Die Küste, 58 (1996), 109-160

Tideablauf und Meeresspiegel im Bereich der südöstlichen Nordsee-Amphidromien

Von Horst Lassen und Winfried Siefert

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der Tideablauf für den seewärtigen Bereich der südöstlichen Nordsee vorgestellt, wie er sich durch die Auswertung der Gezeitenaufzeichnungen von 55 Hochseepegeln und 12 Schreibpegeln zeigt. Im Mittelpunkt der Berechnungen steht der mittlere Meeresspiegel als Referenzfläche für höhenabhängige Gezeitenparameter. Die Tidephasen werden durch Zeitdifferenzen zum Bezugspegel Helgoland angegeben. In der anschließenden Interpretation werden verschiedene Gezeitenparameter in flächendeckenden kartographischen Abbildungen bis zum Sockel des Küstenvorfeldes dargestellt.

In Verbindung mit der NN-Höhenbestimmung der Pegel Helgoland und Forschungsplattform Nordsee (Institut für Erdmessung der Universität Hannover) wird anhand der Wasserstände beider Pegel der Versuch unternommen, erstmals auf dieser Basis die Anpassung des relativen Meeresniveaus an das Geoid im freien Seegebiet abzuschätzen.

Summary

The tidal dynamics in the North Sea are characterized by amphidronic points of the M_2 and S_2 tides in the southeastern part. Prototype data from 67 stations off the German coast were analyzed in order to identify the real tidal behaviour in this area. The main gage is on the rock island Helgoland. The figures of this article show the variances of different tide parameters.

The second aim of the analysis was to fix the mean sea level in this offshore area relative to the geoid.

Inhalt

1. Einleitung 110
2. Verfahrensablauf 110
   2.1 Allgemeines 110
   2.2 Hochseepegel 112
   2.3 Bezugspegel Helgoland 115
   2.4 Genauigkeitsabschätzung 115
3. Mittlere Tidekurve und mittlerer Meeresspiegel 116
   3.1 Mitttlere Tidekurve 116
   3.2 Mittlerer Meeresspiegel 117
   3.3 Beispiel 126
4. Ergebnisse 128
   4.1 Allgemeines 128
   4.2 Amphidromien der Partialtiden 128
   4.3 Knotenbereich der natürlichen Tide 130
   4.4 Mittlere Tidehöhen und -eintrittszeiten 132
   4.5 Mittlere Verhältnisse von Steig- und Falldauern 138
5. Ausblick 140
6. Danksagung 142
7. Schriftenverzeichnis 143

Anhang
A. Stationsverzeichnis 144
B. Tidedaten 147
C. Mittlere Gezeitenparameter 149
D. Partialtiden M 2, S 2, K 1, O 1, M 4 151

Die Küste, 58 (1996), 109-160

1. Einleitung

Im Küstenbereich der südöstlichen Nordsee ist der Tideablauf durch die teilweise sehr umfangreichen Datenkollektive der Küstenpegel bekannt (LASSEN u. SIEFERT, 1991). Dagegen beziehen sich die in den Gezeitentafeln des Bundesamtes für Seeschiffahrt und Hydrographie (BSH) veröffentlichten kartographischen Darstellungen zum Gezeitenablauf in der Nordsee auf internationale Zusammenarbeit der Nordseeanrainerstaaten unter Verwendung vorhandener Gezeitenbeobachtungen aus unterschiedlichen Zeiträumen bis etwa 1975. Die Lösungsansätze zur Gezeitenbestimmung beruhen essentiell auf Ergebnissen, die auf der Grundlage von Tide- und Gezeitenstrommessungen im Küsten- und Seebereich, der Gestalt der Nordsee, der Meeresbodentopographie und den Randwerten im Atlantik erstellt worden sind. Die letzte Überarbeitung der Gezeitendarstellung erfolgte 1984 und wird in dieser Arbeit mit Gezeit 84 bezeichnet. Die Lokalisierung der geographischen Lage des Knotenbereiches der Amphidromie erfolgte aus dem maßgebenden entwickelten Verlauf von Linien gleicher mittlerer Hoch- und Niedrigwasserzeitunterschiede gegen den Durchgang des Mondes durch den Meridian von Greenwich und aus Ergebnissen von Rechenmodellen. Wegen fehlenden Datenmaterials hat eine Überprüfung dieses lokalisierten Bereiches nicht stattgefunden. Sie ist jedoch im Hinblick auf die Akzeptanz der vorliegenden Gezeitendarstellungen von großer Bedeutung. Ein solcher Zuverlässigkeitennachweis ist nur mit beobachteten Tidedaten aufwendiger Hochseepegelmessungen unter Einbeziehung des mittleren Meeresspiegels (MSL) zu erbringen.

Daß vorliegende Ergebnisse von Hochseepegelkampagnen ab 1976 bisher noch nicht zur großräumigen Gezeitenbetrachtung herangezogen worden sind, mag auf den ersten Blick überraschen und kann nur mit der vorherrschenden Meinung erklärt werden, daß das vorgegebene Ziel wegen der angeblichen Ungenauigkeit von Hochseepegelmessungen kaum zu verbessern ist. Zu einer präzisen großräumigen Erfassung von Meeresspiegeländerungen sind Hochseepegeldaten aus dem Tiefwasserbereich allerdings eine Voraussetzung. Bisher vorliegende Darstellungen zum Gezeitenablauf im freien Meer reichen für eine MSL-Analyse nicht aus, es sei denn, sie werden durch weitere Hochseepegelmessungen mit der nötigen Detailauflösung aktualisiert. Auf Veranlassung des BSH ist daher 1988 und 1992 mit Hochseepegelmessungen auf einer Linie angenommener gleicher Amplitude und einer Linie angenommener gleicher Phase die Kenntnis erweitert worden, um mit den bereits vorliegenden Meßergebnissen ab 1976 und denen aus diesen Meßperioden eine zuverlässige Formveränderungsanalyse der Gezeiten abzuleiten. Weiter wird in diesem anstehenden Projekt auch eine großräumige Überprüfung der in den Gezeitentafeln veröffentlichten Gezeiten einschließlich der geographischen Lage des Knotenbereiches der Amphidromie angestrebt. Erste Erfahrungen zur Erstellung einer Gezeitenanalyse aufgrund von Hochseepegelmessungen in Verbindung mit MSL-Betrachtungen liegen mit der Veröffentlichung „Mittlere Tidewasserstände in der südlichen Nordsee – säkularer Trend und Verhältnisse um 1980" (LASSEN u. SIEFERT, 1991) vor und ermutigen zu dieser Untersuchung.

2. Verfahrensablauf

2.1 Allgemeines

In der südöstlichen Nordsee arbeiteten von 1976 bis 1993 43 Hochseepegel des BSH, 8 Hochseepegel im KFKI-Programm DEBEX (Deutsche Bucht Experimente) und 4 Hochseepegel des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Husum (ALWH) (Abb. 1).

Die Küste, 58 (1996), 109-160

Bis auf die Jahre 1988, 1992 und 1993 entsprachen die durchgeführten Hochseepegelkampagnen durch andersgeartete Veranlassungen nicht immer den prinzipiellen Anforderungen an die Kriterien, die für eine großräumige Gezeitenanalyse für erforderlich gehalten werden. Das hat zur Folge, daß z.B. keine zeitliche Analogie zwischen den Datenbeständen vorhanden ist. So reichen Aufzeichnungsdauern im Analysezeitraum von drei Wochen bis zu einem Jahr.

Bei der kartographischen Darstellung der Gezeitenform ergeben sich weitere Erschwernisse durch das Fehlen eines flächendeckenden Punktrasters, das wegen unterschiedlicher Zweckbestimmungen der Hochseemeßaktivitäten nicht erstellt werden konnte. Besonders im nordwestlichen Analysebereich und um den Bereich der/des amphidromischen Knotenpunkte/s können daher die Gezeitendarstellungen wegen geringer Datendichte nur als begrenzt allgemeingültig angesehen werden. Weitere Schwierigkeiten ergeben sich daraus, daß sich mit einem Hochseepegel wohl örtliche Tideverhältnisse bestimmen lassen, die jedoch keine Beziehung zu einer Referenzfläche haben, die für zeitabhängige Vergleiche von Wasserständen unerläßlich ist. Da sich die vorliegende Arbeit die Aufgabe stellt, eine möglichst zuverlässige synoptische Gezeitenstruktur für die südöstliche Nordsee zu erstellen, mußten eine Höhenvernetzung sowie eine zeitliche Zusammenführung aller bereinigten Meßdaten erreicht werden.

Zum Verständnis der Ausführungen zum vorliegenden Gezeitenkonzept sind einige grundsätzliche Ausführungen voranzustellen:

1. Um die graphischen Darstellungen der Gezeitenbewegungen in dem Format der Zeitschrift übersichtlich zu gestalten, erhalten die Hochseepegelstationen Bezeichnungen, die aus fortlaufenden Zahlen mit dem Index des Meßjahres bestehen. Den Küstenpegeln werden Namensabkürzungen zugeordnet.
2. Das Stationsverzeichnis der Hochsee- und Küstenpegel im Anhang A enthält neben den geographischen Koordinaten der Pegelorte auch die o.g. Stationsbezeichnungen (Spalte 3), ferner die ausführende Dienststelle (Spalte 1) sowie deren Stationsbezeichnung (Spalte 2). So ist es möglich, bei Bedarf den Zugang zu den Meßprotokollen zu finden.
3. In der tabellarischen Zusammenstellung der Gezeitendaten im Anhang B sind die aus dieser Analyse entwickelten individuellen mittleren Gezeitenparameter nach Meßjahren geordnet zusammengefaßt.
4. Grundlage der Bearbeitungsstrategie sind die auf NN beschickten Helgoländer Wasserstände. Zwischen Helgoländer Null (HN) und NN besteht nach LASSEN (1991) folgende Beziehung:

$$HN = NN + 26\ cm$$

   Das davon geringfügig abweichende Helgoländer NN, veröffentlicht vom Institut für Erdmessung der Univ. Hannover im Juni 1995, konnte für diese Gezeitenbetrachtung nicht mehr berücksichtigt werden.
5. Umrechnung von Druckdaten in Meter: 1000 hPa = 100 cm
6. Der k-Faktor ist ein Maß für die Verschiebung des Tidehalbwassers gegenüber MSL und gibt damit Hinweise auf die Kontinuität der örtlichen Tideverhältnisse:

$$k = \frac{MThw - MSL;}{MThb} \qquad MSL = MThw - (MThb \cdot k)$$

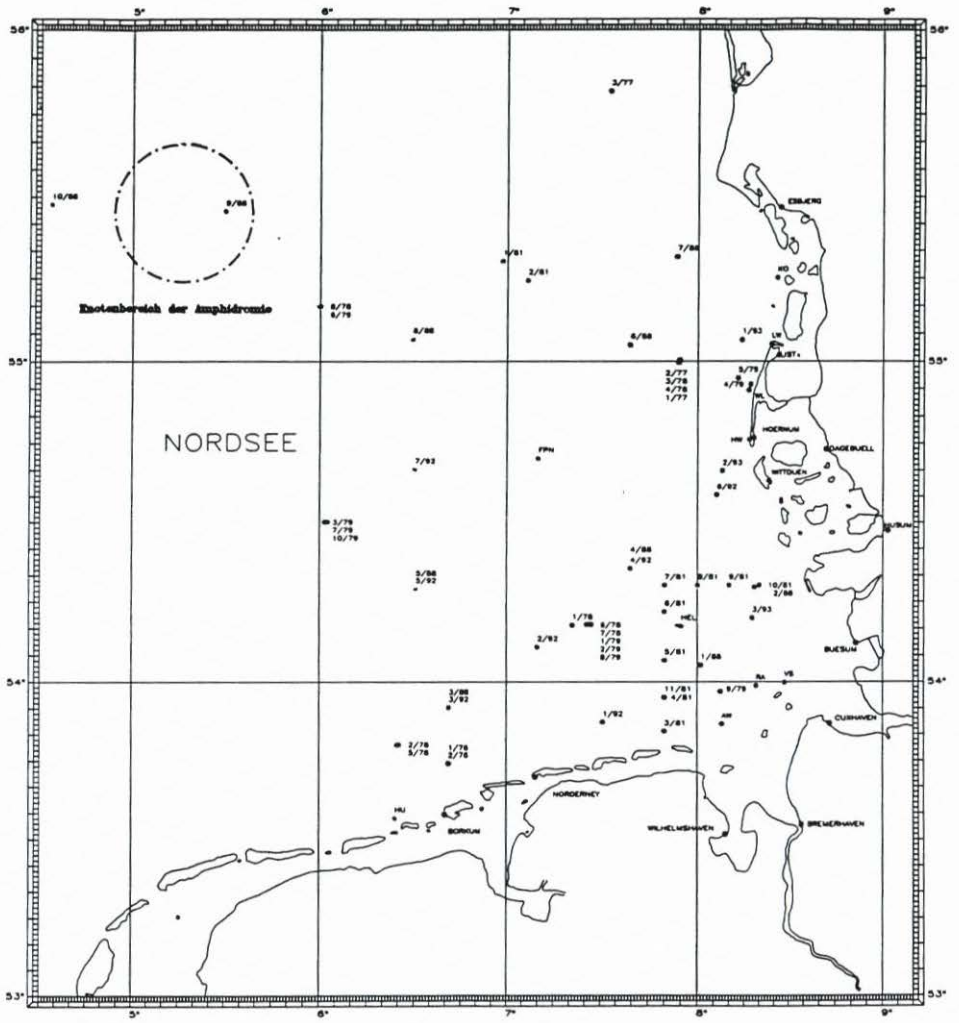


Abb. 1: Übersichtsplan ausgelegter Hochseepegel von 1976 bis 1993

2.2 Hochseepegel

Hochseepegel sind Druckpegel. Am Meeresgrund wird der Gesamtdruck der über dem Druckaufnehmer liegenden Wassersäule einschl. Luftdruck registriert. Abb. 2 zeigt das Schema einer ausgelegten Hochseepegelstation des BSH. Aus fortlaufenden Druckänderungen lassen sich nach Elimination der Schwankungen von Luftdruck, Wassertemperatur und Salzgehalt lokale Wasserstandsverhältnisse ableiten. In Abb. 3 ist der Tideverlauf der um die Wirkung der zuvor genannten Einflußfaktoren bereinigten Druckdaten einer Hochseestation graphisch dargestellt. Deutlich sind die Änderungen der Amplituden und die Charakteristik der täglichen sowie halbmonatlichen Ungleichheiten erkennbar.

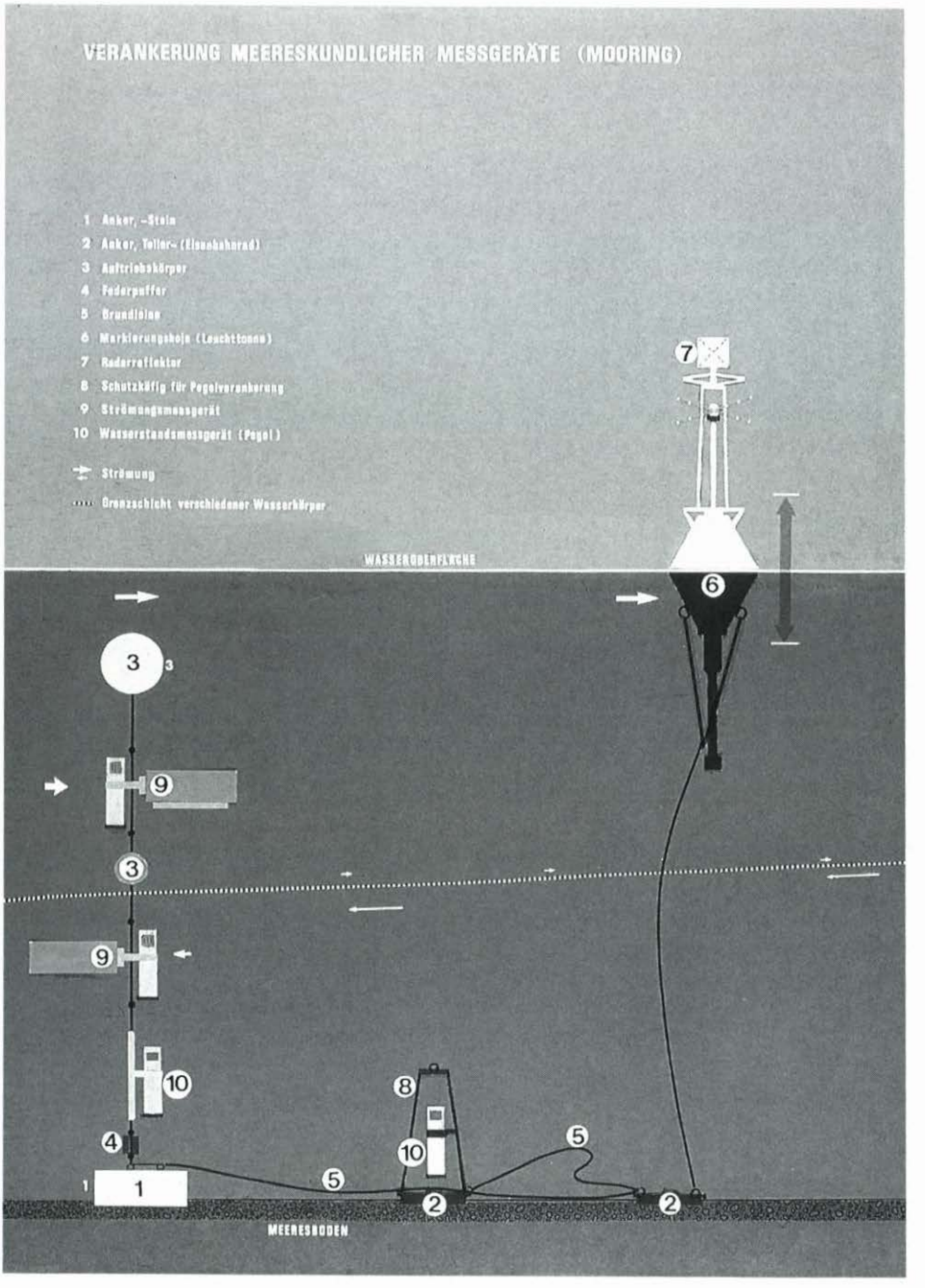


Abb. 2: Hochseepegelstation

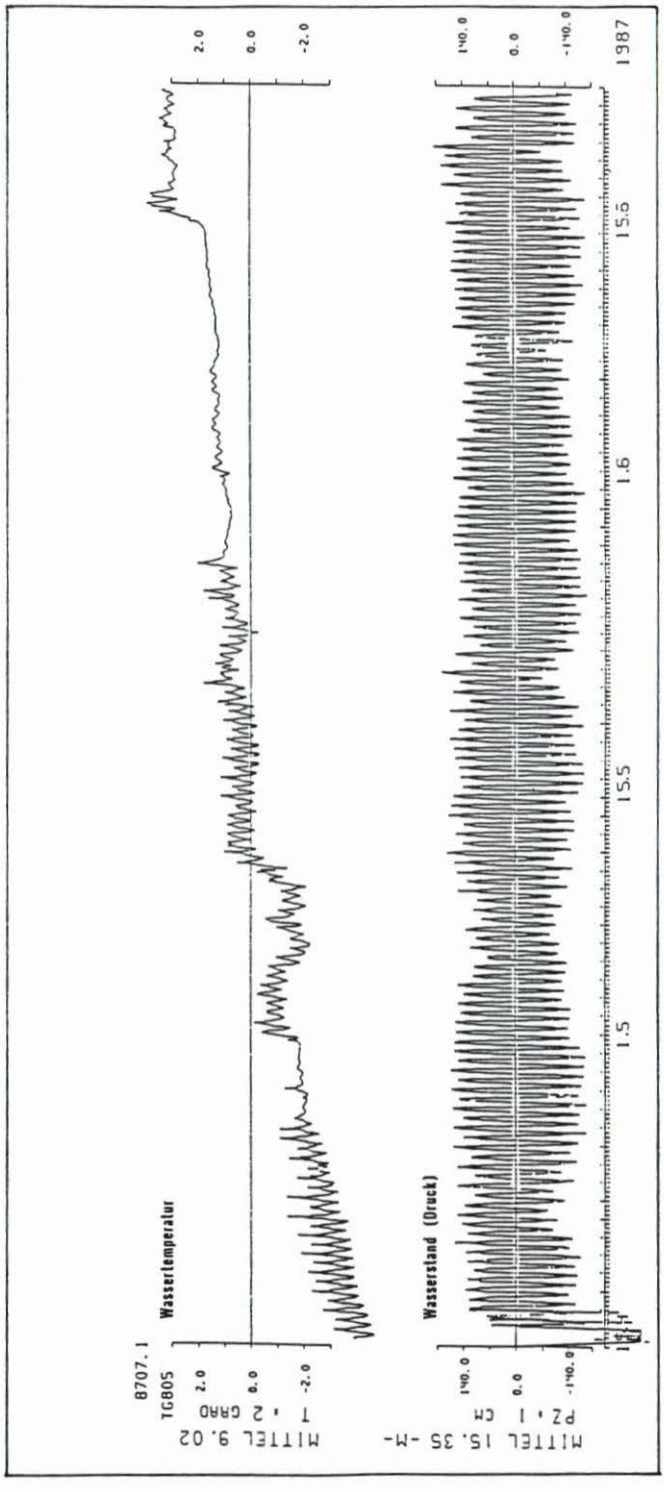


Abb. 3: Aufbereitete Registrierung einer Hochseepegelstation

Die Küste, 58 (1996), 109-160

2.3 Bezugspegel Helgoland

Der Pegel Helgoland, eine Pegelstation im freien Meer mit ganzjähriger Tideaufzeichnung, wird wegen seiner zentralen Lage als Referenzpegel für alle Hochseepegel eingeführt, außer für die Hochseepegel nördlich von Borkum (1/76, 2/76, 2/78, 5/78) und den Pegel Huibertgat; deren mittlere Tidekurven beziehen sich nach früheren Berechnungen auf den Pegel Borkum. Eine Umrechnung auf den Pegel Helgoland ist nicht erforderlich, da sich nur geringfügige Unterschiede zwischen den nach beiden Verfahren entwickelten mittleren Tidekurven einstellen, die keinen nachteiligen Einfluß auf die Homogenität der Gezeitendarstellung haben.

Bei einer Gezeiteninterpretation sind verschiedene Aspekte zu bedenken, die das Gesamtbild und die Aussagen hierzu entscheidend prägen. Als erstes müssen funktionale Beziehungen zwischen den verschiedenen Datenkollektiven der Hochseepegel mit den entsprechenden Wasserständen des Bezugspegels Helgoland durch mathematisch-statistische Rechenverfahren hergestellt werden, um mit den ermittelten Regressionsfunktionen und den dazugehörigen Jahreswerten MThw und MTnw des Bezugspegels Helgoland die jeweiligen örtlichen gewässerkundlichen Jahreswerte abzuleiten. Aus den so gewonnenen Jahreswerten wird MSL der betreffenden Meßstation berechnet. Die verfahrensbedingten Ungenauigkeiten im Rechengang liegen im Rahmen der Meßgenauigkeit. Die mathematischen Grundlagen für diese Methode zur Ermittlung fehlender Wasserstände sind in mehreren Beiträgen veröffentlicht.

Die Eintrittszeiten von Thw und Tnw des Bezugspegels Helgoland dienen als Referenzzeiten zur Ableitung der örtlichen Eintrittszeitdifferenzen (Bezugspegel minus Hochseepegel). Die berechneten Thw- bzw. Tnw-Eintrittszeitdifferenzen (dZF und dZE) geben also mittlere Zeitunterschiede zwischen Helgoland und den Hochseeorten an.

