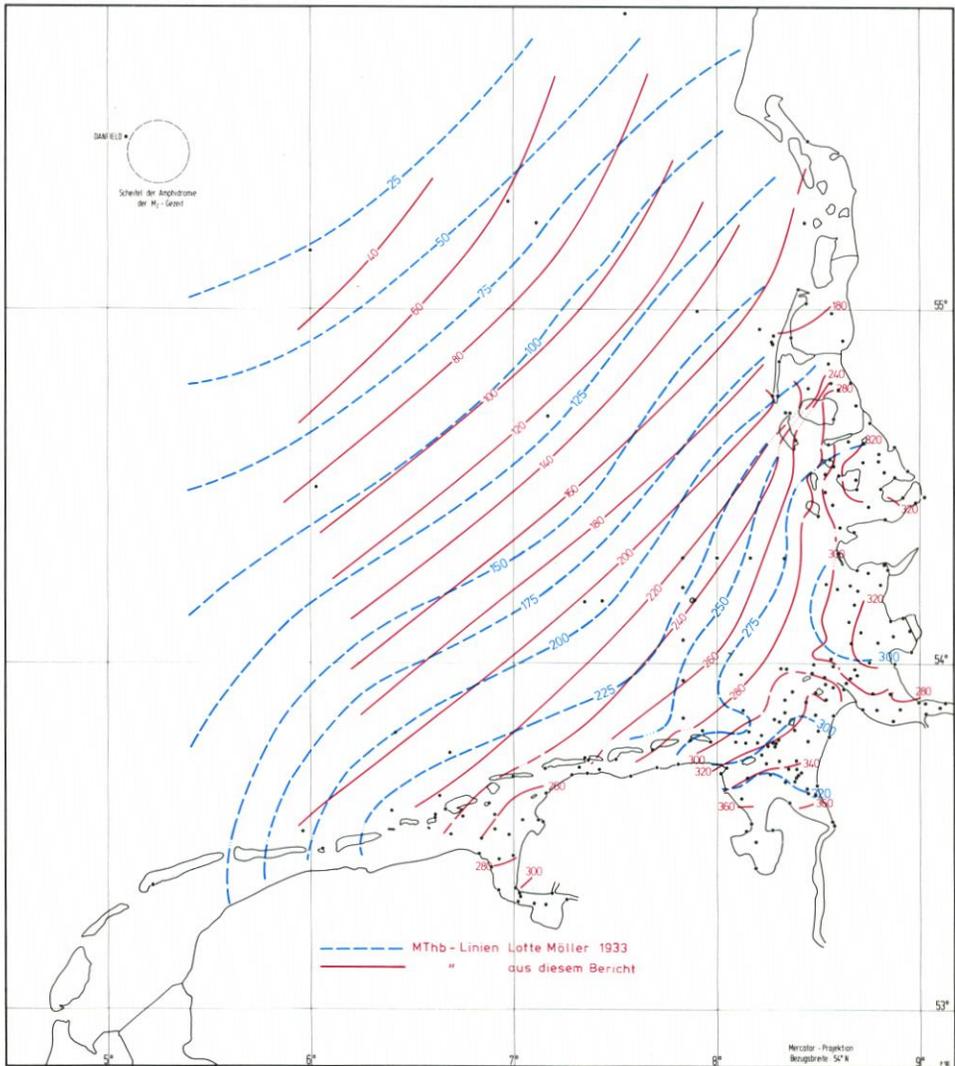


Abb. 19. Vergleich der MThb-Linien bei Möller (1933) mit Abb. 6 (um 1980)

lauf mit der notwendigerweise zu steigenden Datenqualität können die Gezeitendarstellungen zur Feststellung von ev. Tideveränderungen entscheidend ergänzen, wobei die Gezeitenabbildungen dieses Berichtes durchaus als Grundlage für spätere kartentgetreue Interpretation dienen können.

