

Die numerischen Küstenmodelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die Deutsche Bucht

Abschlußbericht der Projektgruppe HN-Modelle des KFKI¹⁾

Zusammenfassung

Bereits in Heft 35/1980 „Die Küste“ wurde über die Hydrodynamisch-Numerischen Modelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen berichtet. Inzwischen sind die Modelle insgesamt fertiggestellt und anwendungsreif.

Nachdem das Vorhaben am 31. 12. 1981 ausgelaufen ist, werden hier die mit ihm verbundenen Arbeiten und die erzielten Ergebnisse sowie die Anwendungsmöglichkeiten der Modelle dargestellt. Ein im Herbst 1981 ausgeführtes Naturmeßprogramm des Regionalmodells Innere Deutsche Bucht, welches vor allem zum Test der Modelle dienen sollte, führte zu dem Ergebnis, daß mit dem Normaltidenmodell eine gute Grundlage für weiterführende Arbeiten auch unter besonderen meteorologischen Randbedingungen erarbeitet worden ist.

Summary

Already in volume 35/1980 of „Die Küste“ it was reported on the hydrodynamic/numerical models of the Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen. In the meantime all models have been completed and are ready for use.

Since the projekt expired on December 31, 1981, this paper reports on the accomplished work and the gained results as well as the possibilities of utilization of the models. In the area of the regional model Inner German Bay a field measurement program was accomplished in autumn 1981. Above all it had the purpose to serve as a test of the models. It proved that with the normal-tide-model a good foundation has been elaborated for further investigations also under special meteorological boundary conditions.

Inhalt

1. Entwicklung von HN-Modellen für die Deutsche Bucht	60
1.1 Einführung	60
1.2 HN-Modelle im Küsteningenieurwesen	60
2. Modellbeschreibung	62
2.1 Theorie der HN-Modelle	62
2.1.1 Geschichtliches	62
2.1.2 Die hydrodynamischen Differentialgleichungen	62
2.1.3 Das HN-Verfahren	64
2.2 HN-Modelle des KFKI	67
2.2.1 Allgemeines	67
2.2.2 Nordseemodell	68

¹⁾ Mitglieder der Projektgruppe: Dr. LUCK (Obmann), Norderney; Dr. RENGIER, Kiel; Prof. Dr. SIEFERT, Cuxhaven; Dr. WISMER, Kiel; Dr. WUNDES, Bremen, in Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. BECKMANN, Hamburg; Dipl.-Ing. LIEBIG, Norderney; Dr. ROHDE, Hamburg; Dipl.-Oz. SCHÄFER, Hamburg; Dipl.-Ing. WIESE, Hamburg.

2.2.3 Basismodell Deutsche Bucht	69
2.2.4 Regionalmodelle	69
2.2.5 Basismodell mit integrierten Regionalmodellen	71
2.2.6 Flußmodelle	71
2.3 Spezielle Aspekte der Modellierung	72
2.3.1 Auflösungsvermögen des Gitternetzes	72
2.3.2 Ermittlung der Modelltiefen	74
2.3.3 Behandlung der Watten im Modell	75
3. Programmierung der Modelle	76
3.1 Modellprozeduren	76
3.2 Programmbibliothek	77
3.3 Plot-Programme	77
4. Eichung der Modelle	77
4.1 Randwerte an offenen Modellrändern	77
4.1.1 Allgemeines	77
4.1.2 Harmonische Gezeitenkonstanten	79
4.1.3 Randwerte aus großräumigen Modellen	79
4.1.4 Naturmessungen	79
4.2 Eichung mit einer Normaltide	80
5. Naturmeßprogramm DEBEX '81	87
5.1 Ziel und Umfang	87
5.2 Planung und Durchführung der Messungen	88
5.3 Modellrechnungen sowie Vergleich von Natur- und Modelldaten	88
6. Nutzungsmöglichkeiten	89
7. Schriftenverzeichnis	90

1. Entwicklung von HN-Modellen für die Deutsche Bucht

1.1 Einführung

In den Jahren 1977 bis 1981 wurden für die Küste der Deutschen Bucht Hydrodynamisch-Numerische Modelle (HN-Modelle) entwickelt, die inzwischen fertiggestellt sind und für die Anwendung im Küsteningenieurwesen bereitstehen. Träger dieses Vorhabens, das durch den Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) erheblich gefördert wurde, ist das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (ROHDE, 1979).

Über die Zielsetzung, die Vorgeschichte und die organisatorische Abwicklung sowie erste Ergebnisse ist von LUCK und SCHÄFER (1980) bereits berichtet worden. In einem Anwender-Symposium, das am 11. November 1980 in der Bundesanstalt für Wasserbau – Abteilung Küste, Hamburg-Rissen, stattfand, wurden die Modelle interessierten Fachleuten vorgestellt und deren Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt (ROHDE, 1982).

Da die Modelle nunmehr zur Anwendungsreife entwickelt sind, soll über die Arbeiten und die erzielten Ergebnisse abschließend und zusammenfassend berichtet werden.