2.4 Genauigkeitsabschätzung

Nicht alle Tideparameter der Hochseepegel lassen sich in dieser Analyse gleich gut bestimmen. Meßzeiträume von 3 Wochen bis zu einem Jahr, um Jahre abweichende Tidebeobachtungen, Tidehübe zwischen 250 cm und etwa 30 cm und vermutete Fehlereinflüsse wirken sich auf eine präzise Gezeitenerfassung aus. Es kann also wahrscheinlich nicht von einer konstanten Meß- und Auswertegenauigkeit über den gesamten Analysezeitraum ausgegangen werden.

Eine realistische Genauigkeitsabschätzung der abgeleiteten Tideparameter MThw und MTnw aus dem Meßzeitraum geben die augenscheinlich hohen Korrelationskoeffizienten zwischen dem Bezugspegel und dem jeweiligen Hochseepegelort an. Mit Ausnahme der Pegel 1/76 und 2/76 beträgt der Korrelationskoeffizient $r = > 0{,}85$. Die Vertrauensbereiche der Mittelwerte MThw und MTnw variieren zwischen ± 4 cm und ± 9 cm. Sie sind damit nur unerheblich schlechter als die Genauigkeit von Saisonpegeln im Küstenvorfeld.

Ein kleiner Thb hat beachtliche Auswirkungen auf die Qualität der zu bestimmenden Thw- und Tnw-Eintrittszeiten. So erschweren z. B. meteorologisch bedingte Wasserstandsänderungen in einem sehr flachen Scheitelbereich einer Tidekurve die exakte Festlegung des Scheiteleintritts.

Dieses Auswerteproblem wirkt sich auch auf die Bestimmungsgüte der Mittelwerte von dZF und dZE aus. Bei einer Tideaufzeichnungsdauer ab 5 Wochen und einem Tidehub über 80 cm betragen die Standardabweichungen der Mittelwerte ± 6 min. bis ± 20 min. Für die

Hochseepegel 8/78, 6/79 und 10/88, drei Pegel im Umfeld der Amphidromie mit einem Thb um 35 cm und einer Tideerfassung von drei bis fünf Wochen, variieren die Standardabweichungen von dZF zwischen ± 30 min. und ± 35 min. und von dZE zwischen ± 20 min. und ± 26 min. Diese Genauigkeitsanalyse ist jedoch nicht so hoch zu bewerten, da sich hier im genannten Umfeld die Phasenänderungen auf kleineren Entfernungen vollziehen als in der Küstenregion. Dies bestätigen die übereinstimmenden mittleren Eintrittszeitdifferenzen der Jahre 1978 und 1979 der Hochseepegel 8/78 und 6/79, ausgelegt an etwa gleicher geographischer Position. Die Ergebnisse sind trotz der größeren Standardabweichungen als allgemeingültig anzusehen und bestätigen weiter, daß es auch mit 20tägigen Tidebeobachtungen bei einem kleinen Thb möglich ist, repräsentative Resultate zu erzielen.

Einen besonderen Gesichtspunkt, der bei Gezeitenaufbereitungen von Hochseepegeldaten zu beachten ist, stellen systematische Zeitfehler dar, die bei der Auslegung eines Pegels durch Auslöseunsicherheiten des ersten Zeitkontaktes hervorgerufen werden können. Sie bewirken eine gleichmäßige Zeitverschiebung der Meßwerte über die Meßepoche. Im Einzelfall ist dieser Fehler nicht zu bemerken; er läßt sich nur durch Gegenüberstellung von Ergebnissen paralleler Hochseepegelmessungen oder bei der kartographischen Ausarbeitung und eventuell in schrittweise geänderten Beobachtungsintervallen aufdecken. Auf diesem Wege gelangen für zwei Pegel Zeitberichtigungen, deren Werte nach Korrektur mit den tatsächlichen Verhältnissen gut übereinstimmen. Für den Pegel 6/88 konnten die Ursachen für die fehlerhaften Eintrittszeiten nicht geklärt werden.

Die Genauigkeitsabschätzungen für die Steig- (TF) und Falldauer (TE) entsprechen denen bei den Tideeintrittszeiten.

3. Mittlere Tidekurve und mittlerer Meeresspiegel

3.1 Mittlere Tidekurve

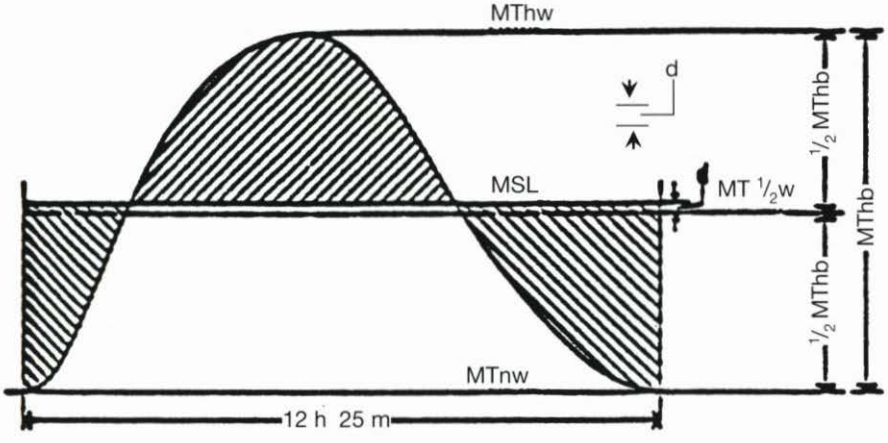
Die mittlere Tidekurve eines Pegelortes ist von großer praktischer Bedeutung, da sie einmal den graphischen Überblick über die ortsgebundene Gezeitenbewegung liefert und durch die Integration der Fläche unter der mittleren Tidekurve den Parameter MSL. Die mittleren Tidekurven für die Hochseepegelorte sowie für die Küstenpegel wurden nach dem Verfahren von LÜDERS (1950) entwickelt. Hierzu dienen die jeweiligen Mittel halbstündiger Wasserstände von Tnw über Thw bis Tnw aus 20 Tiden, deren Scheitelwerte den zuvor ermittelten Jahreswerten – abgeleitet aus den Regressionsfunktionen zum Bezugspegel Helgoland – näherungsweise entsprechen. Die Anwendung und Fortentwicklung dieser Methode ist schon mehrfach veröffentlicht und wird daher nicht weiter behandelt (GÖHREN, 1968; SIEFERT u. LASSEN, 1985). Im Rahmen dieser Analyse erforderten die Bestimmung und Ableitung halbstündiger Wasserstände sowie deren Differenzen zur Konstruktion mittlerer Tidekurven leider noch einen hohen manuellen Aufwand. Das umfassende Gezeitenbild für den Meeresbereich setzt sich aus den Ergebnissen von 55 mittleren Tidekurven der Hochseepegelorte sowie aus denen von 12 mittleren Tidekurven der Küstenpegel zusammen. Zwei Hochseepegel (8/88 und 1/92) waren bei den Meßkampagnen als Verlust zu buchen. Da die Kurven (insgesamt 67) hier nicht komplett veröffentlicht werden können, ist der Hinweis angebracht, daß sie auf Wunsch von Interessenten über das KFKI oder den Autoren zur Verfügung gestellt werden.

Die Küste, 58 (1996), 109-160

3.2 Mittlerer Meeresspiegel

Das Geoid stellt eine natürliche Niveaufläche zur Bestimmung der NN-Höhen dar. Nach TORGE (1993) folgt die Bedeutung des Geoids aus seiner Definition als ausgleichende Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes, die in bestmöglicher Anpassung mit dem mittleren Meeresniveau zusammenfällt. MSL ist die Beschreibung eines bestimmten mittleren Wasserstandes, in der vorliegenden Arbeit ermittelt als waagerechte Schwerelinie einer mittleren Tidekurve (Abb. 4). Je nach unterschiedlichen Einflußfaktoren auf Wasserstände – im wesentlichen sind es die zeitlich und örtlich variablen Windwirkungen – liegen MSL-Jahreswerte nicht immer auf gleicher Höhe, wie am Beispiel Pegel Helgoland gezeigt wird:

1988 +5 cm NN
1992 −4 cm NN
1993 −6 cm NN



Flächengleich
MSL = mittlerer Meeresspiegel
MT ½w = mittleres Tidehalbwasser
MThb = mittlerer Tidehub

$$\Delta = \frac{MSL - MT\ ½w}{MThb} = \frac{d}{MThb}\ ; \qquad d = MThb \cdot \Delta$$

$$k = \frac{MThw - MSL}{MThb}\ ; \qquad MSL = MThw - MThb \cdot k$$

$$k = \frac{MThw - MT\ ½w}{MThb} - \Delta\ ; \qquad k = 0{,}5 - \Delta$$

Abb. 4: Darstellung der Tidecharakteristik (schematisch)

MSL ist somit eine dynamische Bezugsfläche, die nur für einen definierten Ort und Zeitraum Gültigkeit hat und legt dafür den Abstand der mittleren Meeresoberfläche zur Äquipotentialfläche fest. Nach der Auswertung von Saisonpegeln im Küstenvorfeld der deutschen Nordseeküste steigt MSL hier, bedingt durch den Einfluß der Meeresbodentopographie, vom offenen Meer zur Küste hin an und weicht mit einer leichten Krümmung von der Äquipotentialfläche ab (LASSEN u. SIEFERT, 1989). Über den weiteren Verlauf des mittleren Meeresniveaus im seewärtigen Bereich lagen bisher keine Informationen auf Datenbasis vor. Diesem Umstand kommt die GPS-Messung „Präziser Höhenanschluß des Pegels Helgoland" – Institut für Erdmessung, Univ. Hannover 1995 – entgegen, denn sie erlaubt nunmehr, den Pegel Forschungsplattform Nordsee (FPN) in die Höhenbestimmung der MSL-Analyse zwischen den Pegelorten auf der Grundlage von Wasserständen im Tiefwasserbereich einzubeziehen. Die Station mußte leider 1992 abgewrackt werden.

Die Ableitung der aktuellen MSL-Höhe erfolgte über die mittleren Tidekurven der Pegel Helgoland und FPN. Die Ergebnisse resultieren aus ungleichem Datenmaterial. Dem Pegel Helgoland lagen die ganzjährigen Tidedaten von 1988 und 1992 zugrunde, während aus dem umfangreichen Datenmaterial des Blasenpegels auf der FPN nur die Tiden vom 17. 7. 1988 bis 8. 11. 1988 und vom 1. 2. 1992 bis 30. 6. 1992 zur Auswertung herangezogen werden konnten.

Bei der Höhenbestimmung des Blasenpegels – installiert in einem Standbein der FPN – ergaben sich insofern Schwierigkeiten, weil der Nullpunkt des Blasenpegels nicht direkt zugänglich war. Demzufolge wurde zusätzlich ein Hochseepegel auf das Fundament der FPN abgesenkt, um aus den Wasserstandsdifferenzen der Pegel die benötigte Höheninformation zwischen den Pegelnullpunkten abzuleiten (Abb. 5). PN des Hochseepegels ist durch umfangreiche und teilweise schwierige Messungen an die Höhe des GPS-Punktes auf dem Helikopterdeck angeschlossen worden. Durch verfahrensbedingte Fehlereinflüsse ist die angegebene Höhendifferenz zwischen den Pegelnullpunkten in dem Schlußbericht der Univ. Hannover um 16 cm zu groß ermittelt worden. Diese Korrektur ergab sich aus der nachträglichen Berücksichtigung der niedrigen gewässerkundlichen Monatswerte im Mai und Juni 1992 gegenüber den entsprechenden Jahresmitteln.

Mit den Hochseepegelmessungen steht für die angestrebte MSL-Analyse bei der FPN eine vom Blasenpegel unabhängige Gezeitenerfassung vom 6. 5. 1992 bis 16. 6. 1992 zur Verfügung, um die MSL-Qualität beurteilen zu können. Die Tabelle enthält Tidedaten für beide Pegel, die sich aus deren mittlerer Tidekurven (Abb. 6 bis 11) ergeben (bezogen auf örtl. MSL):

FPN	MThw	MTnw	MThb	TF	TE	TF/TE	k
Blasenpegel 88	60,9 cm	– 64,1 cm	125 cm	5h 41 m	6h 44 m	0,844	0,487
Blasenpegel 92	61,7 cm	– 64,3 cm	126 cm	5h 44 m	6h 41 m	0,858	0,490
Hochseepegel 92	60,4 cm	– 62,6 cm	123 cm	5h 44 m	6h 41 m	0,858	0,491

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß sowohl die Form der mittleren Tidekurven sowie deren Lage zum MSL von 1988 bis 1992 bei der FPN übereinstimmt, als auch eine konforme Aufzeichnungsgenauigkeit von Blasenpegel und Hochseepegel besteht. Bei Pegel Helgoland ist eine ausreichende Genauigkeit für Wasserstandsaufzeichnungen gegeben. Die Ansätze zur Berechnung aktueller MSL-Höhen ergeben für Pegel Helgoland, den Blasenpegel (B) und Hochseepegel (H) der FPN folgende Höhen:

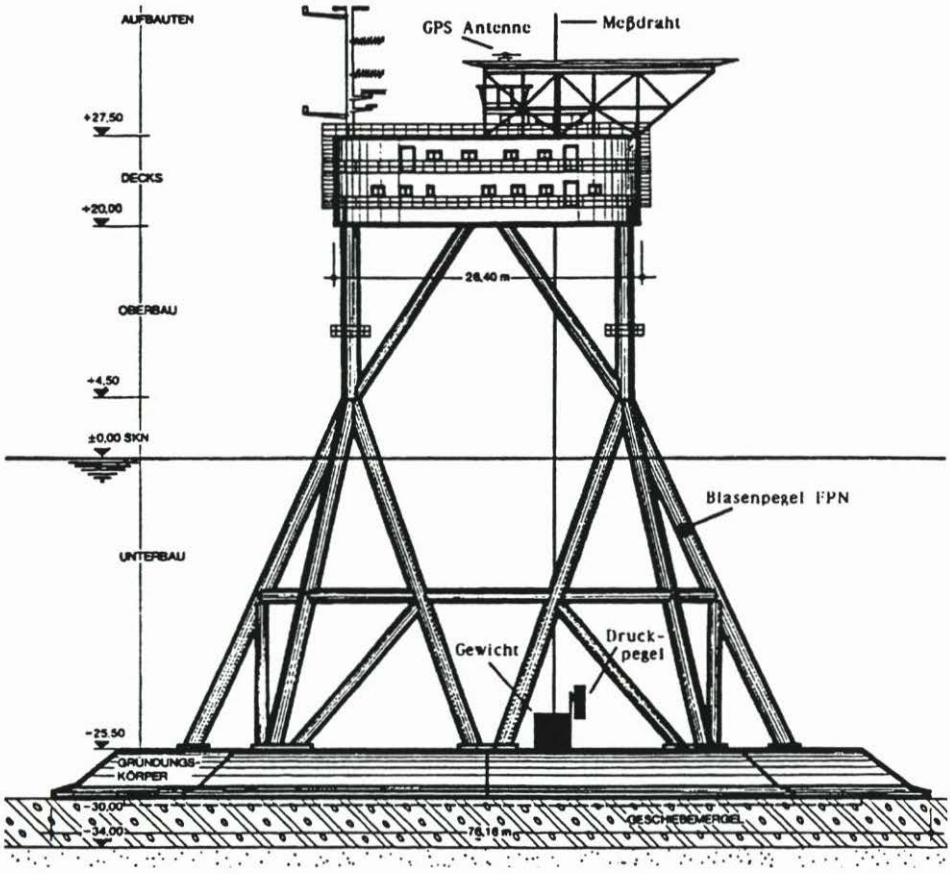


Abb. 5: Forschungsplattform Nordsee (aus dem Bericht „Präziser Höhenanschluß des Pegels Helgoland" entnommen)

Jahr	MSL in cm NN	
	Helgoland	FPN
1988	+ 5	+ 9 B
1992	- 4	- 2 B
1992	- 3	- 3 H

Die äquivalenten MSL-Höhen der Pegel Helgoland und FPN bestätigen für den Meeresbereich der südöstlichen Nordsee den übereinstimmenden Verlauf von Geoid und mittlerem Meeresspiegel. Da andererseits MSL auf NN-Höhen bezogen ist, muß auch der Verlauf der NN-Fläche mit dem des Geoid übereinstimmen. Zur Überprüfung des MSL sollten jedoch noch weitere Vergleichsmessungen mit abgesenkten Hochseepegeln auf das Fundament der ehem. FPN, dessen Höhe bekannt ist, angestrebt werden. Im Rahmen dieser Untersuchung abgeleitete Gezeitenhöhen auf MSL-Basis lassen sich damit bei Bedarf in geeigneter Form durch entsprechendes Anbringen der Differenz Helgoländer NN minus zeitlicher MSL-

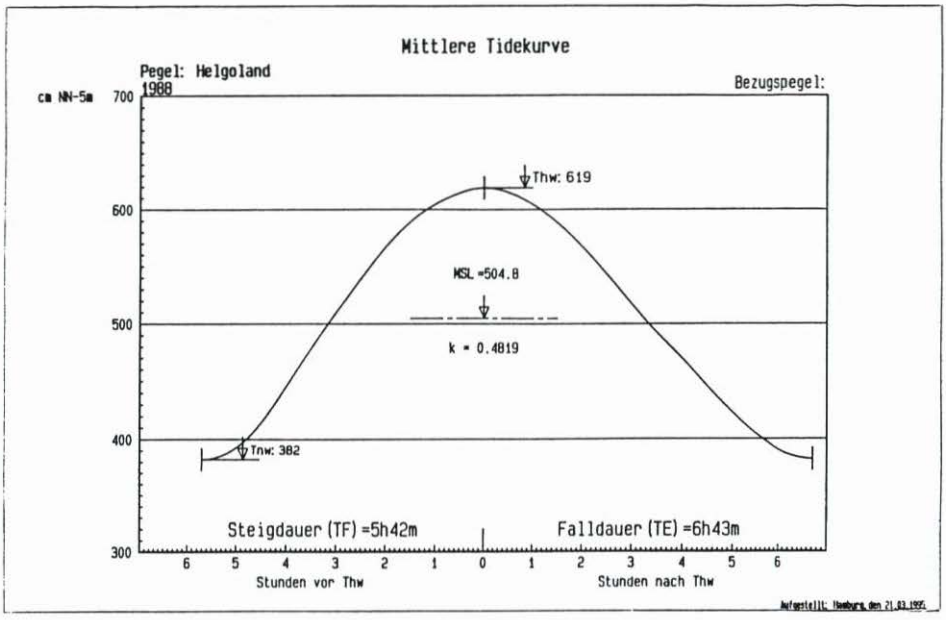


Abb. 6: Pegel Helgoland (Scheitelhöhen bezogen auf NN)

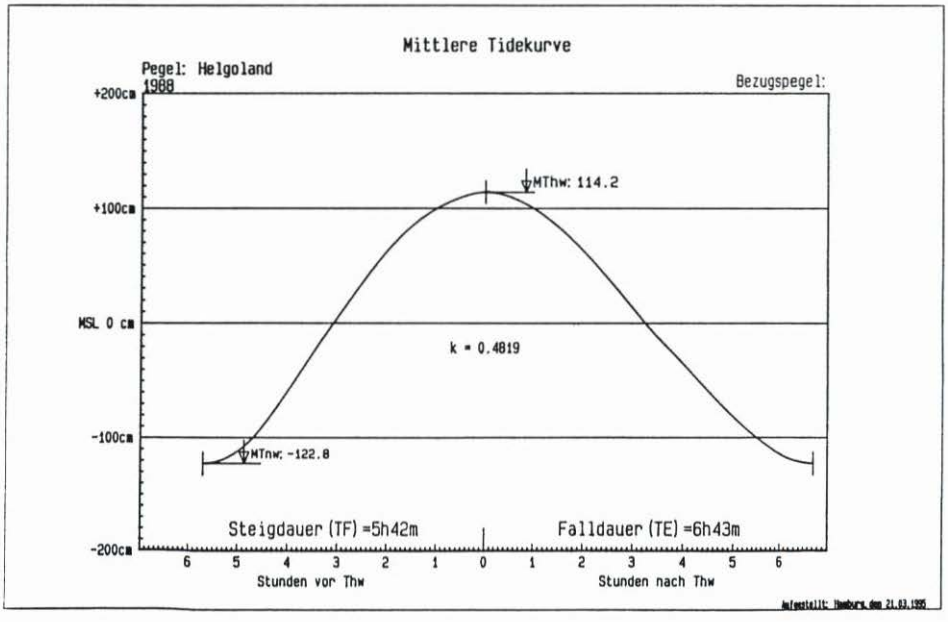


Abb. 6a: Pegel Helgoland (Scheitelhöhen bezogen auf MSL)

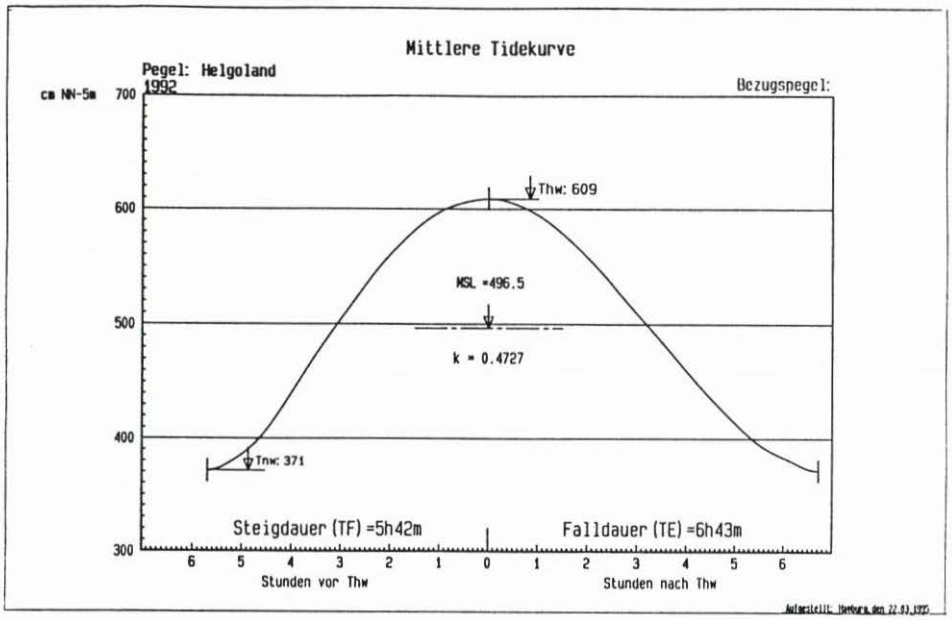


Abb. 7: Pegel Helgoland (Scheitelhöhen bezogen auf NN)