3.5 Weitere Hinweise

- a) Mittlere Tidekurven geben einen ersten Eindruck von örtlichen mittleren Tideverhältnissen und -veränderungen eines Pegelortes im betrachteten Zeitraum wieder. Besonders in der Küstenzone sind im Kurvenverlauf charakteristische Unregelmäßigkeiten enthalten, deren Ursache in der hier nicht mehr vorwiegend amphidromisch beeinflussten Tide liegt. Zu diesen Merkmalen zählen u. a. Füllvorgänge großer Wattflächen aus den Prielsystemen, die sich hier im unterschiedlichen Anstieg des Wasserspiegels in der Tidekurve andeuten, weil den Prielen zu diesem Zeitpunkt sehr viel Wasser entzogen wird. Auch Ungleichheiten in der Strömungsgeschwindigkeit an gegenüberliegenden Begrenzungen großer Ströme bewirken über die Strombreite abweichende Tidedarstellungen. Ebenso sind nach Baumaßnahmen im Küstenvorfeld örtliche Veränderungen im Gezeitenablauf zu erwarten. Als Beispiel sei der Bau des Hindenburgdammes genannt. Die Analyse der Tideverhältnisse von Pegel Hörnum Hafen und Osterley ergibt von 1918/19 – also die Zeit vor dem Dammbau – bis 1982/86 eine Zunahme des Abstandes MThw-MTmw um 15 bis 30 %, im Tidehub um 12 % für Hörnum Hafen und 25 % für die Osterley. Die Flutdauer nimmt an beiden Orten um 40 Min. zu, damit verkürzt sich die Ebbedauer um 40 Min.
- b) Aus den ca. 400 Tideanalysen im Untersuchungsgebiet geht eindeutig hervor, daß die Ganglinien der Tidekurven von Ort zu Ort voneinander abweichen, aber kaum über kürzere Zeiträume am selben Ort. So lassen sich nur vereinzelt Unterschiede zwischen den mittleren Tidekurven der einzelnen Pegelstationen von 1975/79 und 1982/86 nachweisen. Auch die zeitlich differierenden örtlichen MTmw-Höhen haben keine wesentliche Auswirkung auf den k-Wert, der das Verhältnis $(MThw-MTmw)/MThb$ darstellt. Selbst über lange Zeiträume, wo sich MThb verändern kann, bleibt k konstant (LASSEN, 1989). Mit dem Bezugswert MTmw und dem Faktor k aus der vorgegebenen Geometrie einer mittleren Tidekurve sind die besseren Parameter zur Bestimmung eines säkularen Meeresspiegelanstieges gegenüber MThw und MTnw gegeben. Bei zukünftigen Trendanalysen sollten daher MTmw und k mit in die Ausgleichsrechnung eingeführt werden, um eine bessere Aussagesignifikanz der Trendrichtung zu ermöglichen.
- c) In der vorliegenden Arbeit werden die Gezeitenverhältnisse in der südöstlichen Nordsee durch Wasserstandsdaten von Hochseepegeln aus dem Bereich des amphidromischen Zentrums der M_2 -Gezeit bis in die Küstenregion anschaulich beschrieben. Damit werden auch erstmals die Verhältnisse beim natürlichen Zusammenwirken aller Partialtiden mit jeweils unterschiedlichen Amphidromien im Bereich der M_2 -Amphidromie durch Wasserstände eines Pegels im Danfeld (ca. 10 km westlich des rechnerisch festgelegten Scheitels der M_2 -Amphidromie) und den Hochseepegelstationen 78408 und 79410 (ca. 60 km südöstlich dieses Ortes) annähernd beschrieben. Im Danfeld beträgt die Schwankungsbreite im täglichen Wechsel von hohen und niedrigen mittleren Wasserständen bis zu 2,5 dm. Es dürfte hier keine Differenzen geben, wenn es ein Zentrum einer gemeinsamen Amphidromie gäbe, wo sich die Höhenlage des Meeresspiegels nicht veränderte. Weiter südlich bei den Stationen 78408 und 79410 zeigt sich schon ein kleiner Thb von etwa 30 cm. Aufgrund der geometrischen Lage der mittleren Linien gleicher Hochwasserzeit-

und Niedrigwasser-Zeitunterschiede zum Zentrum ist es in diesem Gebiet schwierig, T_F , T_E und vernünftige Eintrittszeitdifferenzen abzuleiten. Aus dem dargelegten Grund konnten die genannten Werte für die beiden Hochseepegelstationen vergleichsweise nur sehr ungenau ermittelt werden.