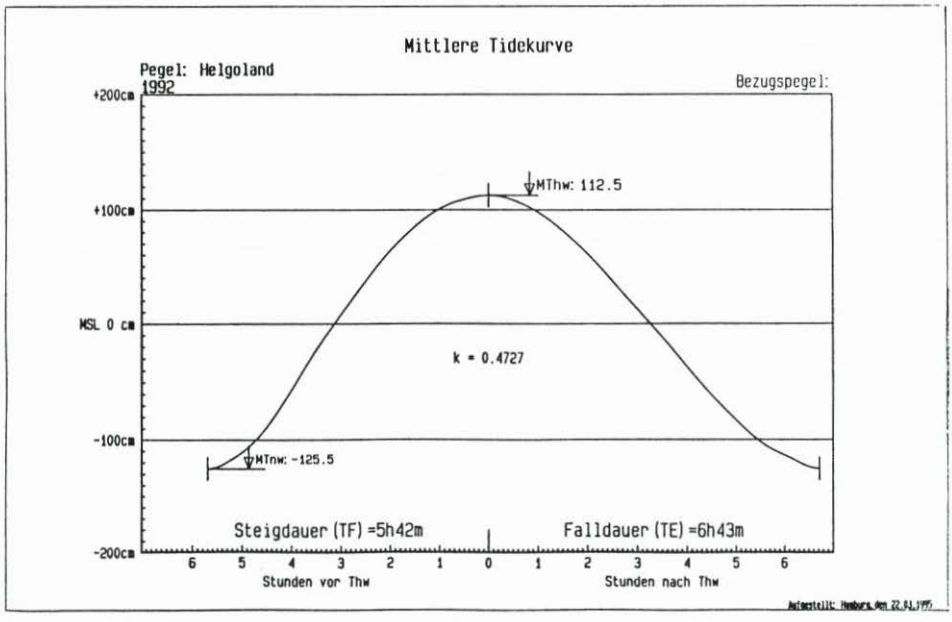


Abb. 7a: Pegel Helgoland (Scheitelhöhen bezogen auf MSL)

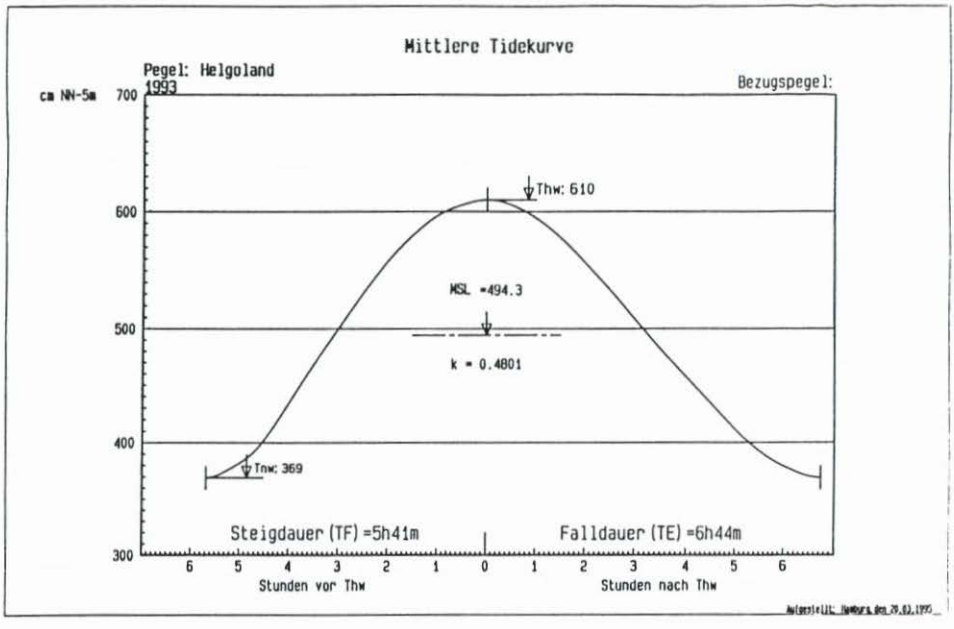


Abb. 8: Pegel Helgoland (Scheitelhöhen bezogen auf NN)

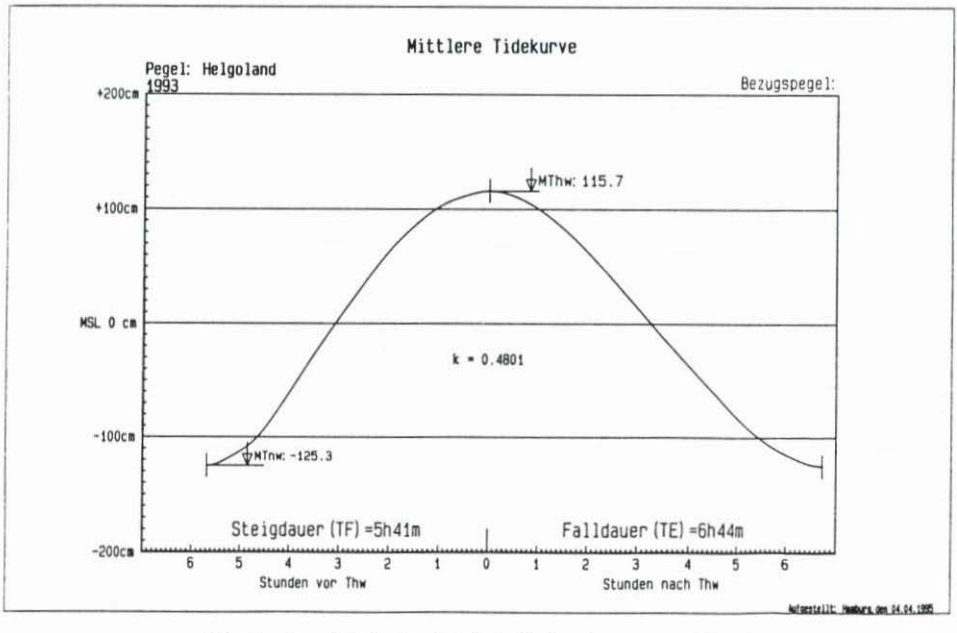


Abb. 8a: Pegel Helgoland (Scheitelhöhen bezogen auf MSL)

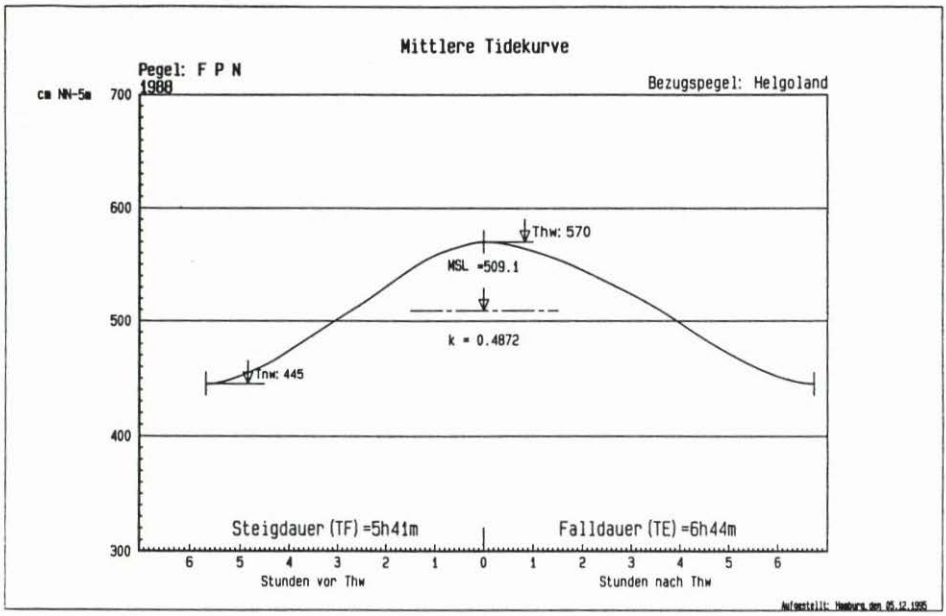


Abb. 9: Blasenpegel FPN (Scheitelhöhen bezogen auf NN)

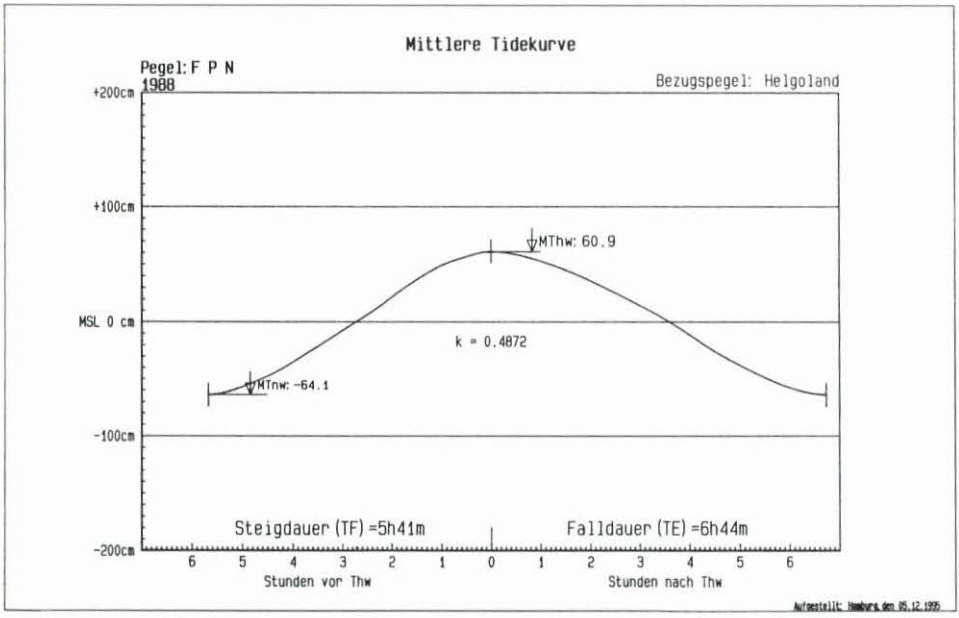


Abb. 9a: Blasenpegel FPN (Scheitelhöhen bezogen auf MSL)

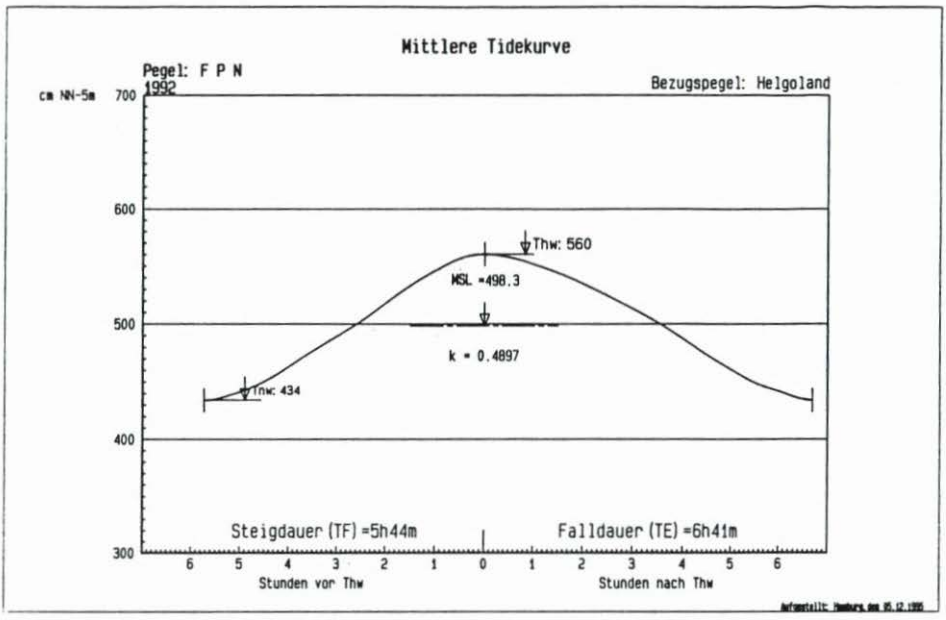


Abb. 10: Blasenpegel FPN (Scheitelhöhen bezogen auf NN)

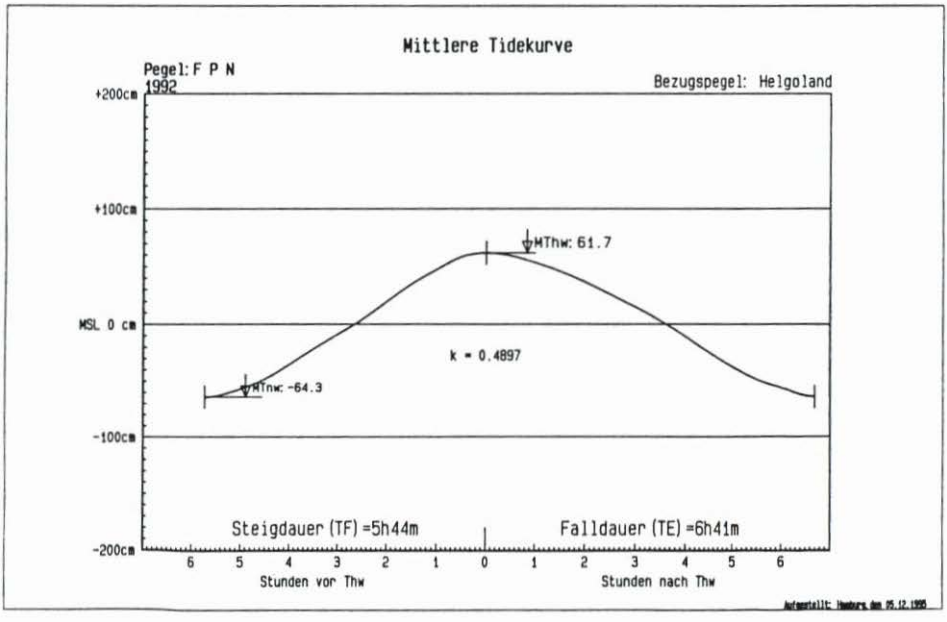


Abb. 10a: Blasenpegel FPN (Scheitelhöhen bezogen auf MSL)

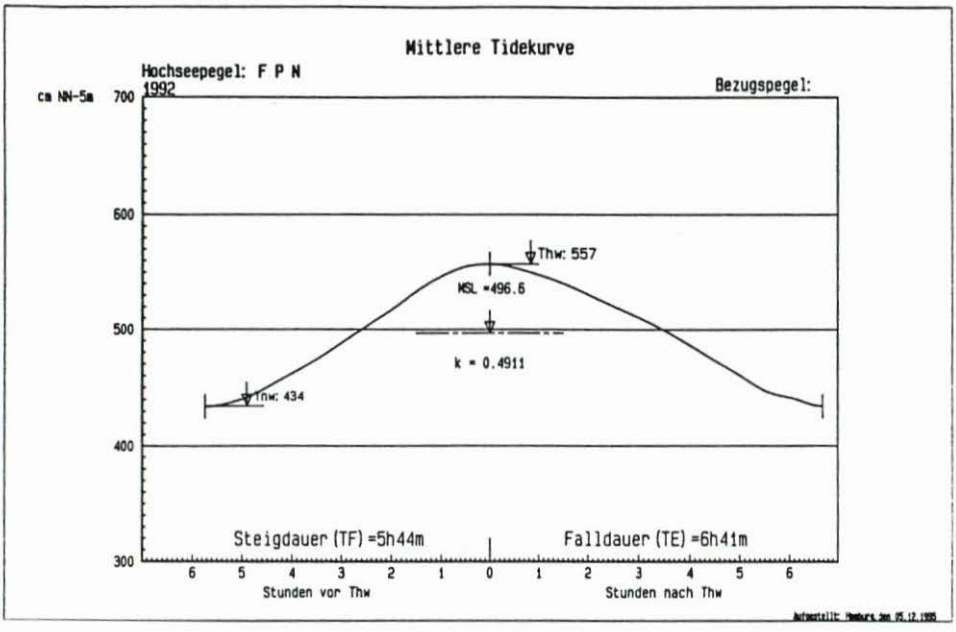


Abb. 11: Hochseepegel FPN (Scheitelhöhen bezogen auf NN)

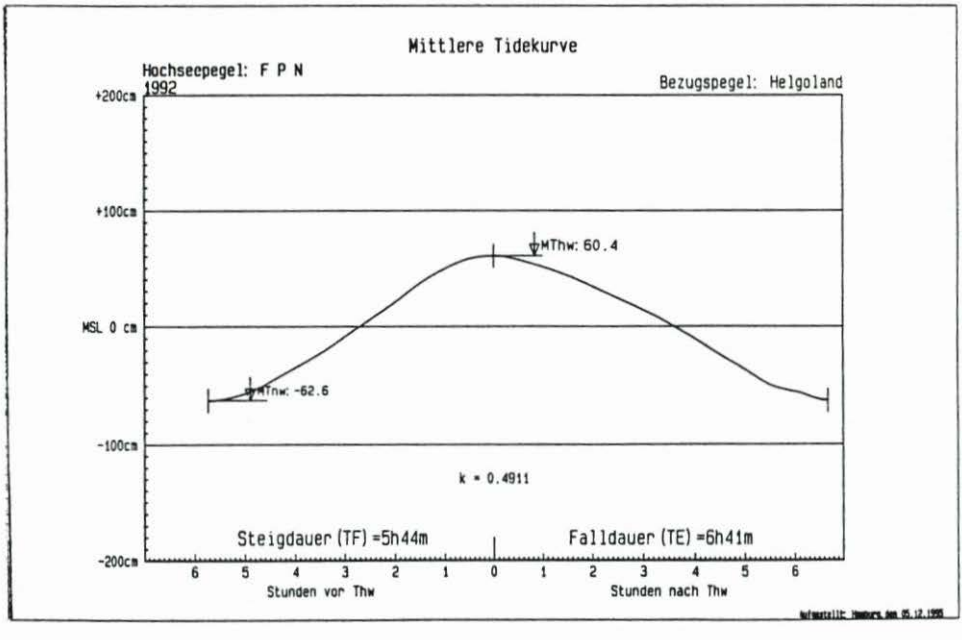


Abb. 11a: Hochseepegel FPN (Scheitelhöhen bezogen auf MSL)

Höhe näherungsweise großräumig in das Höhensystem der Landesaufnahme integrieren und eröffnen damit neue Perspektiven für die Gestaltung von Gezeitenmodellen. Von maßgebender Bedeutung ist es daher, daß Hochseepegel im Meßzeitraum genügend mittlere Tiden aufzeichnen (≥ 5 Wochen, mindestens jedoch 4 Perioden halbmonatlicher Ungleichheiten), um aus diesem Datenkollektiv im Vergleich zum Bezugspegel Helgoland mit ganzjähriger Tideaufzeichnung die für die Meßperiode gültige örtliche MSL-Höhe im Tiefwasserbereich zu entwickeln. MSL wird aufgrund der zuvor getroffenen Aussagen als großräumige homogene Bezugsfläche zur Gezeitenhöhenableitung dieser Analyse gewählt, wobei in Kauf genommen wird, daß MSL beim Übergang vom Seebereich zum Küstenvorfeld hin gegenüber dem Geoid leicht ansteigt. Objektive Genauigkeitskriterien hierzu liegen außer bei LASSEN u. SIEFERT (1991) nicht vor. Nach weiteren vorliegenden Betrachtungen überschreiten die Abweichungen bis zum Küstenvorfeld hin kaum 1 dm, d.h. die vorliegenden mittleren Gezeitenhöhen genügen den Genauigkeitsanforderungen vollkommen.

3.3 Beispiel

Die Bedeutung des örtlichen MSL als wertvolle Interpretationshilfe für Gezeitenanalysen im freien Meer soll an einem Beispiel erläutert werden, das auch für die anderen Hochseepegel Gültigkeit hat. So erleichtert der Parameter MSL den Vergleich der relativen Tidedaten der Hochseepegel 8/78 und 6/79 (Abb. 12 u. 13). Die angegebenen mittleren Gezeitenparameter resultieren aus den unabhängigen Meßergebnissen der Hochseepegel östlich der Amphidromie an näherungsweise gleicher geographischer Position:

Pegel	MThw	MTnw	MThb	TF	TE	TF/TE	k
8/78	15 cm	– 17 cm	32 cm	6h 42 m	5h 43 m	1,18	–
6/79	14 cm	– 19 cm	33 cm	6h 41 m	5h 44 m	1,17	–

Trotz beschränkter Datenbasis – bei einem Thb von etwa 30 cm standen nur Tidedaten aus Messungen von jeweils 20 Tagen zur Verfügung – stimmen die Ergebnisse überein und werden den tatsächlichen Gezeitenverhältnissen gerecht.

Weitere Gegenüberstellungen von mittleren Gezeitenparametern, ermittelt aus mehrfachen Hochseepegelmessungen an näherungsweise gleichen geographischen Positionen, enthält Anhang C. Die Scheitelhöhen beziehen sich auf den betreffenden örtlichen MSL.

Die vorliegenden Ermittlungen mittlerer örtlicher Gezeiten aus kurzen Meßreihen lassen erkennen, daß diese über Jahre hinaus äquivalente Ergebnisse liefern. Offensichtlich sind die örtlichen relativen Gezeitenhöhen über bzw. unter MSL aus abweichenden Jahren nicht von der absoluten MSL-Höhe unabhängig. Die Stabilität der Mittelwerte über längere Zeiträume ist im wesentlichen darauf zurückzuführen, daß hier im freien Meer der Einfluß von küstenspezifischen Einwirkungen auf das Tidegeschehen fehlt (s. Pegel Helgoland, Bake A und weitere Hochseepegelgruppen). Diese Aussage führt auch zu der Erkenntnis, daß sich keine Probleme bei der Zusammenführung zeitlich auseinanderliegender örtlicher Gezeitenbeobachtungen zu einem Gesamtmittel ergeben, und daß sich die Ergebnisse aus nur einer Meßkampagne in den Rahmen des gesamten Untersuchungszeitraumes einpassen.

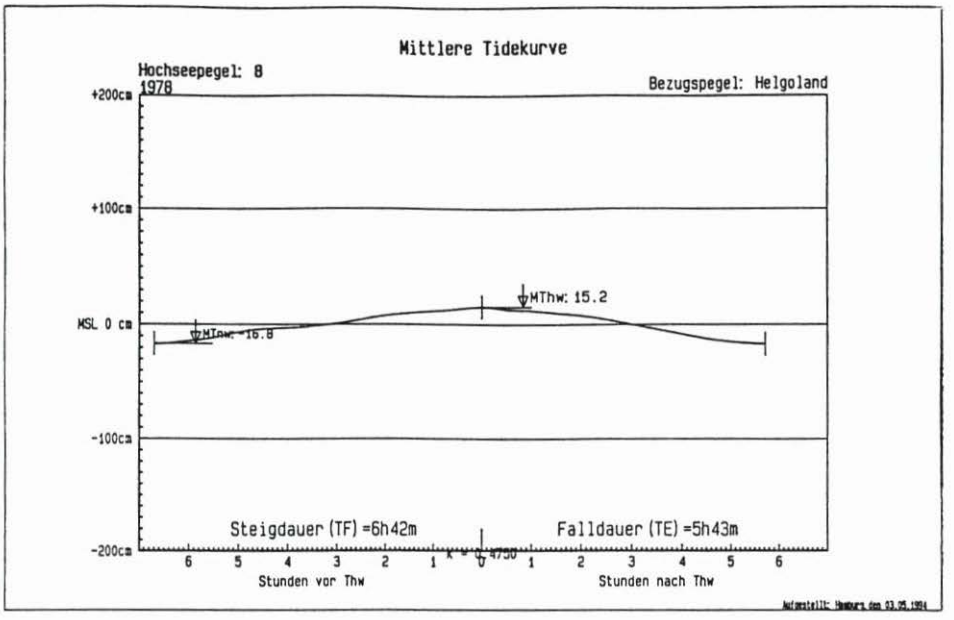


Abb. 12: Hochseepegel 8/78 (Scheitelhöhen bezogen auf MSL)

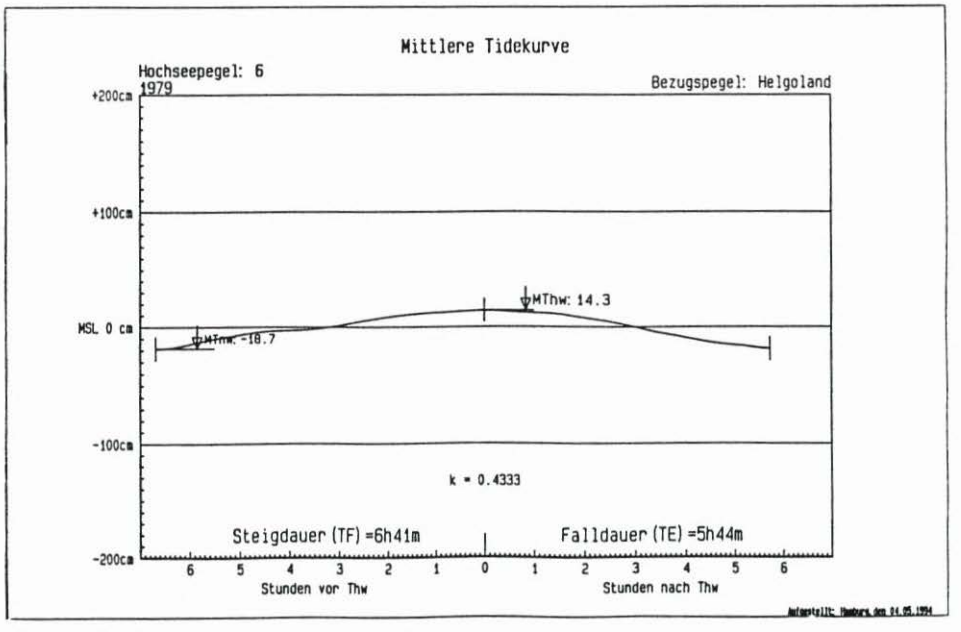


Abb. 13: Hochseepegel 6/79 (Scheitelhöhen bezogen auf MSL)

4. Ergebnisse

4.1 Allgemeines

Abb. 17 bis 24 vermitteln eine zusammenfassende Information über die heutigen Tideverhältnisse anhand der Parameter MThw, MTnw, MThb, dZF, dZE, TF, TE und TF/TE für den Tiefwasserbereich der südöstlichen Nordsee, ermittelt nach Daten aus dem Zeitraum von 1976 bis 1993. Sie bilden u.a. auch die Basis für den Vergleich zwischen diesen Tideverhältnissen und den Abbildungen aus den Gezeitenberechnungen des BSH. Erschwert wird diese Gegenüberstellung durch das im Verhältnis zur Bereichsgröße immer noch äußerst spärlich zur Verfügung stehende Datenmaterial, aber natürlich auch deswegen, weil diese Daten das Ergebnis aller Partialtiden einschließlich ihrer Wechselwirkungen darstellen. Der Vergleich bleibt daher auf wenige ausgewählte Linien gleicher Phase und Amplitude begrenzt. Zur Beurteilung ist dieser Weg natürlich nicht befriedigend. Das Ergebnis kann nur als begrenzt allgemeingültig angesehen werden. Es gibt aber zumindest Hinweise auf die reproduzierbare Genauigkeit. Es muß noch angemerkt werden, daß bei den Gezeitendarstellungen 84 von Spring- und Nipptidenverhältnissen und bei Linien gleichen Zeitunterschieds vom Durchgang des Mondes durch den Meridian von Greenwich ausgegangen wird, während sich die Gezeiten dieser Analyse auf mittlere Tideverhältnisse beziehen und die Eintrittszeitdifferenzen (dZF und dZE) Zeitabweichungen zum Pegel Helgoland angeben.

4.2 Amphidromien der Partialtiden

Als Amphidromien bezeichnet man umlaufende Partialtiden (Drehtiden), bei denen sich Linien gleicher Eintrittszeiten der Thw und Tnw radial um den Knotenpunkt ordnen. Sie entstehen durch Interferenzen stehender Wellen in Längs- und Querrichtung annähernd rechteckiger Becken. Der Knotenbereich der Amphidromie ist das bestimmende Element für die Orientierung der Flut- und Ebbestundenlinien, deren Verlauf im engen Zusammenhang mit der großräumigen Thb-Verteilung steht. Im Zentrum einer Amphidromie geht der Thb theoretisch auf Null zurück und nimmt mit der Entfernung von diesem Bereich zu. (Weitere Ausführungen u. a. bei DEFANT, 1953 und THORADE, 1941).

Die südöstlichen Nordsee-Amphidromien entstehen durch den Einfluß von Reflektion, Corioloskraft, Reibung und Tiefenverteilung auf die aus dem Atlantik einlaufende Gezeit in dieses offene Randmeer. Die Zusammenhänge sind kompliziert und nur schwer zu erfassen, so daß es Ziel harmonischer Gezeitenanalysen ist, eine endliche Zahl berechenbarer Partialtiden so auszuwerten, daß ihre Summe den Erkenntnissen aus beobachteten Wasserständen genügen. So kommt den flächenhaften Darstellungen harmonischer Gezeitenkonstanten des ehemaligen Marineobservatoriums Wilhelmshaven (Amplitude und Phase einer Partialtide werden als harmonische Gezeitenkonstanten bezeichnet) besondere Bedeutung zu, weil sie Amplituden und Phasen nach Größe und Zeit (Grad) für harmonische Teiltiden im Gesamtgebiet der Nordsee aufzeigen. Dazu berücksichtigte das Marineobservatorium bis zu 62 Partialtiden unter Einbeziehung von Gezeitenbeobachtungen der damaligen Forschungsschiffe. Anh. D (Abb. 1D bis 10 D) zeigt den großräumigen Verlauf von Gezeitenkonstanten für halbtägige Gezeiten (M 2, S 2), eintägige Gezeiten (K 1, O 1) und für eine vierteltägige Gezeit (M 4) für das Gebiet der Nordsee.

Die Küste, 58 (1996), 109-160

Bei der Bearbeitung von Fragestellungen zu Gezeitenbewegungen in der Nordsee sind zuverlässige geographische Koordinaten der amphidromischen Knotenbereiche von großer Bedeutung.

Unter bestimmten Voraussetzungen können sie u. a. eine Informationsquelle zur Beurteilung der Lagestabilität einer Amphidromie sein. Amphidromische Lageänderungen haben Auswirkungen auf die Gezeitengeometrie und führen zu Tideanomalien in den Küstenregionen. Der Stabilitätsnachweis ist in diesem Fall eine komplizierte Aufgabe und mit Schwierigkeiten verbunden. Die Gründe hierfür sind vielfältig. So verbesserten sich im Verlauf von Jahrzehnten die Meßmethoden mit steigenden Meßgenauigkeiten (z. B. Tiefenmessungen von Drahtlotungen zum Echolot). Weiter macht sich bei den Berechnungen das Fehlen hochauflösender und kontinuierlicher Tidemessungen im Meeresbereich bemerkbar. In früheren Jahren standen zur Approximation der in den Gezeiten enthaltenen Schwingungen nur unzureichende Rechenkapazitäten in den Rechenanlagen zur Verfügung, dagegen ist es heute die zu geringe Datendichte oder das Fehlen von Gezeitendaten. Ein zusätzliches Problem stellen die abweichenden Lösungsansätze zur Ermittlung der Gezeitengeometrie von damals bis heute dar. In diesem Zusammenhang ist auch die Frage interessant, ob die Tiefenverteilung in der Nordsee über die Zeit als konstant angenommen werden kann. Dies alles hat zur Folge, daß es keine Eindeutigkeit für die geographischen Koordinaten der Amphidromie der wichtigsten Partialtide, der halbmonatlichen Hauptmondtide M 2, über den Zeitabschnitt von 1923 bis 1931 (Merz, Defant, Doodsen, Thorade) bis hin zu den heutigen Berechnungen gibt. In Anbetracht des früher begrenzten Datenmaterials und unterschiedlicher Lösungsansätze können die so gewonnenen Mittelpunktskoordinaten der M 2-Amphidromie von Merz, Defant, Doodsen und Thorade nur als begrenzt allgemeingültig angesehen werden. Interessant sind dagegen die Ergebnisse von MÖLLER (1933), HANSEN (1948) und dem BSH 1970, da sie aufgrund von Gezeitenmessungen im Meeres- und Küstenbereich und Rechenmodellen eine hinreichende Koordinatenübereinstimmung für den Mittelpunkt der M 2-Amphidromie angeben:

Quelle		Breite N		Länge O		Berechnungsgrundlage
Möller	1933	55°	42'	5°	30'	Gezeitenbeobachtungen
Hansen	1948	55°	32'	5°	16'	Rechenmodell
BSH	1970	55°	26'	5°	17'	Pegelbeob. von den Küsten und Modellrechnungen

Die mitgeteilten Zentrumskoordinaten zur M 2-Amphidromie unterscheiden sich nicht signifikant und lassen sich auch nicht wegen abweichender Vorinformationen in den Berechnungen als mehrdeutig interpretieren. Dies bedeutet aber nicht etwa, daß nicht infolge des Einwirkens von meteorologischen, hydrologischen und astronomischen Effekten auf die Meeresoberfläche tägliche, monatliche und jährliche Gezeitenschwankungen auftreten, die zu zeitlichen Zentrumsbewegungen führen und damit einen großen Knotenbereich für jede Amphidromie zur Folge haben.

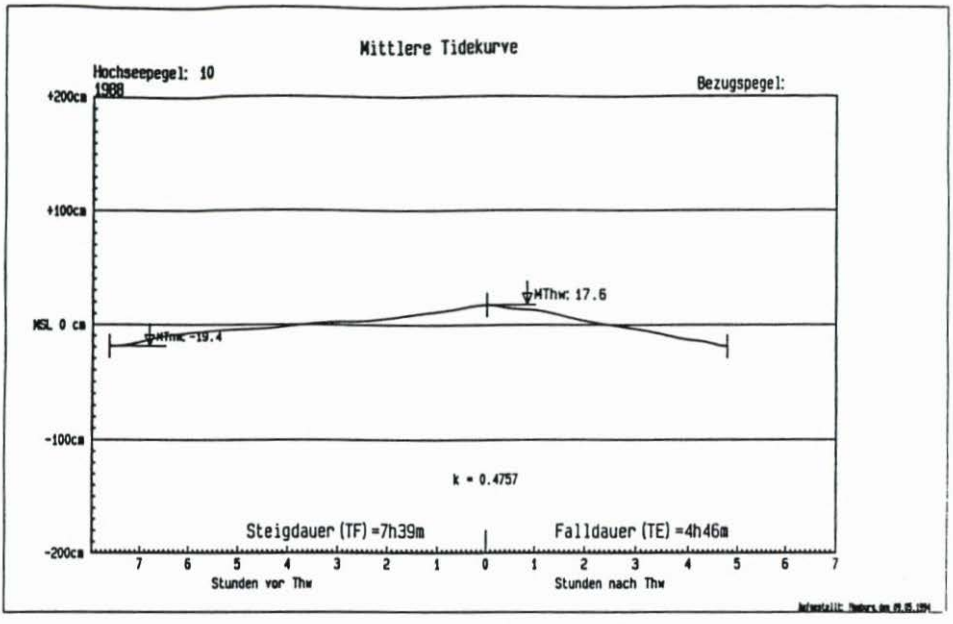


Abb. 14: Hochseepegel 10/88 (Scheitelhöhen bezogen auf MSL)

4.3 Knotenbereich der natürlichen Tide

Ein Nachweis, ob der nach klassischen hydrodynamischen Interpolationsmethoden ermittelte Knotenbereich der M 2-Amphidromie in Größe und geographischer Lage mit der Natur übereinstimmt, hat in der Vergangenheit aus verschiedenen Gründen – u. a. wegen hohen meßtechnischen Aufwandes – nicht stattgefunden. Die Möglichkeit, den Knotenbereich in der Nordsee zu dokumentieren, läßt sich z.Zt. nur aus dem Kenntnisstand physikalischer und hydrodynamischer Gesetzmäßigkeiten der Gezeiten im Bereich der Amphidromie herleiten, d.h. die Gezeitenverhältnisse in der Natur müssen im Bereich der Amphidromie vorhanden sein. Ein erster Versuch in diese Richtung – auch durch einen Vergleich mit den Angaben von MÖLLER (1933) – wurde von LASSEN und SIEFERT (1989) unternommen, aber noch als unbefriedigend empfunden. Auch aus diesem Grunde konzentrieren sich die Hochseepegelaktivitäten des BSH 1988 mit auf die Bestimmung der Gezeitenverhältnisse in und um den vorberechneten Knotenbereich derAmphidromie. Von den hier ausgelegten Hochseepegeln 10/88, 9/88 und 8/88 konnte der letztere nicht geborgen werden. Von besonderer Bedeutung sind die Gezeitenbeobachtungen des Hochseepegels 9/88 zum Nachweis der südöstlichen Nordsee-Amphidromie. In den Tideaufzeichnungen sind die periodischen Schwingungen der M 2-Gezeit, der wichtigsten Partialtide, nicht mehr enthalten (Abb. 15). Es lassen sich nur Perioden der Mondtide M 4 herausfiltern. Schwankungen der Meeresoberfläche um ca. 20 cm rühren hauptsächlich von meteorologischen Einwirkungen her und haben kaum etwas mit Gezeitenbewegungen zu tun. Das Resultat dieser komplizierten Aufgabe ist insofern aufschlußreich, weil es mit den getroffenen Aussagen erstmals die Existenz des Knotenbereiches in der berechneten Lage nachweist.

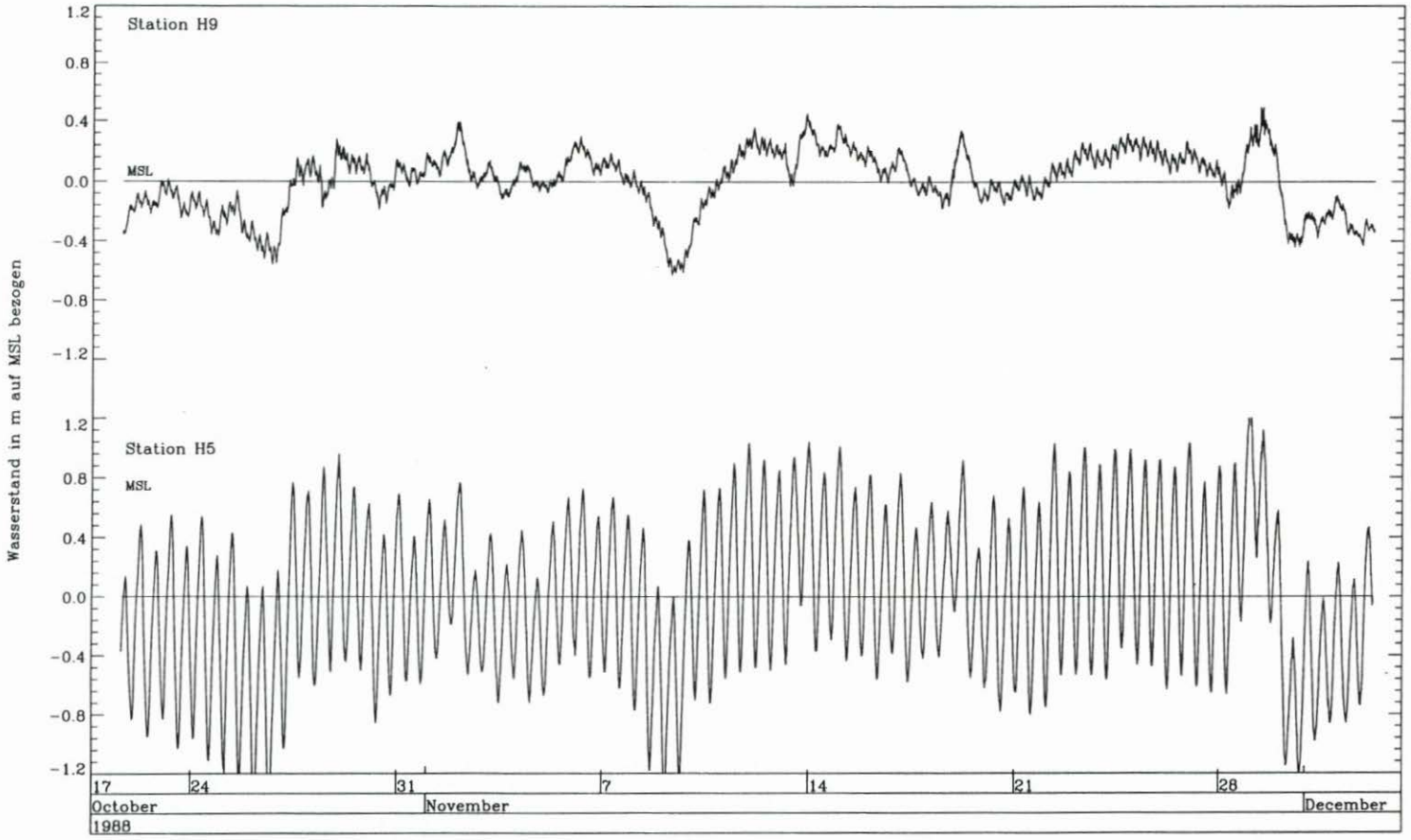


Abb. 15: Gezeitenverlauf im Knotenbereich der Amphidromie bei der Hochseepegelstation 9/88 im Vergleich zur Hochseepegelstation 5/88

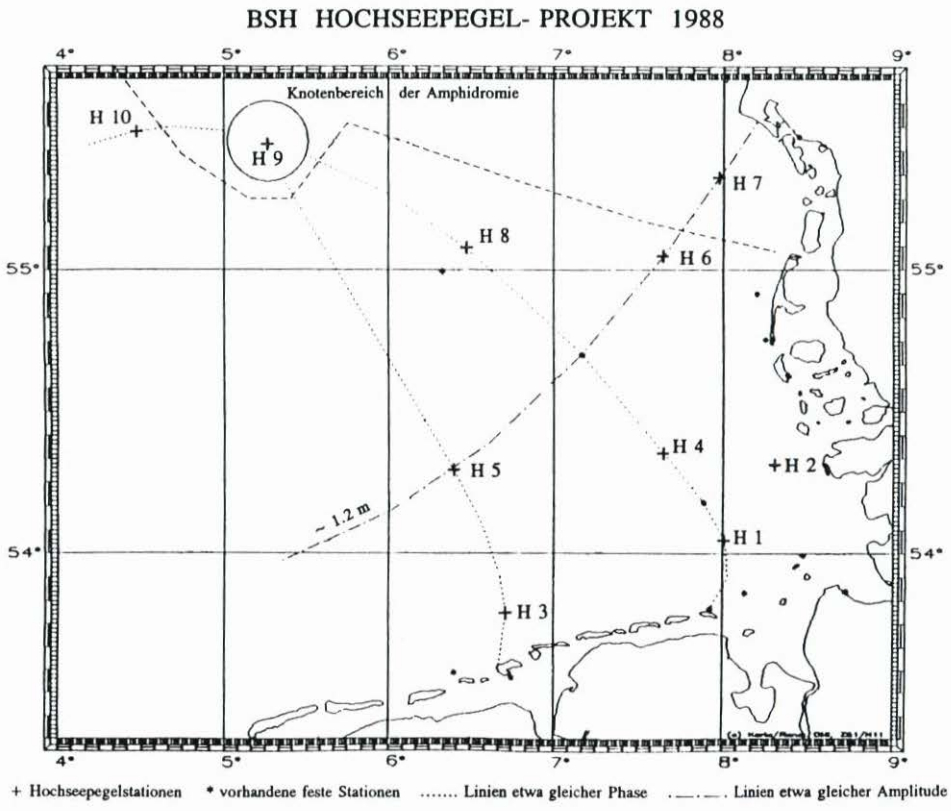


Abb. 16: Darstellung ausgewählter Linien gleicher Amplitude und Phase

Merkliche Gezeitenerscheinungen lassen sich erst wieder bei den Stationen der Hochseepegel 10/88, 8/78 und 6/79 (Abb. 12 bis 14), etwa 60 km westlich und 40 km südöstlich der Station 9/88, mit mittleren Tidehüben von etwa 35 cm nachweisen. Eine Zusammenfassung der aus den Tidedaten der drei Stationen entwickelten Parameter MThw, MTnw (bezogen auf den örtlichen MSL), MThb, Steig- und Falldauern (TF, TE) und die Quotienten TF/TE enthält Anh. B.

4.4 Mittlere Tidehöhen und -eintrittszeiten

Zur Prüfung der bislang bestimmten Linien gleicher Amplitude und Phase der Gezeit 84 wurden im gen. Meßprogramm 1988/92 Hochseepegel auf einer Linie etwa gleichen Springtidehubes und einer Linie etwa gleicher Phase der Gezeit 84 ausgelegt: Die Hochseepegel 7/88, 6/88, bei der FPN 88, 92 und 5/88, 92 auf einer vorgegebenen Springtidehublinie und die Hochseepegel 1/88, Pegel Helgoland, 7/81, 4/88, 92 und 7/88 auf einer Linie gleicher Phase zum Pegel Helgoland (Abb. 16). Bei den Gezeitenanalysen zeigte sich vor dem Wattsockel des Elbe-Weser-Mündungsbereiches eine weitere Meßlinie gleichen mittleren Tidehubes (Pegel 10/81, 2/88, 1/88 und 4/81, 11/81). Im einzelnen ergab dies:

Hochseepegelorte von Esbjerg bis 54°N und 6°E auf einer Linie gleicher Amplitude (Höhen bezogen auf MSL)

Pegel	MThw	MTnw	MThb
7/88	57 cm	– 74 cm	131 cm
6/88	56 cm	– 71 cm	127 cm
FPN 88, 92	62 cm	– 64 cm	126 cm
5/88, 92	62 cm	– 69 cm	131 cm

Hochseepegelorte vor dem Elbe-Weser-Mündungsbereich auf einer Linie gleicher Amplitude (Höhen bezogen auf MSL)

Pegel	MThw	MTnw	MThb
10/81, 2/88	123 cm	– 143 cm	266 cm
1/81	122 cm	– 136 cm	258 cm
4/81, 11/81	122 cm	– 134 cm	258 cm

Eintrittszeitdifferenzen in Minuten gegen Pegel Helgoland

Pegel	dZF	dZE
1/88	7	6
Helgoland	0	0
7/81	-2	-5
4/88, 92	-6	-5
FPN 88, 92	-8	-10
8/78, 6/79	-3	**-65**
1/81, 2/81	**-65**	8

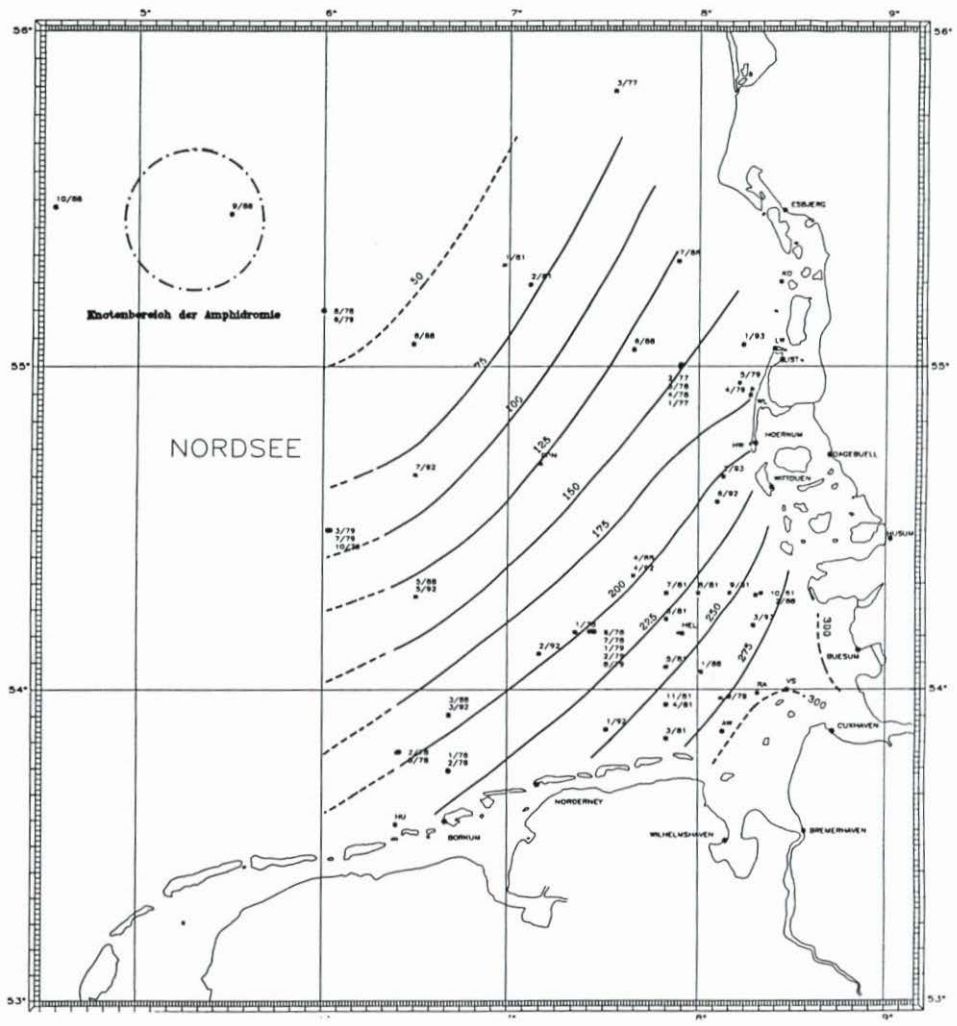


Abb. 17: Linien gleicher mittlerer Tidenhöhe in cm, in Abständen von 25 cm

Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen damit weitgehend die Darstellungen der Partialtiden M 2 und S 2 in Anh. D. Weiterhin liegen die vier ausgewählten Hochseepegelstationen auf einer Linie gleichen mittleren Tidehubes von rd. 130 cm, d.h. die Linienstruktur der Gezeit 84 stimmt mit der Wirklichkeit hinreichend überein. Im Elbe-Weser-Mündungsbereich liegen 3 weitere Hochseepegelorte auf einer Linie gleichen MThb von etwa 260 cm und bestätigen auch hier die Geometrie der Linien gleichen Springtidehubes.