Das amphidromische Zentrum der M_2 -Gezeit liegt näherungsweise auf der Niveaulfläche des Geoids. Von hier steigt der Wasserstand durch den Buchteneffekt bis zum Küstenvorfeld an und wird weiter durch dortige Topographie beeinflusst.

- d) Um die vorhandenen Wasserstände des Pegels Helgoland für Analysen vollständig zu nutzen, ist es wichtig, festzustellen, ob sich der Abstand der dortigen Festpunkte zum Geoid von 1916 bis 1986 durch Hebungen des Salzstockes, Standortwechsel des Pegels und Nachkriegsereignisse (Bombenabwürfe und Sprengungen) wesentlich verändert hat.

Bei der Herausbildung von Salzstöcken handelt es sich um einen Fließvorgang im festplastischen Zustand. Die dadurch bedingte Hebung der Erdoberfläche erfolgt sehr langsam. Deren Größenordnung ist meßbar klein und dürfte Werte von 2 bis 4 cm/Jh nicht überschreiten (nach LINKE aus LASSEN, 1989). Diese Bewegungsraten haben also kaum Einfluß auf die Höhenlage der Festpunkte.

Auch Vergleiche der auf die Helgoländer Festpunkte bezogenen MTmw-Höhen mit den dazugehörigen k-Werten ergeben für die o. g. Zeitreihe in den Extremwerten nur geringe Differenzen um 1 bzw. 2 %.

Es ist daher zu vermuten, daß sich das Helgoländer Pegelnull – bezogen auf die vor 1945 vorhandenen und nach 1952 weiterbenutzten Höhenfestpunkte – nicht geändert hat.

- e) Bei der Entwicklung der Zeitlinien Thw, Tnw und der Isohypsen zeigte es sich, daß die Linienstrukturen vor der Küste der Insel Sylt (Westerland) einen unruhigen Verlauf nehmen und ihre Richtung teilweise senkrecht zum Küstenverlauf ändern. Warum das so ist, kann im Moment noch nicht beantwortet werden.

4. Auswahl von Säkularpegeln

Die Erfahrung hat gezeigt, daß heute nicht mehr derart viele Pegeldata in Abhängigkeit von Natureinflüssen bei der Verfolgung von Tidebewegungen bearbeitet werden können. In Tab. 5 wird daher der Versuch unternommen, einige Pegel nach den dort vorgegebenen Kriterien auszuwählen, um aus deren Daten resultierende Veränderungen in Gezeitenabläufen sowie in dem Säkulartrend zu erfassen.

Bezogen auf die Ausdehnung der Nordseeküste muß man feststellen, daß alle Pegel, deren Daten zur Ableitung eines Säkulartrends dienen, diesem Ziel nicht genügen. Es wird daher vorgeschlagen, die Daten der unter Spalte „Auswahl“ mit x versehenen Pegelorte zukünftig zur Ermittlung des Säkulartrends für die Deutsche Bucht zu verwenden. Die Pegelstandorte sind der Küste vorgelagert, so daß hier die küstenspezifischen Wirkungen auf den Wasserstand nicht mehr so stark hervortreten. Zusätzlich zu diesen Standorten sollte noch eine neue Pegelstation vor Eiderstedt eingerichtet werden. Siehe dazu Abb. 20.