Abb. 17, 18 und 19 zeigen für den Tiefwasserbereich der südöstlichen Nordsee die Entwicklung von MThw, MTnw und MThb vom Scheitelbereich der Amphidromie bis zur seewärtigen Grenze des Küstenvorfeldes. Die Isohypsen lassen einen kontinuierlichen Ablauf erkennen: Sie steigen bzw. fallen gleichmäßig in südöstlicher Richtung, wobei MThw bis auf 140 cm über MSL ansteigt, während MTnw auf 150 cm unter MSL fällt und MThb bis zum Wattsockel auf 275 cm zunimmt. Andererseits wird deutlich, daß die natürlichen Tidever-

Die Küste, 58 (1996), 109-160

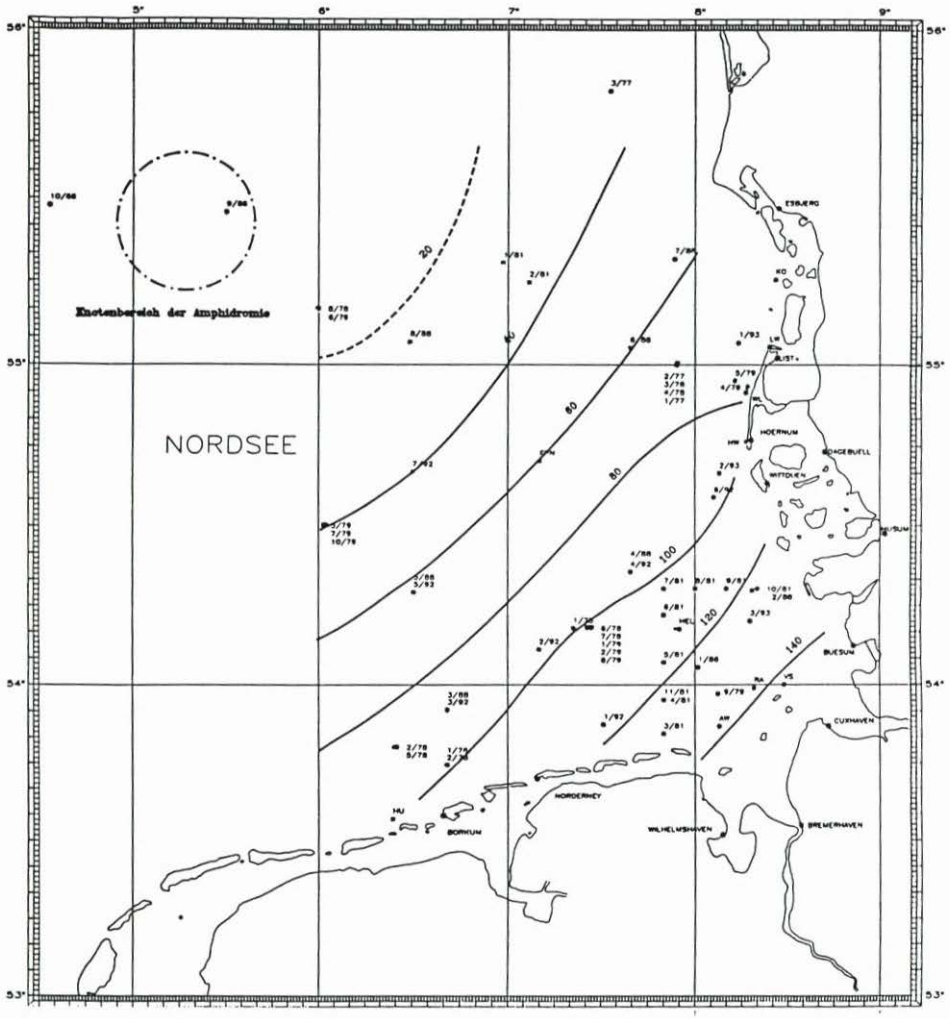


Abb. 18: MThw über örtlichem mittleren Meeresspiegel in cm

hältnisse nur verschwommen einen Knotenbereich zeigen, der sich zudem über den M 2- und S 2-Knoten nach ONO zu erstrecken scheint.

Die Genauigkeitsabschätzung der Anordnung von Linien gleichen Hochwasser- und Niedrigwasserzeitunterschiedes der beiden wichtigsten Partialtiden gegen den Durchgang des Mondes durch den Meridian von Greenwich bezieht sich auf eine Linie gleicher Tidephase durch den Pegel Helgoland bis zum Mittelpunkt dieser Amphidromien. Alle Eintrittszeitdifferenzen der auf dieser vorgegebenen Linie ausgelegten Hochseepegel müssen zum Pegel Helgoland in Nullphase stehen. Aufgrund der kleinen dZF-Phasenabweichungen ist davon auszugehen, daß die Linien gleichen mittleren Hochwasserzeitunterschiedes gegen

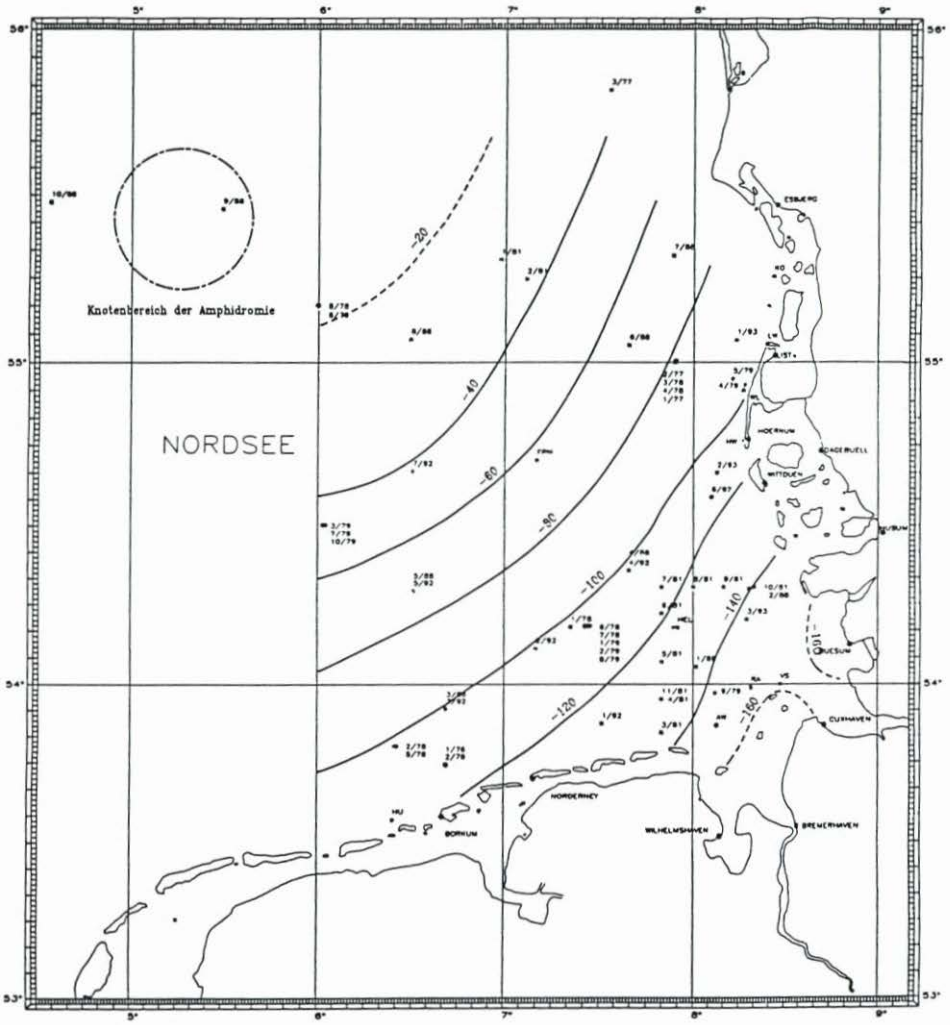


Abb. 19: MTnw unter örtlichem mittleren Meeresspiegel in cm

den Durchgang des Mondes durch den Nullmeridian der Gezeiten mit der natürlichen Tide angenähert übereinstimmen. In Abb. 20 ist für die südöstliche Nordsee eine dZF-Linienstruktur in NW-SO-Richtung erkennbar, die etwa ab der FPN einen mehr westlichen Verlauf zur Amphidromie einnimmt. Im Bereich der Elbe-Weser-Mündung macht sich eine Zeitverzögerung durch die Füllung der Ästuare im Linienverlauf bemerkbar.

Auch vor der Insel Sylt machen sich Abweichungen vom allgemeinen Hochwasserlinienverlauf bemerkbar. Vor der Insel haben sie anfangs eine mehr nördliche Richtung, um später mit einer westlichen Richtung auf die Amphidromie abzuschwenken. Einzelheiten zum Verlauf der dZF-Linien vor Sylt konnten in dieser großräumigen Gezeitenanalyse nicht herausgearbeitet werden. Siehe dazu auch die Ausführungen bei LASSEN u. SIEFERT (1991).

Die Küste, 58 (1996), 109-160

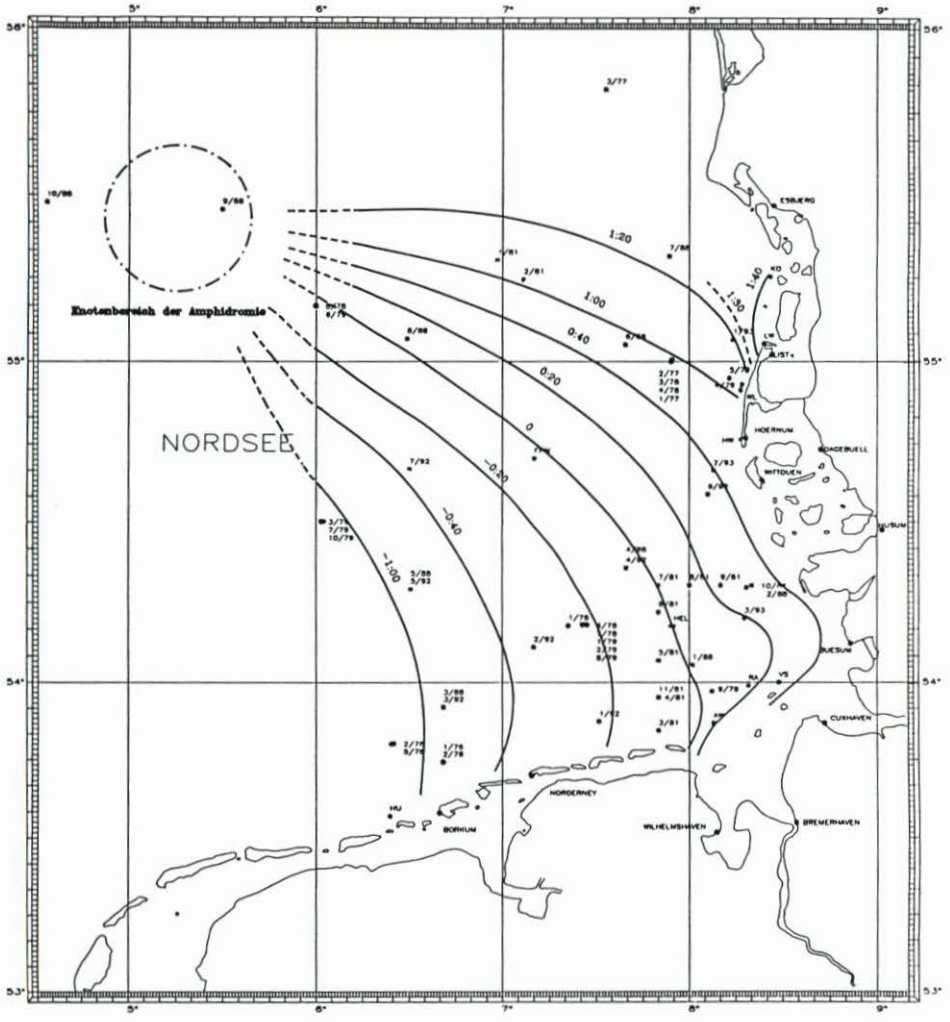


Abb. 20: Linien gleichen mittleren Hochwasserzeitunterschiedes (dZE) gegen Helgoland in Stunden und Minuten (h : m)

Aus Abb. 21 ist ersichtlich, daß bei dZE von einer Übereinstimmung mit der Nullphase nur südlich der FPN auszugehen ist. Die positiven dZE-Linien nehmen ab hier nach einer anfänglichen NW-SO-Richtung einen nördlichen Verlauf, ohne daß in diesem Kartenausschnitt eine Richtungsänderung zum Knotenpunkt der M 2- und S 2-Amphidromien erkennbar ist. Dies bestätigen die dZE-Abweichungen der Hochseepegel 8/78, 6/79 und 1/81, 2/81 von der Nullphase mit –65 und +8 Minuten. Für die negativen dZE-Linien bis 1 h vor Helgoland ist nach einer NNW-SSO-Richtung ab 55°N eine Richtungsänderung erkennbar. Die Darstellungen der Linien gleicher mittlerer Niedrigwasserzeitunterschiede gegen den Durchgang des Mondes durch den Nullmeridian für die M 2 und S 2 der Gezeit 84 werden somit für den Bereich des vorliegenden Kartenausschnittes der Abb. 21 nicht bestätigt.

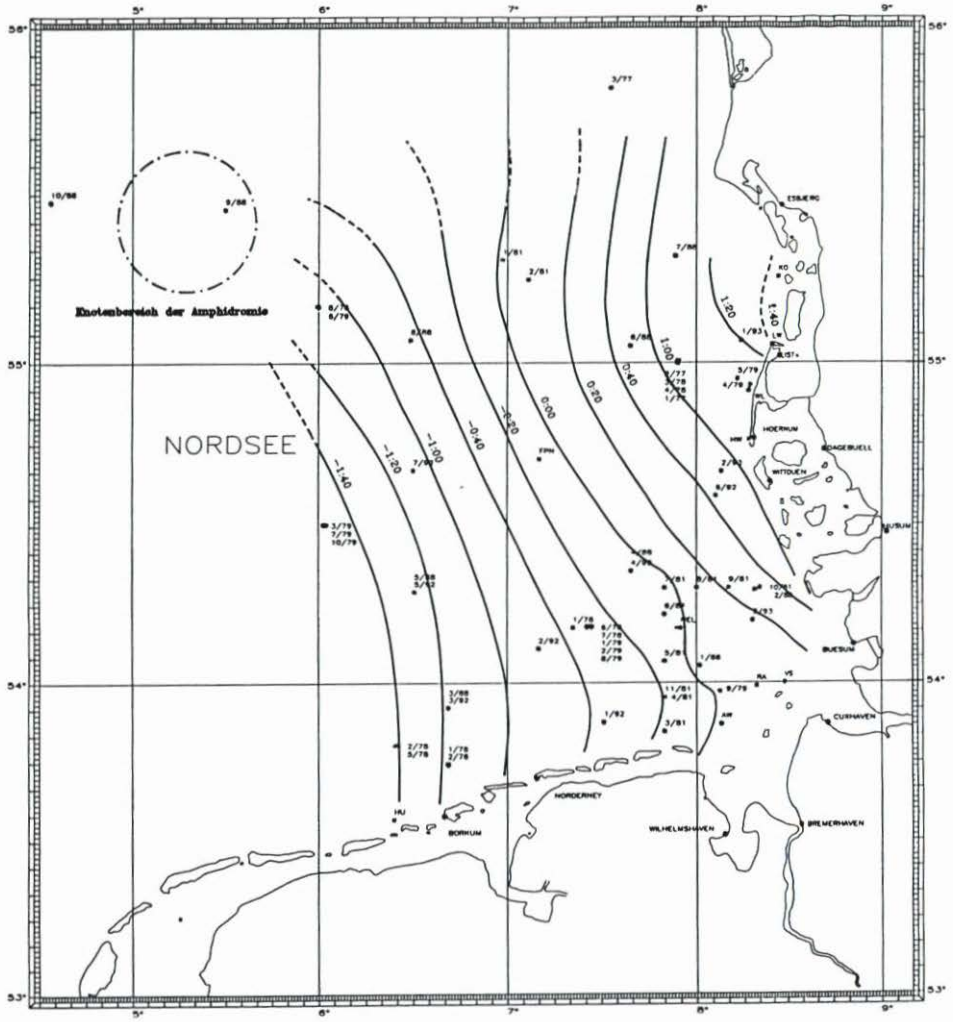


Abb. 21: Linien gleichen mittleren Niedrigwasserzeitunterschiedes (dZE) gegen Helgoland in Stunden und Minuten (h:m)

4.5 Mittlere Verhältnisse von Steig- und Falldauern

Im allgemeinen laufen die Steig- (TF) und Falldauern (TE) auch im Tiefwasserbereich der Nordsee in unterschiedlichen Variationen ab (Abb. 22 bis 24). So ist das Verhältnis TF/TE draußen in der Nordsee keineswegs großräumig etwa 1. Es liegt in einer breiten Zone nördlich 55° deutlich darüber, d. h. die Steigdauern halten länger an als die Falldauern.

Im Bereich nordwestlich von Sylt lassen die 10 Min.-Intervalle der TF- und TE-Darstellungen auf Abb. 22 und 23 einen sehr engen Linienabstand erkennen, d.h. hier vollzieht sich die Änderung von TF/TE (1,15 auf 0,85) auf einer wesentlich kleineren Entfernung als südlich davon. Westlich der FPN bis zu den Nordfriesischen Inseln und von Helgoland bis

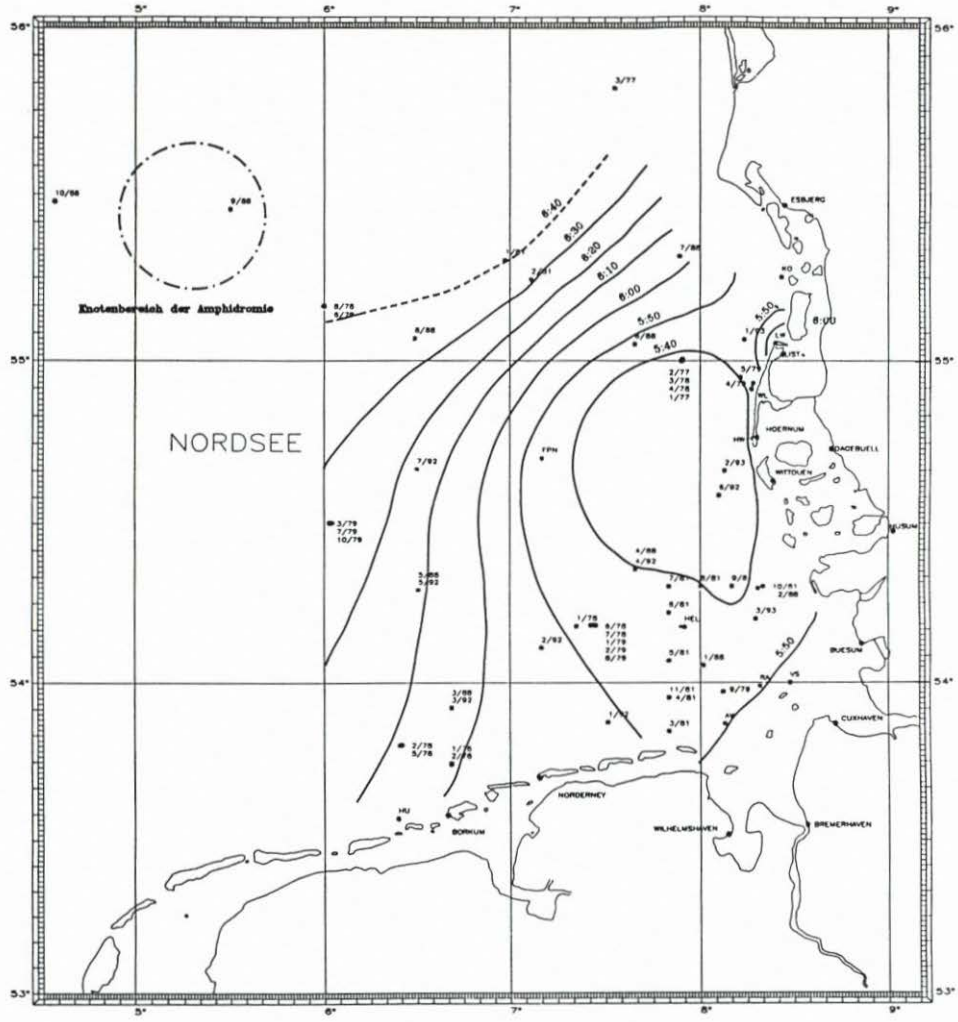


Abb. 22: Linien gleicher mittlerer Steigdauer (TF) in Stunden und Minuten (h:m), in Abständen von 10 Minuten

55°N erstreckt sich eine Zone mit längeren Ebbedauern gegenüber den Flutdauern. TF/TE liegt hier zwischen 0,85 und 0,80. Vor der Insel Sylt sind die lokalen Feinstrukturen von Linien gleicher Flut- bzw. Ebbedauer sowie deren Verhältnisse sehr kompliziert. Sie können aufgrund des Kartenmaßstabes nur generalisiert wiedergegeben werden.