Tabelle 5. Auswahl Säkularpegel

- 1 – Lage
 2 – Dauer der Aufzeichnungen
 3 – Sicherheit des Höhenanschl. (ohne Berücksichtigung möglicher Küstensenkung)

Pegel	1	2	3	Wertung	Auswahl*)
Helgoland	+	-	(+)	+	+
Borkum	-	-	+		+
Norderney	-	+	-		
Wilhelmshaven	-	(+)	+	+	
Bremerhaven	-	-	+		
LT Alte Weser	+	-	+	+	+
Cuxhaven	-	+	+	+	
LT Vogelsand	+	-	+	+	+
Büsum	-	-	+		
Husum	-	+	+	+	
Wittdün	-	-	-		
Westerland	+	-	-		+

* Stationen, an denen man in Zukunft den „reinen“ Säkulartrend näherungsweise erfassen kann

5. Hinweise auf weitere Unterlagen, die den Verwaltungen zur Verfügung stehen

Die Ergebnisse der umfangreichen Bearbeitung von Wasserständen im Bereich der südöstlichen Deutschen Bucht sind sowohl in mittleren Tidekurven als auch in den dazugehörigen „Spiegeln“ festgehalten. Diese Unterlagen stehen allen interessierenden Dienststellen zur Verfügung.

Die mittlere Tidekurve eines Pegelortes ist im Format DIN A3 und DIN A4 abgebildet und enthält die Höhe des mittleren Tidemittelwassers.

Die Spiegel der Pegel enthalten u. a. Hinweise für: das fünfjährige MThw- bzw. MTnw-Mittel (wichtig für Pegel mit kurzer Aufzeichnungsdauer), die Regressionsbeziehung zwischen Bezugs- und Anschlußpegel, Tideeintrittszeiten vor bzw. nach Tideeintritt am Bezugspegel, die Flut- und Ebbdauer, die Höhe des mittleren Tidemittelwassers, die Höhe des mittleren Tidehalbwassers und den Faktor k .

Abschließend ist noch eine Pegelbibliographie vorgesehen mit Kommentaren zu:

- Standort(e)
- Aufzeichnungsart und -güte hinsichtlich Höhe und Zeit (Standortabweichungen, astron. Einflüsse)
- Aufzeichnungsdauer (auch historisch); Hinweise
- Übertragbarkeit der Daten auf den Zeitraum „um 1980“, sofern nur Aufzeichnungen vor 1980 vorliegen
- Veränderungen mittl. Tidekurven aus verschiedenen Zeiträumen
- vorliegenden Beziehungsgleichungen zwischen Bezugs- und Anschlußpegel unter Einbeziehung des mittleren Tidemittelwassers; so läßt sich für die Höhenableitung des betr. Pegelnullpunktes – besonders wichtig bei Saisonpegel – eine Signifikanz der Höhenwerte angeben. Damit sind auch Rückschlüsse auf die Höhenstabilität von Festpunkten möglich
- zu Hochseepegelstationen einschl. Forschungsplattform.