Dennoch wird an der Tatsache, daß in der ganzen nördlichen Deutschen Bucht TF/TE < 0,85 ist und gleichzeitig in einer breiten Zone westlich und östlich des M 2- und S 2-Knoten TF/TE > 1,15 ist, der komplexe Ablauf der normalen Tide deutlich, der nicht einfach mit einer Amphidromie beschreibbar ist.

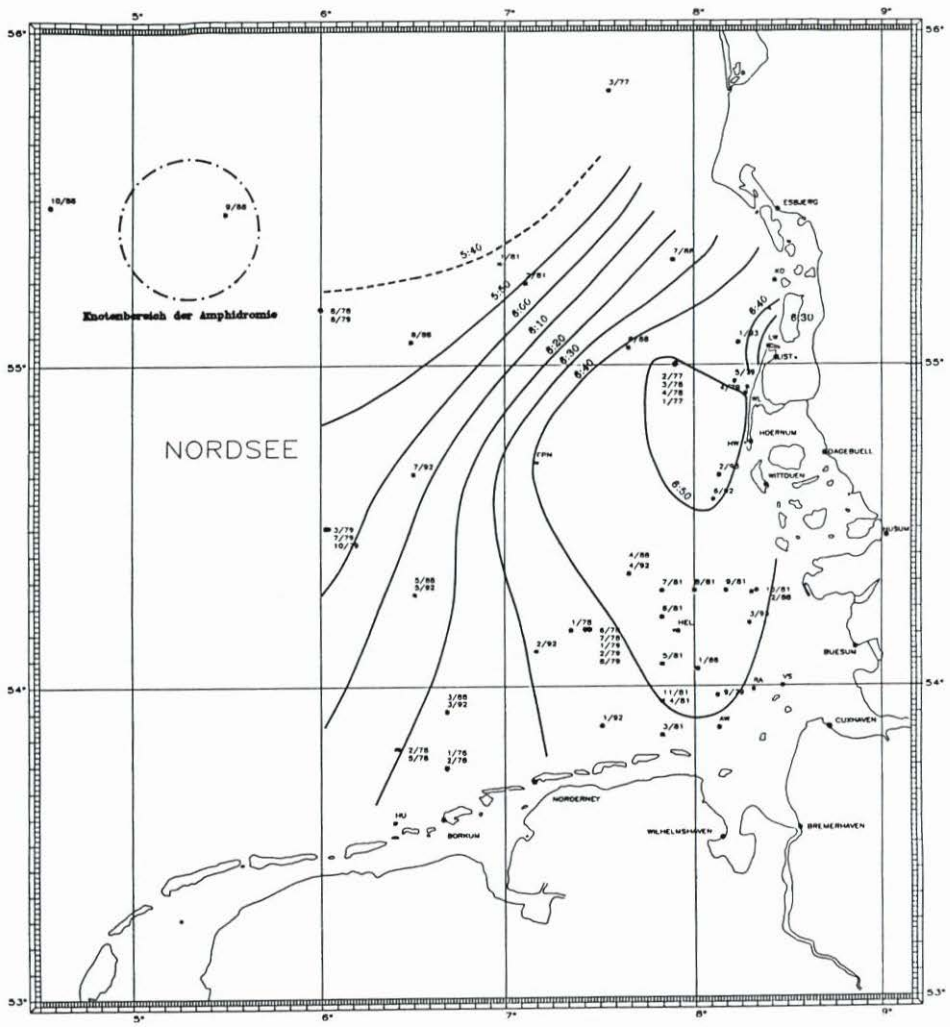


Abb. 23: Linien gleicher mittlerer Falldauer (TE) in Stunden und Minuten (h:m), in Abständen von 10 Minuten

5. Ausblick

Als Ergebnis dieser Arbeit wird eine zuverlässige Wiedergabe der Gezeitenverhältnisse im freien Meer der südöstlichen Nordsee aus Ergebnissen von Hochseepegelmessungen vorgestellt. Die Lösung des Problems hängt entscheidend von der Meßgenauigkeit, der Auswertegenauigkeit und der Datendichte ab. Aus den mehrfachen unabhängigen Gezeitenbeobachtungen abgeleitete Mittelwerte lassen bei Gegenüberstellung keine Abweichungen erkennen, was auf eine zuverlässige Gezeitenerfassung der Hochseepegel und der Auswertemethode sowie auf eine stabile Gezeitengeometrie hindeutet. Zu einem Gezeitenvergleich und zur kartographischen Gezeitendarstellung der vorliegenden Daten stellt sich die Frage nach einer Referenzfläche für höhenabhängige Gezeitenparameter. Durch die Einbeziehung

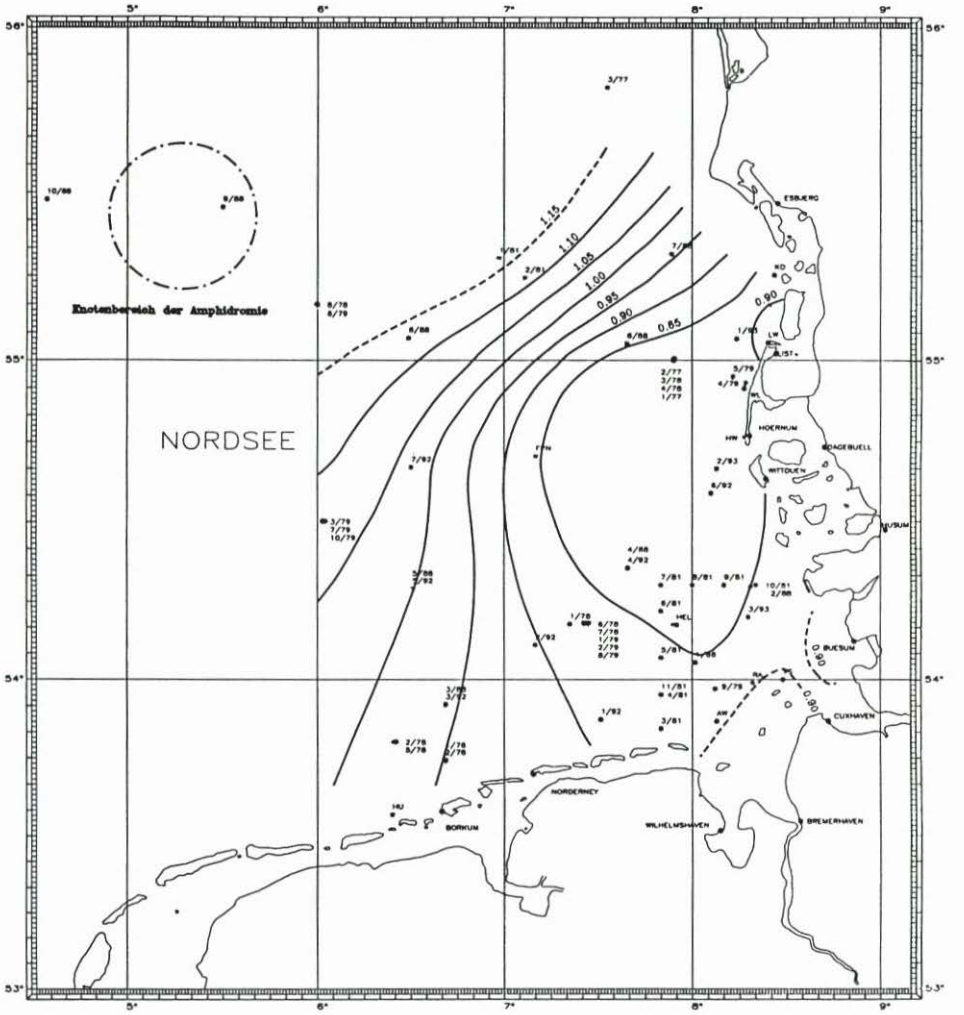


Abb. 24: Linien gleicher mittlerer Verhältnisse von Steig- zu Falldauer (TF/TE)

des Pegels Forschungsplattform Nordsee in die GPS-Messungen „Präziser Höhenanschluß des Pegels Helgoland" (Institut für Erdmessung der Univ. Hannover) ist es naheliegend, die zeitlichen mittleren Meeresspiegelhöhen (MSL) beider Pegel dahingehend zu vergleichen, ob sie auf gleicher NN-Höhe liegen. Aus den umfangreichen Messungen und Auswertungen ist eine Übereinstimmung der MSL-Höhen in NN für den seewärtigen Bereich der südöstlichen Nordsee herzuleiten. Zur realistischen Schätzung der höhenabhängigen Gezeitenparameter kann damit MSL als großflächige homogene Bezugsfläche eingeführt werden, wobei zu bedenken ist, daß MSL eine relative Referenzfläche darstellt, deren Höhe im wesentlichen von den meteorologischen Einwirkungen auf Wasserstände abhängig ist. Daher sind bei Hochseepegelmessungen Vergleichsmessungen zu einem Bezugspegel (etwa Helgoland) erforderlich, um zeitliche MSL-Höhen auf NN zu beziehen. Damit gibt es die Möglichkeit, Wasserstände der südöstlichen Nordsee mit hinreichender Genauigkeit im Höhensystem der Landesaufnahme (NN bzw. PN) anzugeben.

Natürlich bleiben nach dieser Gezeitenanalyse aufgrund des verhältnismäßig kleinen Untersuchungszeitraumes für den Meeresbereich der südöstlichen Nordsee noch eine Vielzahl von Fragestellungen zur Gezeitenentwicklung, die noch gelöst werden sollten. So ist z.B. der Gezeitenablauf vor der Insel Sylt augenscheinlich starken Änderungen unterworfen, worauf die starken Richtungsänderungen der Zeit- und Höhenlinien hindeuten. Zur fundierten Beurteilung des Gezeitenablaufs vor der Insel sollten weit vor der Küste zusätzliche Hochseepegelmessungen angestrebt werden.

Es sollte nicht unerwähnt bleiben, daß sich aus dieser Analyse und der kartographischen Darstellung der Flut- und Ebbedauern für den Bereich um 55°N und 7°E ein sehr enger Linienabstand der 10 Minuten-Zeitintervalle gegenüber der großräumigen Zeitliniendarstellung ergibt, d.h. der Übergang von längerer Flutdauer und kurzer Ebbedauer zur kürzeren Flutdauer und längeren Ebbedauer vollzieht sich im Analysebereich nicht gleichmäßig. Eine Ursachenanalyse für diese Anomalie in der Gezeitengeometrie könnte zur benötigten Information führen. Im Rahmen der hier behandelten Gezeitenbetrachtungen sollten noch weitere Hochseepegelmessungen zur Verdichtung des vorhandenen Datenmaterials im nördlichen Bereich ermöglicht werden.

6. Danksagung

Dem ALW Husum sei für die Überlassung ergänzender Hochseepegelmessungen gedankt. Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Oz. Annutsch für Denkanstöße und Anregungen zur Gezeitenthematik.

Die Küste, 58 (1996), 109-160

7. Schriftenverzeichnis

DEFANT, A.: Die Gezeiten der Nordsee, Beobachtungen und Theorie. Ann. der Hydr., H. 8, 1923.

DEFANT, A.: Ebbe und Flut des Meeres, der Atmosphäre u. Erdfeste. Verständliche Wissenschaft, Bd. 49, Berlin, 1953.

Dietrich, G.: Ozeanographische-meteorologische Einflüsse auf Wasserstandsänderungen des Meeres am Beispiel der Pegelbeobachtungen von Esbjerg. DHZ, 1952.

HANSEN, W.: Theorie zur Errechnung des Wasserstandes und Strömungen in Randmeeren nebst Anwendungen. Tellus, Nr. 3, 1956.

LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. Die Küste, H. 50, 1989.

LASSEN, H. u. SIEFERT, W.: Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee - säkulärer Trend Verhältnisse um 1980. Die Küste, H. 52, 1991.

LISITZIN, E.: Sea Level Changes. Elsevier Oceanography Series 8, Elsevier Scient. Publ. Comp., New York, 1974.

LOHRBERG, W.: Pegel Nullpunkt Helgoland, DGM. 31, H. 4, 1987.

LÜDERS, K.: Über die Genauigkeit verschiedener Verfahren zum Entwerfen mittlerer Tidekurven. Neues Archiv für Niedersachsen, H. 5, 1978.

MÖLLER, L.: Das Tidegebiet der Deutschen Bucht 1933. Veröffentlichungen des Institutes für Meereskunde, geographisch naturwissenschaftliche Reihe, H. 232, 1933.

RHODE, H.: Die Pegel auf Helgoland. Die Küste, H. 49, 1990.

ROSSITTER, J. R.: An analysis of annual sea level variations in European waters. Geophys. J. R. Astr. Soc., Vol. 12, 1967.

THORADE, H.: Ebbe und Flut. Ihre Entstehung und ihre Wandlungen. Verständliche Wissenschaft, Bd. 46, Berlin, 1941.

Torge, W.: Von der mitteleuropäischen Gradmessung zur Int. Ass. für Geodäsie, Zeitschrift f. Vermessungswesen, H. 12, 1993.

Uni Hannover: Präziser Höhenanschluß des Pegels Helgoland. Schlußbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben. Institut für Erdmessung.

WIESE, H.-W.: Messungen der Wasserstände in der Deutschen Bucht während DEBEX '81. Erste Ergebnisse mit neuen Hochseepegeln. Intermaritec, 1982.

Ehem. Marine Observatorium Wilhelmshaven: Gezeitendarstellungen.

Die Küste, 58 (1996), 109-160

Anhang A

Stationsverzeichnis der Hochsee- und Küstenpegel (1)

1 Jahr, ausführende Dienststelle	2 Stationsbezeichnung des Datenhalters (entspricht teilw. der Gerätenummer)	3 entsprechende Stationsbezeichnung in diesem Bericht	4 geographische Koordinaten- Breite (N)			Länge (E)		
			°	'	"	°	'	"
1976								
BSH	402	1/76	53	44	30	6	41	06
BSH	406	2/76	53	44	24	6	40	54
1977								
BSH	406	1/77	54	59	42	7	54	12
BSH	407	2/77	54	59	42	6	54	06
BSH	409	3/77	55	49	00	7	33	00
1978								
BSH	400	1/78	54	10	30	7	21	00
BSH	401	2/78	53	48	00	6	25	12
BSH	402	3/78	54	59	48	7	54	00
BSH	403	4/78	55	00	10	7	54	12
BSH	404	5/78	53	47	54	6	24	30
BSH	405	6/78	54	10	36	7	27	00
BSH	406	7/78	54	10	24	7	27	06
BSH	408	8/78	55	09	48	5	59	42
1979								
BSH	404	1/79	54	10	36	7	25	36
BSH	405	2/79	54	10	36	7	25	36
BSH	406	3/79	54	30	00	6	02	24
BSH	407	4/79	54	55	42	8	18	54
BSH	409	5/79	54	56	30	8	12	30
BSH	410	6/79	55	09	48	6	00	00
BSH	411	7/79	54	30	00	6	01	42
BSH	412	8/79	54	10	48	7	25	36
BSH	413	9/79	53	58	06	8	07	12
BSH	414	10/79	54	30	00	6	01	30
1981								
BSH	400	1/81	55	18	00	6	58	20
BSH	401	2/81	55	14	30	7	50	10
DEBEX 81	Jade Tonne	3/81	53	50	30	7	50	00
DEBEX 81	Schlüsseltonne	4/81	53	57	00	7	50	00
DEBEX 81	Helgoland S	5/81	54	04	00	7	50	00

1	2	3	4					
			°	'	"	°	'	"
DEBEX 81	Helgoland NW	6/81	54	13	00	7	50	00
DEBEX 81	Helgoland N	7/81	54	18	00	7	50	00
DEBEX 81	Steingrund NW	8/81	54	18	00	8	00	00
DEBEX 81	Steingrund NO	9/81	54	18	00	8	10	00
DEBEX 81	Süderhever	10/81	54	18	00	8	20	00
BSH	Schlüsseltonne (H13)	11/81	53	57	00	7	50	00
1988								
BSH	H 01	1/88	54	03	05	8	00	54
BSH	H 02	2/88	54	17	36	8	18	22
BSH	H 03	3/88	53	55	04	6	41	05
BSH	H 04	4/88	54	21	12	7	39	28
BSH	H 05	5/88	54	17	20	6	30	29
BSH	H 06	6/88	55	02	49	7	39	18
BSH	H 07	7/88	55	18	47	7	53	26
BSH	H 08	8/88	55	03	51	6	29	19
BSH	H 09	9/88	55	27	11	5	29	52
BSH	H 10	10/88	55	28	30	4	33	24
1992								
BSH	H 13	1/92	53	52	16	7	30	48
BSH	H 14	2/92	54	06	27	7	09	57
BSH	H 03	3/92	53	55	07	6	41	40
BSH	H 04	4/92	54	21	09	7	39	18
BSH	H 05	5/92	54	17	30	6	30	36
BSH	H 15	6/92	54	35	11	8	05	56
BSH	H 07	7/92	54	40	04	6	30	03
1993								
ALWHus	Lister Tief	1/93	55	03	44	8	14	04
ALWHus	Amrum Bank	2/93	54	39	46	8	07	43
ALWHus	Piep	3/93	54	11	51	8	17	39
WSA Tön	Helgoland	HEL	54	10	50	7	53	27
WSA Bhv	L.T. Alte Weser	AW	53	51	54	8	07	43
WSA Cux	Radarbake A	RA	53	59	10	8	18	58
WSA Cux	LT. Gr. Vogelsand	VS	53	59	50	8	28	40
RF	Forschungs-Plattform Nordsee	FPN	54	42	06	7	10	10
ALWHus	Westerland	WL	54	54	37	8	16	20
ALWHus	List/West	LW	55	03	26	8	24	13
ALWHus	Hörnum West	HW	54	45	36	8	16	32
NL	Huibertgat	HU	53	14	30	6	23	56
DK	Korresand	KO	55	14	30	8	26	00
WSA Tön	Wittdün	Wittdün	54	38	01	8	23	07
WSA Tön	Hörnum	Hörnum	54	45	35	8	17	55
WSA Tön	List	List	55	01	07	8	26	29

Abkürzungsverzeichnis der ausführenden Dienststellen

Abkürzung	Ausführende Dienststelle	
BSH	Bundesamt für Seeschiffahrt u. Hydrographie	
WSA Tön	Wasser- und Schiffahrtsamt	Tönning
WSA Bhv	– " –	Bremerhaven
WSA Cux	– " –	Cuxhaven
WSA Hus	Amt für Land- und Wasserwirtschaft	Husum
NL	Niederla Rijkswaterstaat	
DK	Dänemark „Kystinspektoradet"	Lemwig
RF	Reederei gemeinschaft. Forschungsschiffahrt	Bremen
DEBEX 81	Deutsche Bucht Experimente 81	

Die Küste, 58 (1996), 109-160

Anhang B

Tabellarische Zusammenstellung der Tidedaten

1	2	3	4	5		6	7	
Pegel	MThb	MThw über MSL	MTnw unter MSL	Steig- und Falldauer TF	TE	TF/TE	Eintrittszeitdifferenz gegen Helgoland dZF	dZE
	cm	cm	cm	h : m	h : m		h : m	h : m
1976								
1/76	215	101	–114	06:02	06:23	0,95	–01:03	–01:32
2/76	208	96	–112	06:03	06:22	0,95	–00:43	–01:02
1977								
1/77	146	65	–81	05:26	06:59	0,78	00:57	01:11
2/77	148	65	–83	05:34	06:51	0,81	01:00	01:06
3/77	71	35	–36	06:54	05:31	1,25	01:47	00:33
1978								
1/78	198	96	–102	05:49	06:36	0,88	–00:26	–00:34
2/78	193	88	–105	06:04	06:21	0,96	–01:12	–01:35
3/78	150	66	–84	05:39	06:46	0,83	01:04	01:05
4/78	151	67	–84	05:31	06:54	0,80	00:57	01:06
5/78	199	91	–108	06:07	06:18	0,97	–01:26	01:52
6/78	208	102	–106	05:43	06:42	0,85	–00:21	–00:24
7/78	202	99	–103	05:45	06:40	0,86	–00:23	–00:22
8/78	32	15	–17	06:42	05:43	1,17	–00:02	–01:04
1979								
1/79	210	103	–107	05:50	06:35	0,89	–00:18	–00:28
2/79	233	114	–119	05:48	06:37	0,88	–00:18	–00:26
3/79	88	40	–48	06:28	05:57	1,09	–01:06	–01:59
4/79	173	75	–98	05:34	06:51	0,81	00:52	00:58
5/79	170	76	–94	05:40	06:45	0,84	01:06	01:06
6/79	33	14	–19	06:41	05:44	1,17	–00:05	–01:06
7/79	87	39	–48	06:29	05:56	1,09	–01:12	–02:02
8/79	200	98	–102	05:48	06:37	0,88	–00:12	–00:20
9/79	268	126	–142	05:44	06:41	0,86	00:05	00:01
10/79	89	41	–48	06:25	06:00	1,07	–01:11	–02:01
1981								
1/81	65	31	–34	06:43	05:42	1,18	01:12	00:08
2/81	74	35	–39	06:34	05:51	1,12	01:04	00:08
3/81	265	128	–137	05:41	06:44	0,84	–00:12	–00:13
4/81	258	123	–135	05:45	06:40	0,86	–00;20	–00:25
5/81	243	114	–129	05:45	06:40	0,86	–00:03	–00:08
6/81	226	107	–119	05:43	06:42	0,85	–00:01	–00:04
7/81	218	102	–116	05:43	06:42	0,85	–00:02	–00:05
8/81	232	107	–125	05:41	06:44	0,84	00:02	00:11
9/81	243	111	–132	05:37	06:48	0,83	00:28	00:23
10/81	265	122	–143	05:44	06:41	0,86	00:34	00:30
11/81	260	126	–134	05:44	06:41	0,86	00:10	–00:14

Die Küste, 58 (1996), 109-160

Fortsetzung Anhang B

Tabellarische Zusammenstellung der Tidedaten

1	2	3	4	5		6	7	
Pegel	MThb	MThw über MSL	MTnw unter MSL	Steig- und Falldauer TF	TE	TF/TE	Eintrittszeitdifferenz gegen Helgoland dZF	dZE
	cm	cm	cm	h : m	h : m		h : m	h : m
1988								
1/88	258	122	–136	05:43	06:42	0,85	00:07	00:06
2/88	267	124	–143	05:47	06:38	0,87	00:25	00:19
3/88	190	89	–101	06:01	06:24	0,94	–00:56	–01:16
4/88	200	96	–104	05:43	06:42	0,85	–00:04	–00:05
5/88	132	63	–69	06:12	06:13	1,00	–00:54	–01:25
6/88	127	56	–71	05:44	06:41	0,86	–	–
7/88	131	57	–74	06:02	06:23	0,95	01:33	01:12
8/88				keine Tideerfassung				
9/88				Bereich der Amphidromie				
10/88	37	18	–19	07:39	04:46	1,61	–05:15	–07,08
1992								
1/92				keine Tideerfassung				
2/92	192	92	–100	05:53	06:32	0,90	–00:37	–00:46
3/92	188	88	–100	06:03	06:22	0,95	–00:48	–01:10
4/92	190	89	–101	05:39	06:46	0,83	–00:08	–00:05
5/92	131	62	–69	06:15	06:10	1,02	–00:57	–01:28
6/92	212	96	–116	05:33	06:52	0,81	00:30	00:39
7/92	78	38	–40	06:16	06:07	1,03	–00:42	–01:16
1993								
1/93	174	74	–100	05:42	06:43	0,85	01:08	01:08
2/93	211	97	–114	05:35	06:50	0,82	00:36	00:46
3/93	272	128	–144	05:44	06:41	0,86	0:17	00:14
HEL	238	113	–125	05:42	06:43	0,85	00:00	00:00
AW	284	136	–148	05:50	06:35	0,89	00:20	00:08
RA	285	136	–149	05:48	06:37	0,88	00:15	00:06
FPN	126	62	–64	05:42	06:43	0,85	–00:08	–00:10
WL	180	79	–101	05:36	06:49	0,82	00:59	01:08
VS	296	142	–154	05:56	06:29	0,92	00:30	00:15
HW	196	90	–106	05:40	06:45	0,84	00:51	01:03
HU	216	98	–118	06:00	06:25	0,94	01:53	02:08
KO	162	70	–92	05:36	06:49	0,82	01:35	01:41
Wittdün	263	118	–145	05:44	06:41	0,85	01:31	01:29
Hörnum	202	90	–112	06:20	06:05	1,04	02:13	01:35
List	179	80	–99	06:19	06:06	1,04	02:41	02:05
LW	166	72	–94	06:03	06:22	0,95	02:03	01:40

Die Küste, 58 (1996), 109-160

Anhang C

Gegenüberstellung von mittleren Gezeitenparametern an näherungsweise gleichen geogr. Positionen

Pegel	MThw	MTnw	MThb	TF	TE	TF/TE	k	Dienststelle
1/77	656 cm	–81 cm	146 cm	5 h 26 m	6 h 59 m	0,78	0,45	BSH
2/77	65 cm	–83 cm	148 cm	5 h 34 m	6 h 51 m	0,81	0,44	BSH
3/78	66 cm	–84 cm	150 cm	5 h 39 m	6 h 46 m	0,83	0,44	BSH
4/78	67 cm	–84 cm	151 cm	5 h 31 m	6 h 54 m	0,80	0,45	BSH
Tab. a	Hochseepegelgruppe westlich Sylt							
6/78	102 cm	–106 cm	208 cm	5 h 43 m	6 h 42 m	0,85	0,49	BSH
7/78	99 cm	–103 cm	202 cm	5 h 45 m	6 h 40 m	0,86	0,49	BSH
1/79	103 cm	–107 cm	210 cm	5 h 50 m	6 h 35 m	0,89	0,49	BSH
2/79	114 cm	–119 cm	233 cm	5 h 48 m	6 h 37 m	0,88	0,49	BSH
8/79	98 cm	–102 cm	200 cm	5 h 48 m	6 h 37 m	0,88	0,49	BSH
Tab. b	Hochseepegelgruppe westlich Helgoland							
3/79	40 cm	–48 cm	88 cm	6 h 28 m	5 h 57 m	1,09	0,45	BSH
7/79	39 cm	–48 cm	87 cm	6 h 29 m	5 h 56 m	1,07	0,45	BSH
10/79	41 cm	–48 cm	89 cm	6 h 25 m	6 h 00 m	1,07	0,47	BSH
Tab. c	Hochseepegelgruppe bei 53° 30' N 6° 02' E							
4/79	75 cm	–98 cm	173 cm	5 h 34 m	6 h 51 m	0,81	0,43	BSH
5/79	76 cm	–94 cm	170 cm	5 h 40 m	6 h 45 m	0,84	0,45	BSH
WL	79 cm	–101 cm	180 cm	5 h 36 m	6 h 49 m	0,82	0,44	ALWH
Tab. d	Pegel und Hochseepegel westlich Westerland							
6/92	96 cm	–116 cm	212 cm	5 h 33 m	6 h 52 m	0,81	0,45	BSH
2/93	97 cm	–114 cm	211 cm	5 h 35 m	6 h 50 m	0,82	0,46	ALWH
Tab. e	Hochseepegel bei Amrum Bank							
4/81	123 cm	–135 cm	258 cm	5 h 45 m	6 h 40 m	0,86	0,48	DEBEX
11/81	126 cm	–134 cm	260 cm	5 h 44 cm	6 h 41 cm	0,86	0,48	BSH
Tab. f	Hochseepegel bei der Schlüsseltonne							
3/88	89 cm	–101 cm	190 cm	6 h 01 m	6 h 24 m	0,94	0,47	BSH
3/92	88 cm	–100 cm	188 cm	6 h 03 m	6 h 22 m	0,95	0,47	BSH
Tab. g	Hochseepegel bei 53° 55' N 6° 41' E							
5/88	63 cm	–63 cm	132 cm	6 h 12 m	6 h 13 m	1,00	0,48	BSH
5/92	62 cm	–69 cm	131 cm	6 h 15 m	6 h 10 m	1,02	0,48	BSH
Tab. h	Hochseepegel bei 54° 17' N 6° 30' E							
10/81	122 cm	–143 cm	265 cm	5 h 44 m	6 h 41 m	0,86	0,46	BSH
2/88	124 cm	–143 cm	267 cm	5 h 47 m	6 h 38 m	0,87	0,47	BSH
Tab. i	Hochseepegel bei 50° 18' N 8° 20' E							

Fortsetzung Anhang C

Pegel	MThw	MTnw	MThb	TF	TE	TF/TE	k	Dienststelle
4/88	96 cm	−104 cm	200 cm	5 h 43 m	6 h 42 m	0,85	0,48	BSH
4/92	89 cm	−101 cm	190 cm	5 h 39 m	6 h 46 m	0,83	0,47	BSH
Tab. j	Hochseepegel bei 54° 21' N 7° 39' E							
1/76	101 cm	−114 cm	215 cm	6 h 02 m	5 h 23 m	0,95	0,47	BSH
2/76	96 cm	−112 cm	208 cm	6 h 03 m	6 h 22 m	0,95	0,47	BSH
Tab. k	Hochseepegel bei 53° 44' N 6° 41' E							
2/78	88 cm	−105 cm	193 cm	6 h 04 m	6 h 21 m	0,96	0,46	BSH
5/78	91 cm	−108 cm	199 cm	6 h 07 m	6 h 18 m	0,97	0,46	BSH
Tab. l	Hochseepegel bei 53° 48' N 6° 25' E							
1916	110 cm	−121 cm	231 cm	5 h 39 m	6 h 46 m	0,83	0,48	WSA Tönning
1925/26	108 cm	−118 cm	226 cm	5 h 33 m	6 h 52 m	0,81	0,48	
1935/36	109 cm	−118 cm	227 cm	5 h 38 m	6 h 47 m	0,83	0,48	
1955/56	112 cm	−118 cm	230 cm	5 h 41 m	6 h 44 m	0,84	0,49	
1965/66	109 cm	−120 cm	229 cm	5 h 40 m	6 h 45 m	0,84	0,48	
1976	115 cm	−123 cm	238 cm	5 h 40 m	6 h 45 m	0,84	0,48	
1986	113 cm	−124 cm	237 cm	5 h 40 m	6 h 45 m	0,84	0,48	
1988	114 cm	−123 cm	237 cm	5 h 42 m	6 h 43 m	0,85	0,48	
1992	112 cm	−125 cm	237 cm	5 h 42 m	6 h 43 m	0,85	0,47	
1993	116 cm	−125 cm	241 cm	5 h 41 m	6 h 44 m	0,84	0,48	
Tab. m	Pegel Helgoland							
1984	137 cm	−147 cm	284 cm	5 h 46 m	6 h 39 m	0,87	0,48	WSA Cuxhaven
1986	133 cm	−149 cm	282 cm	5 h 49 m	6 h 36 m	0,89	0,47	
1987	139 cm	−148 cm	287 cm	5 h 47 m	6 h 38 m	0,87	0,48	
1988	137 cm	−150 cm	287 cm	5 h 51 m	6 h 34 m	0,89	0,47	
1991	138 cm	−148 cm	286 cm	5 h 50 m	6 h 35 m	0,89	0,48	
Tab. n	Pegel Bake A							

Die Küste, 58 (1996), 109-160

Anhang D

Karten harmonischer Gezeitenkonstanten der wichtigsten Partialtiden für das Gebiet der Nordsee (ehem. Marine-Observatorium Wilhelmshaven)