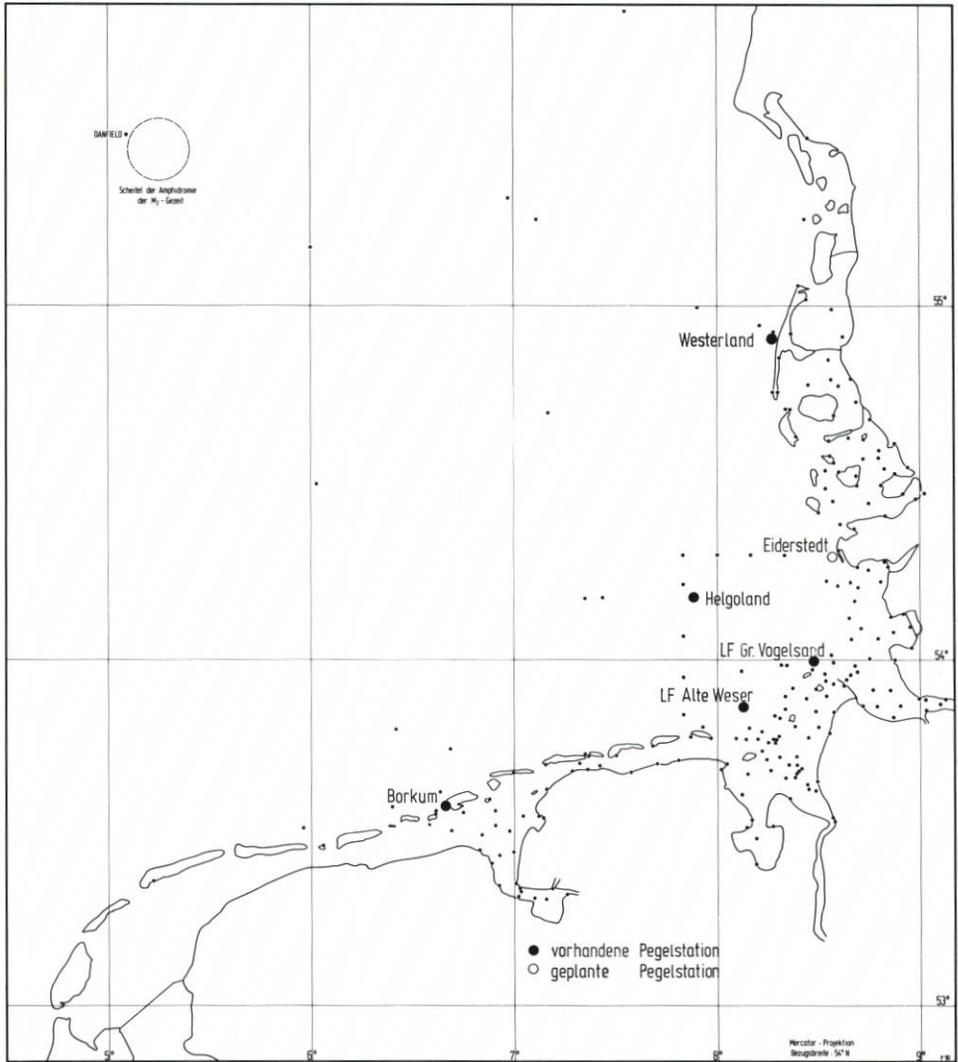


Abb. 20. Standorte der vorgeschlagenen Säkularpegel

6. Schriftenverzeichnis

- A. d. V.: Wiederholung des deutschen Nordseeküstennivellements in den Jahren 1949 bis 1955 (1959 und Vergleich mit der ersten Messung in den Jahren 1928 bis 1931 [1937]). Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland. Hannover, 1960.
- DIETRICH, G.: Ozeanographisch-meteorologische Einflüsse auf Wasserstandsänderungen des Meeres am Beispiel der Pegelbeobachtungen von Esbjerg. DHZ 1952.
- GÖHREN, H.: Tidewasserstände und Windstau im Elbmündungsgebiet. Hamburger Küstenforschung, H. 3, 1968.

- HANSEN, W.: Theorie zur Errechnung des Wasserstandes und der Strömungen in Randmeeren nebst Anwendungen. Tellus, Nr. 3, 1956.
- JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Instituts, H. 83, 1984.
- LASSEN, H.: Säkularer Meeresspiegelanstieg und tektonische Senkungsvorgänge an der Nordseeküste. Vermessungsw. und Raumordnung, H. 2, 1984.
- LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. Die Küste, H. 50, 1989.
- MÖLLER, L.: Das Tidegebiet der Deutschen Bucht. Geographisch-naturwissenschaftliche Reihe, H. 23, März, 1933.
- LEONHARD, T.: Zur Berechnung von Höhenänderungen in Norddeutschland. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Uni Hannover, Dissertation, 1980.
- SIEFERT, W.: Zur Meßgenauigkeit der Pegelaufzeichnungen in der Außenelbe. Hamburger Küstenforschung, H. 13, 1970.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelbewertungen. Die Küste, H. 42, 1985.
- STEWART et al.: Relative sea-level change: a critical evaluation. Unesco reports in marine science. Paris, 1990.
- WIESE, H.-W.: Messungen der Wasserstände in der Deutschen Bucht während DEBEX '81. Erste Ergebnisse mit neuen Hochseepegeln. Intermaritec, 1982.