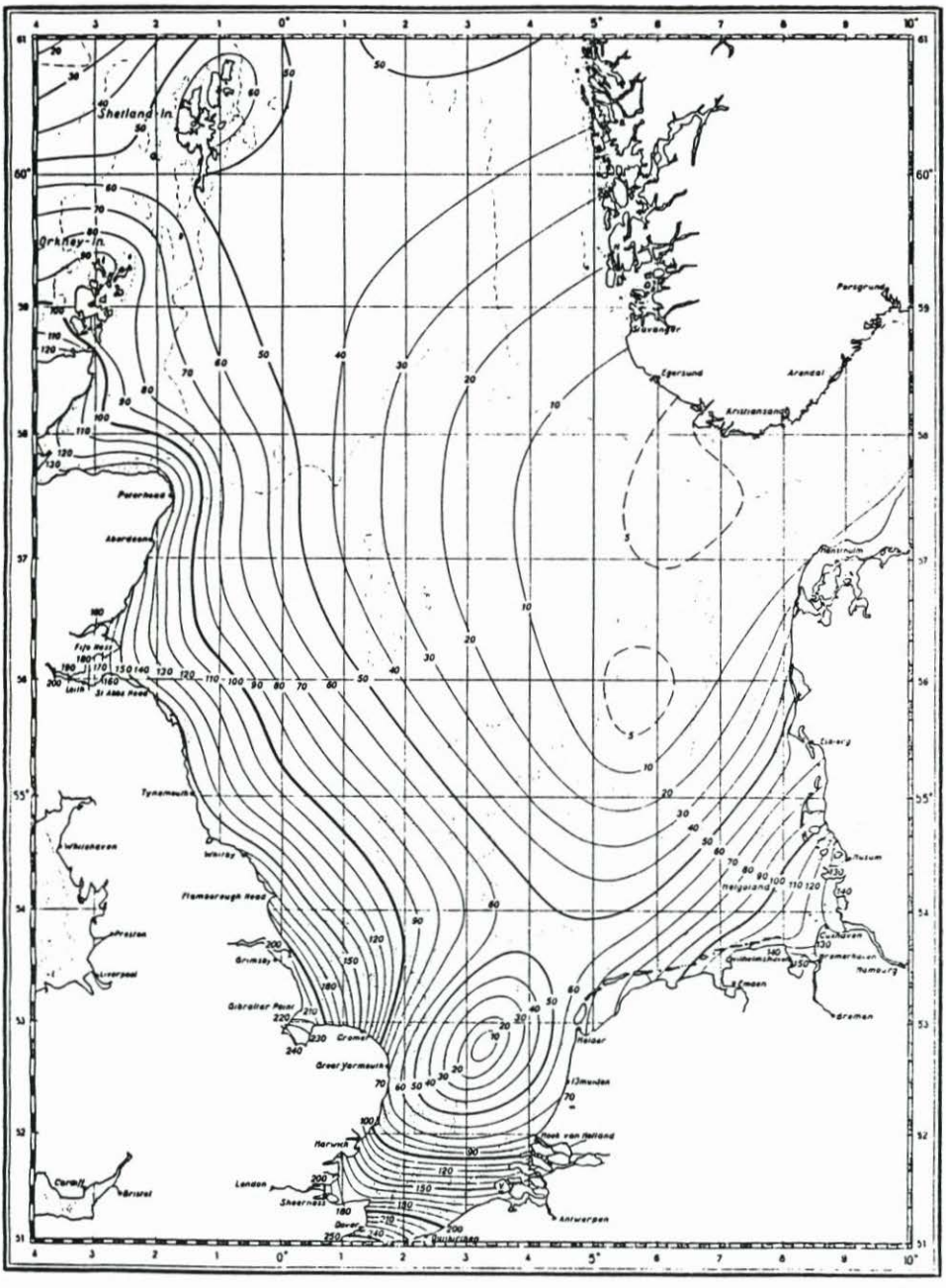


Abb. 1D: Amplituden der M2-Gezeit in cm

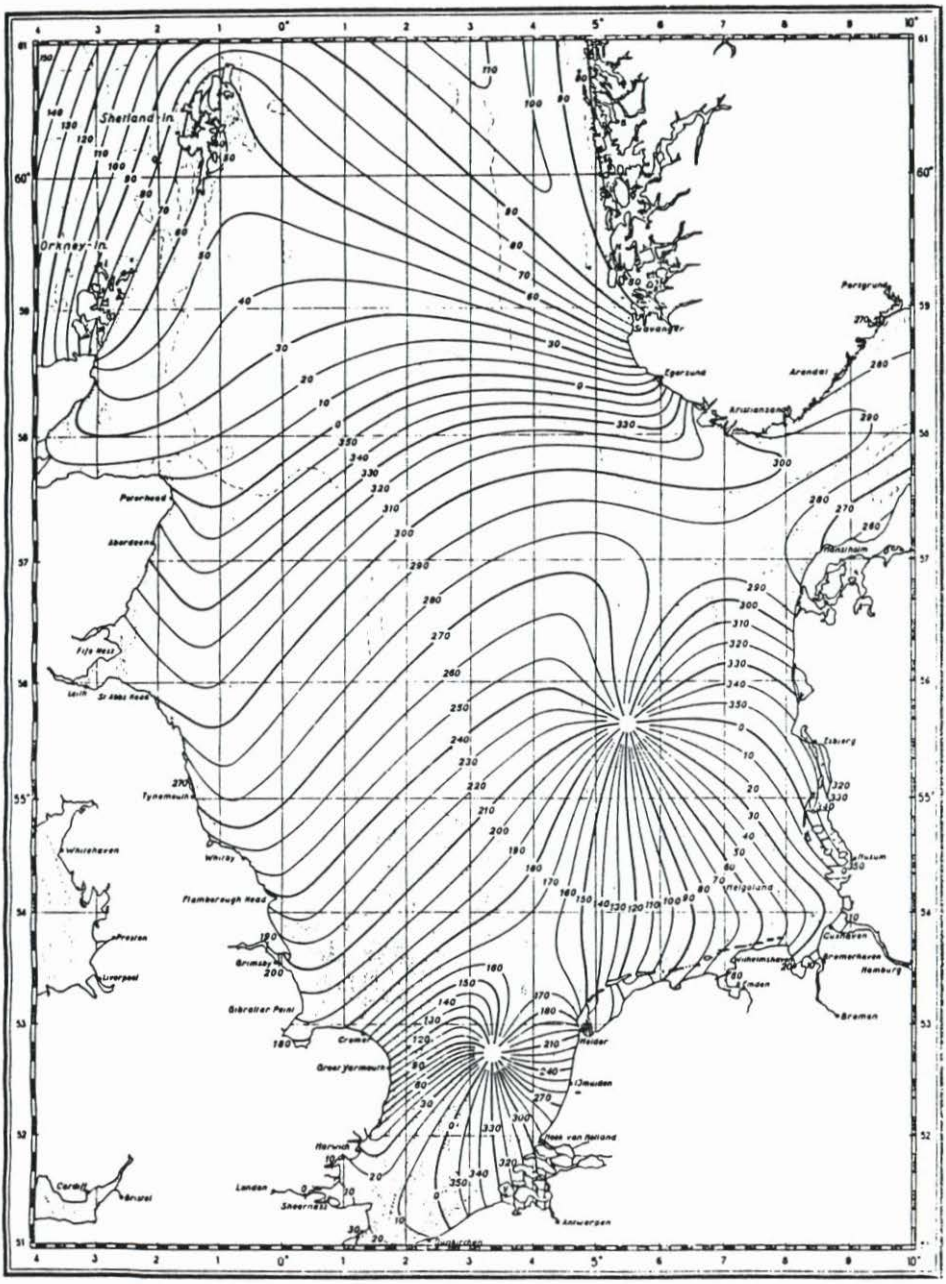


Abb. 2D: Phasen der M2-Gezeit in Grad

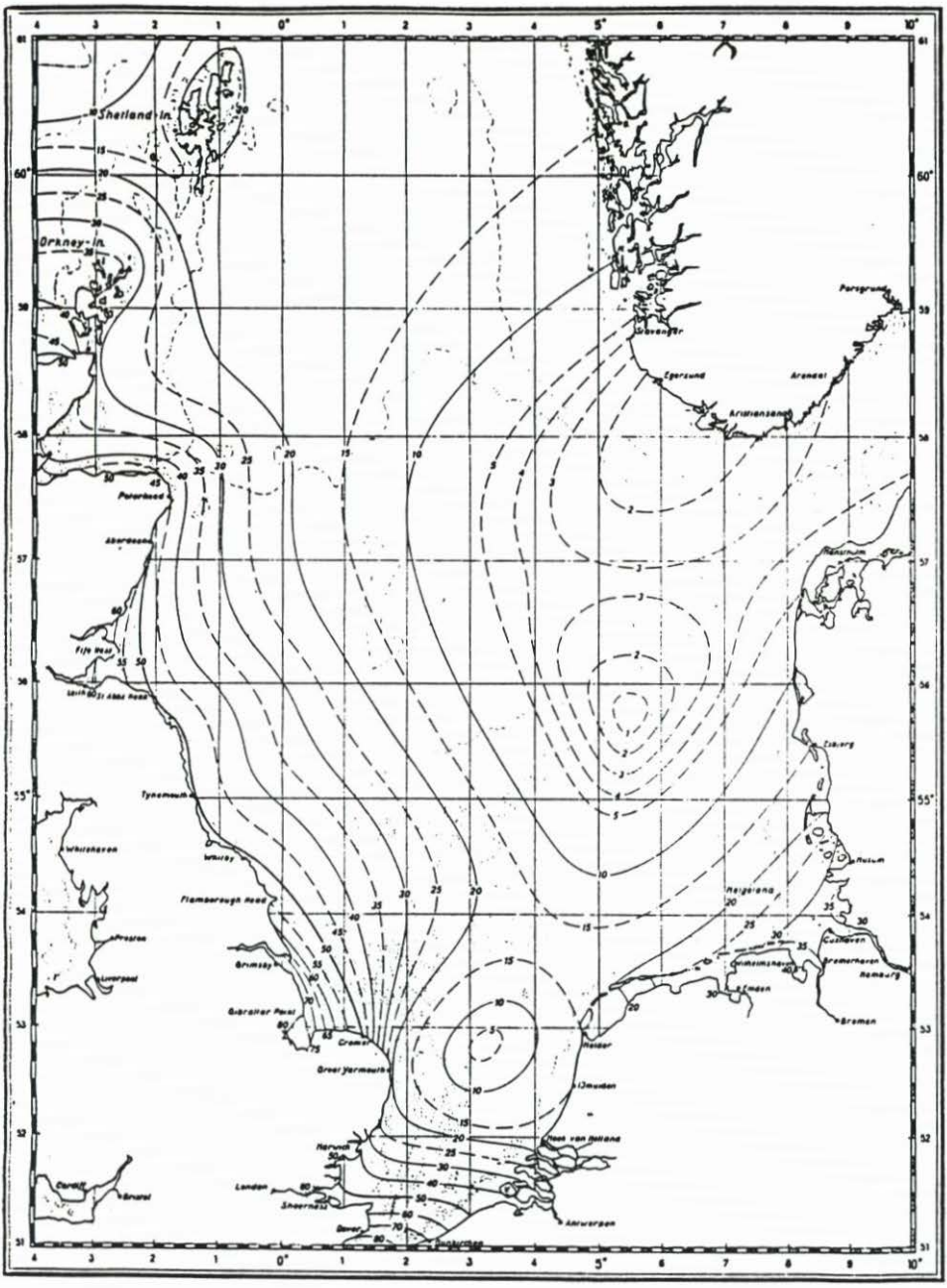


Abb. 3D: Amplituden der S2-Gezeit in cm

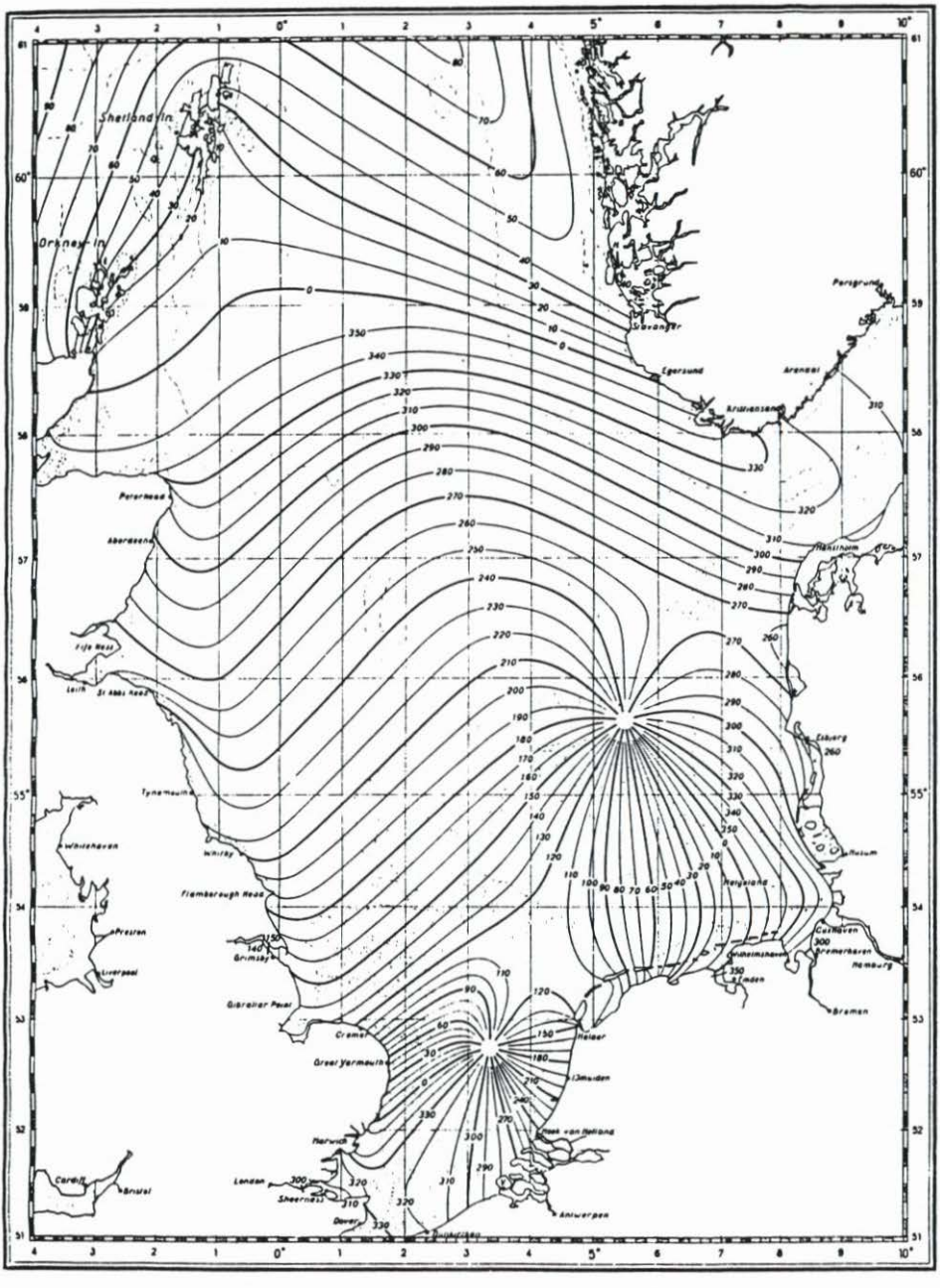


Abb. 4D: Phasen der S2-Gezeit in Grad

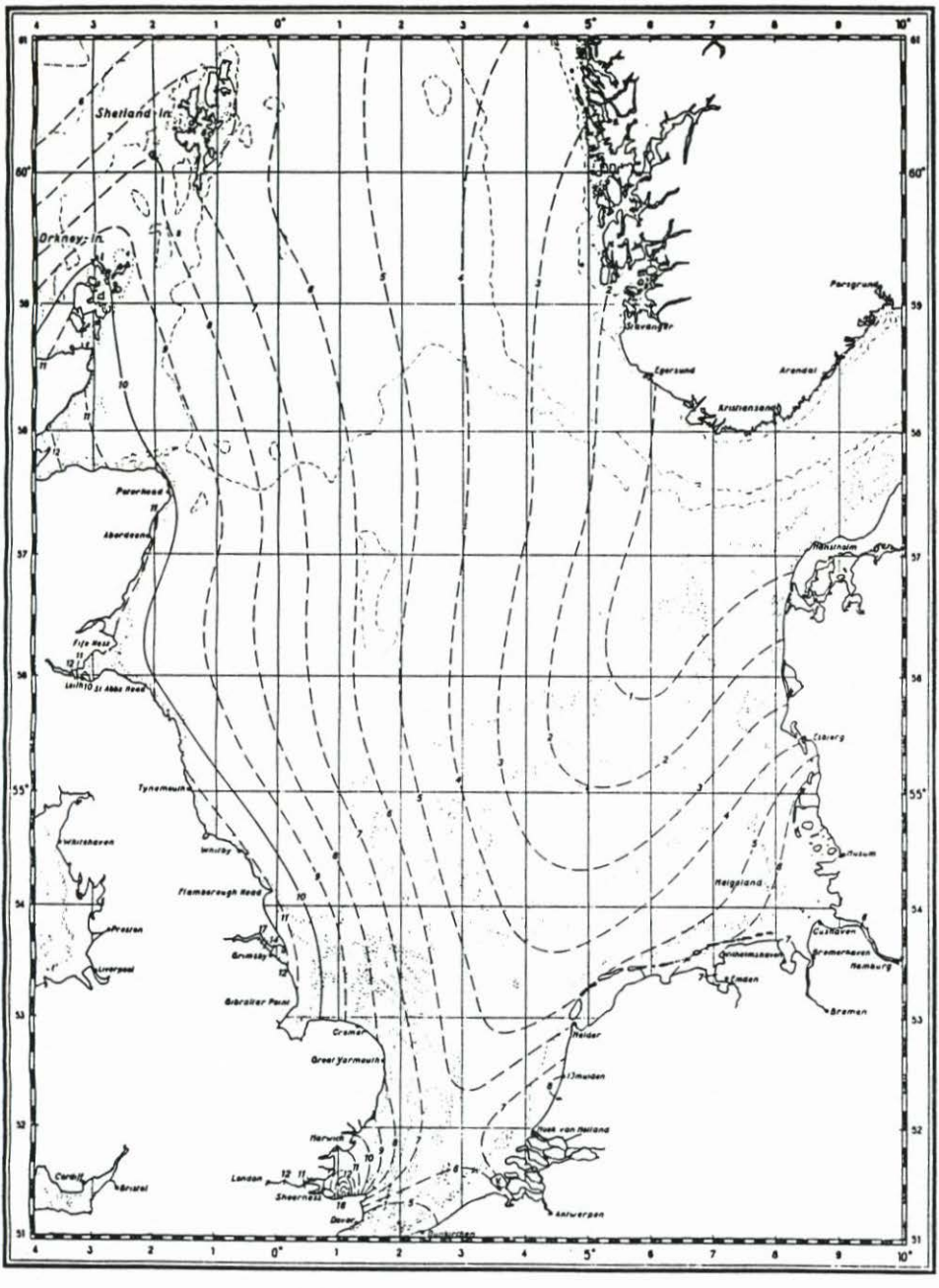


Abb. 5D: Amplituden der K1-Gezeit in cm

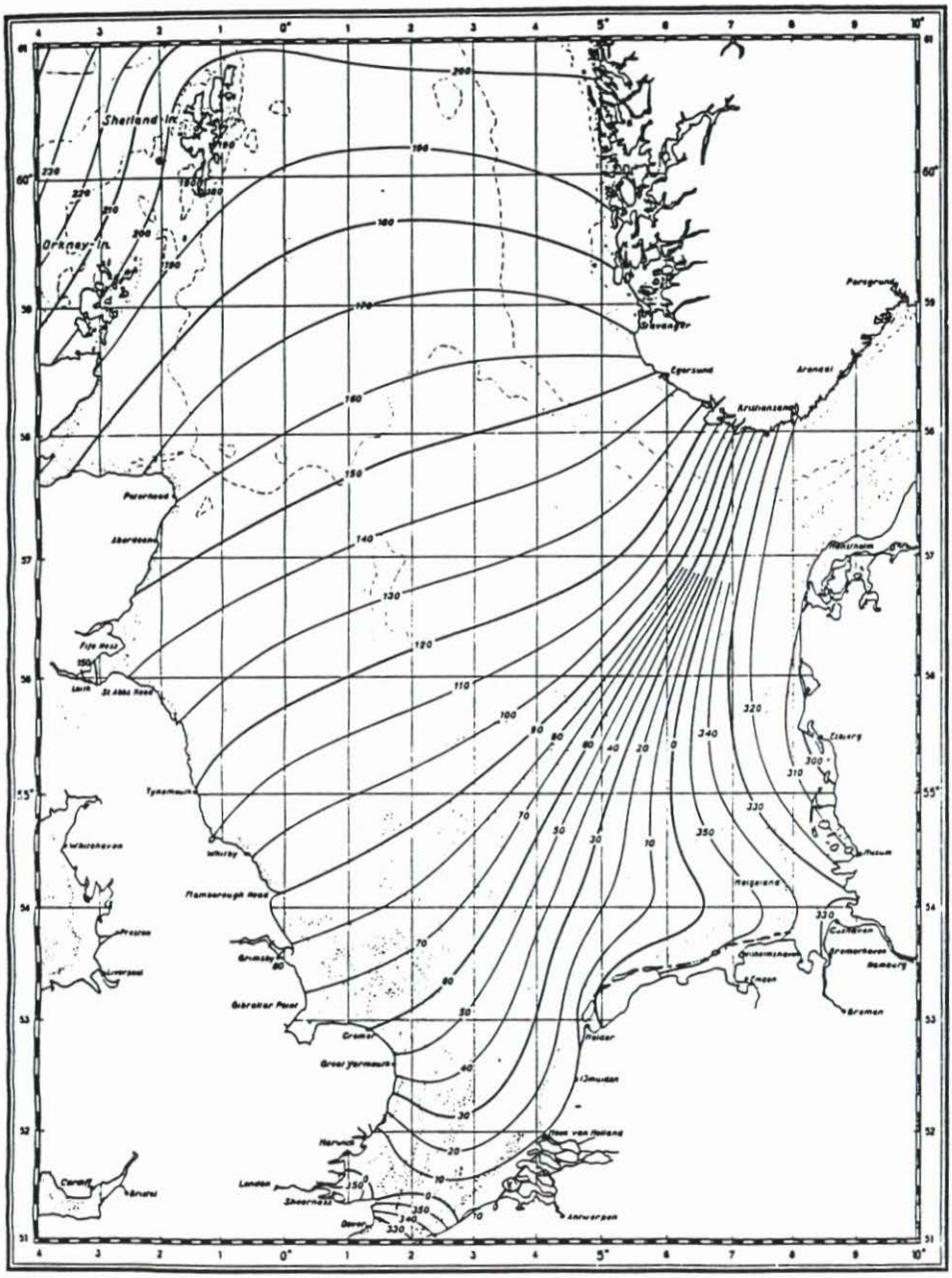


Abb. 6D: Phasen der K1-Gezeit in Grad

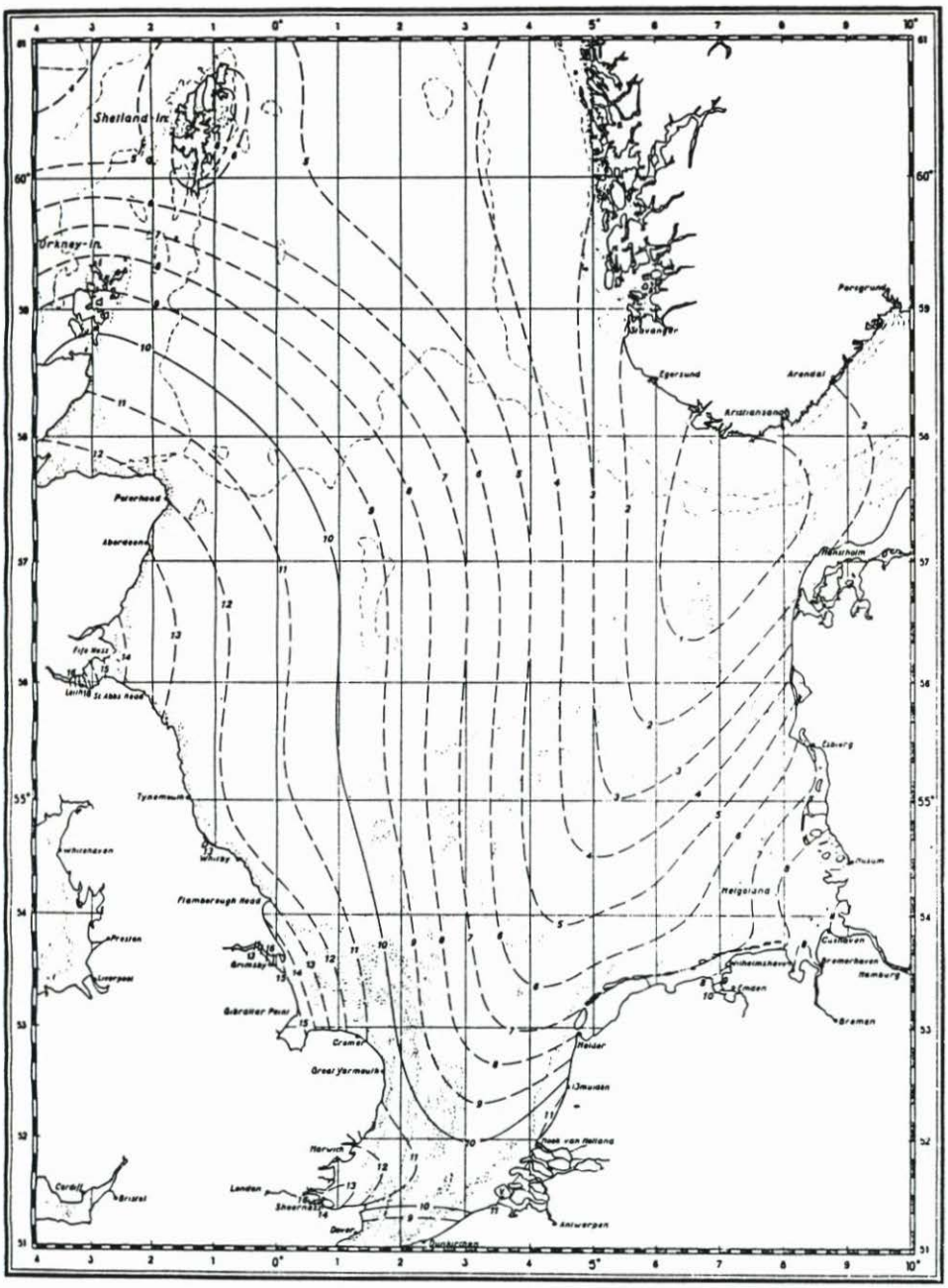


Abb. 7D: Amplituden der O1-Gezeit in cm

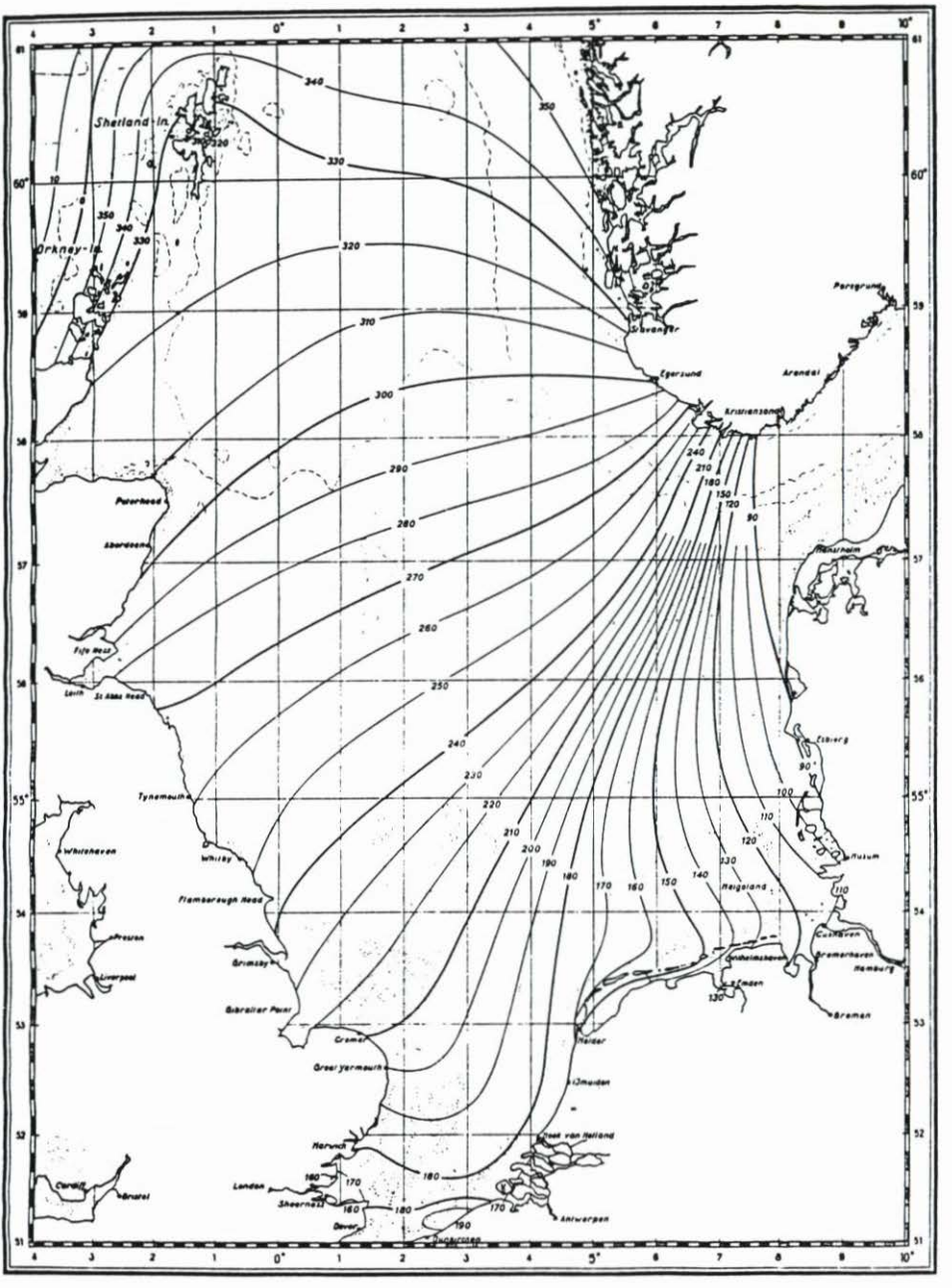


Abb. 8D: Phasen der O1-Gezeit in Grad

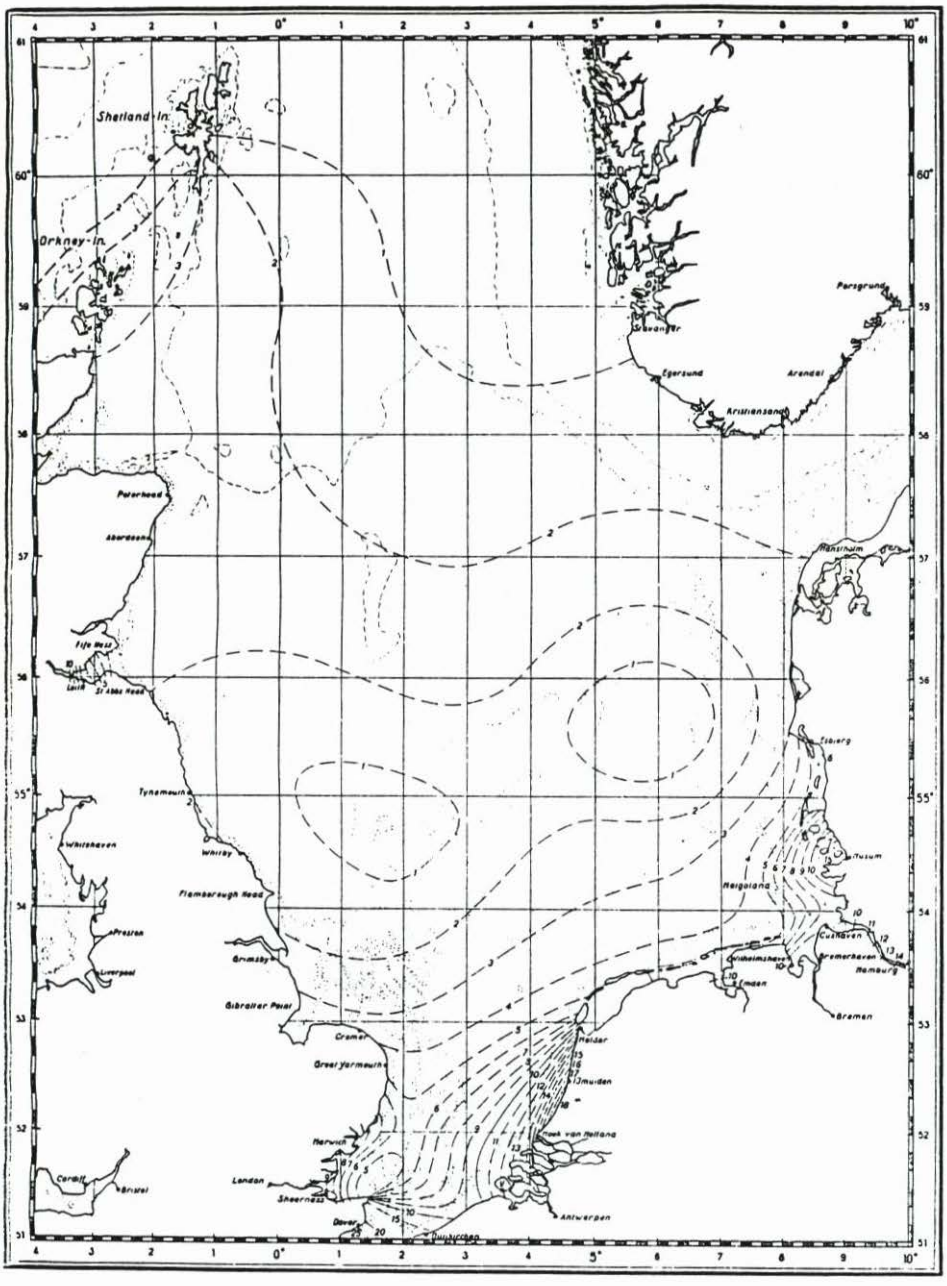


Abb. 9D: Amplituden der M4-Gezeit in cm

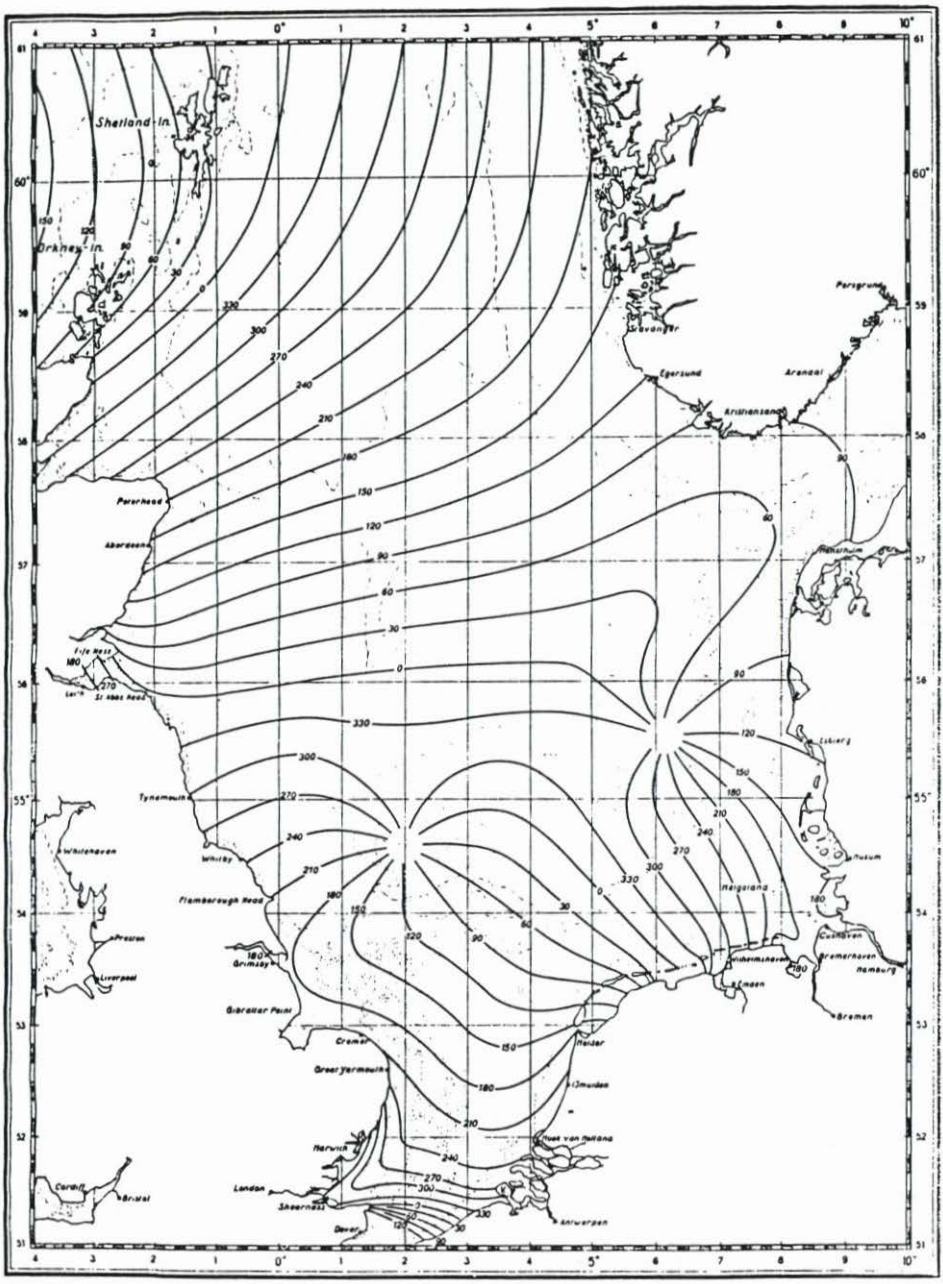


Abb. 10D: Phasen der M4-Gezeit in Grad