1.2 HN-Modelle im Küsteningenieurwesen

Im Rahmen der Planung von Bauwerken des Küstenschutzes und des Seeverkehrswasserbaues (z. B. Vordeichungen, Sperrwerke, Buhnen, Bodenbewegungen), die eine erhebliche Veränderung des Tidegeschehens im Nah- und Fernfeld bewirken, sind die zu erwartenden Bewegungsabläufe mit den sich dazu einstellenden morphologischen Großformen zu prognostizieren. In diesem Sinne zu fordernde Prognosen können sich auch auf rein hydrologische

Erscheinungen – z. B. Tideänderungen, Sturmflutabläufe – oder natürliche Vorgänge – z. B. Sandbewegungen, Strandverhalten – beschränken. Die Beurteilung und Abschätzung von Vermischungsvorgängen bei der Einleitung von Abwässern oder von Transportvorgängen im Falle von Ölnfällen erhalten zunehmend Bedeutung.

Zur Erarbeitung der in diesem Sinne zu fordernden Vorhersagen, die der Abschätzung nützlicher oder auch unerwünschter Folgen dienen, bedient sich der Küsteningenieur zunächst der im ungestörten Zustand gemessenen Strömungen und Tidewasserstände. Darüber hinaus wird die Natur in hydraulischen und in jüngerer Zeit auch zunehmend in mathematischen Modellen befragt, in denen die geplanten Vorhaben eingeführt und auf ihre Auswirkungen untersucht werden.

Da Strömungen und Wasserstände einerseits und morphologische Formen andererseits zueinander in zum Teil derzeit noch nicht exakt formulierbarer Wechselwirkung stehen, Naturmessungen wie Modelle jedoch von der im Spiel der Kräfte vorgegebenen Morphologie auszugehen haben, ist die prognostische Behandlung von Eingriffen in hydrologisch/morphologische Zusammenhänge kaum zu quantifizieren. Insofern können Naturmessungen wie Modelle nur Hilfsmittel sein, die eine Annäherung an zu erwartende Zustände erleichtern.

Während die hydraulischen Modelle schon sehr früh im Küsteningenieurwesen eingesetzt wurden, haben sich mathematische Modelle, anders als in der Ozeanographie, hier nur sehr langsam durchsetzen können. Angewandt wurden sie vor allem dann, wenn Vorgänge in Gebieten zu untersuchen waren, die z. B. wegen der Wirkung der Erdrotation, der Gestaltung der Steuereinrichtungen auf den offenen Rändern oder auch des Einflusses des Windes Ähnlichkeitsmechanisch kaum noch zu beherrschen sind (Gezeitenästuarien, größere Seegebiete). Der breiten Anwendung mathematischer Modelle im Rahmen küstennaher Bauvorhaben standen zunächst die besonderen Schwierigkeiten des amphibischen Raumes entgegen, in welchem die Gezeitenvorgänge durch das morphologische Formeninventar geprägt sind und von den harmonischen Funktionen stark abweichen. Durch Transformation der hydrodynamischen Differentialgleichungen in ein System von Differenzgleichungen sind die hierdurch bewirkten Schwierigkeiten überwindbar geworden. Darüber hinaus wird auf diesem Wege die numerische Behandlung der Vorgänge ermöglicht.

Trotz der so erzielten Fortschritte sind HN-Modelle für küstenspezifische Probleme im deutschen Küstengebiet bisher wenig angewandt worden. Die Gründe hierfür wurden von LUCK und SCHÄFER (1980) bereits aufgezeigt. Erst durch das Forschungsvorhaben „HN-Modelle des KFKI“ sind hinsichtlich ihrer Anwendung neue Impulse gegeben worden. Das breite Anwendungsspektrum der Hydrodynamisch-Numerischen Modelle im Küstennahbereich hat auch der universitären Forschung Veranlassung gegeben, gerade den wasserspezifischen Problemen (Überflutung und Trockenfall) vermehrte Aufmerksamkeit zuzuwenden. Die im Rahmen dieser Aktivitäten insgesamt erzielten Ergebnisse ermutigen dazu, HN-Modelle stärker als bisher als Hilfsmittel im Küsteningenieurwesen einzusetzen.

Die ständige Weiterentwicklung der HN-Modelle muß sichergestellt sein, da sie im Sinne fortdauernder Aktualität und unter Einbeziehung jeweils neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse ständig unter Kontrolle gehalten werden müssen, insbesondere auch, weil die Regionalmodelle Grundlage für die in weiterer Zukunft zu erstellenden Lokalmodelle sein sollen.

2. Modellbeschreibung

2.1 Theorie der HN-Modelle

2.1.1. Geschichtliches

Die Beschreibung der Gezeitenbewegung im Weltmeer war lange Zeit nur anhand von Beobachtungen der Wasserstände und Strömungen, vorwiegend in Küstennähe, möglich. Erst die Entwicklung von leistungsfähigen Hochseepegeln und Strommessern ermöglichte auch die Bearbeitung der Vorgänge im offenen Meer und in tieferen Wasserschichten.

Die theoretische Beschreibung der Gezeitenerscheinungen geht auf NEWTON zurück. Seit der Einführung der hydrodynamischen Differentialgleichungen durch EULER, LAGRANGE und LAPLACE ist häufig versucht worden, die Gleichungen in analytisch geschlossener Form zu lösen. Da dies aber nur unter erheblichen Einschränkungen wegen der Morphologie und der Küstengestalt der zu behandelnden Gebiete möglich ist, weichen die Lösungen oft erheblich von den natürlichen Verhältnissen ab. Es hat sich nämlich gezeigt, daß gerade die Tiefenverteilung und Küstengestalt eines Meeres die Bewegungsvorgänge wesentlich beeinflussen.

Der Einsatz numerischer Methoden brachte bedeutende Fortschritte. Die ersten numerischen Ergebnisse der hydrodynamischen Differentialgleichungen wurden von DEFANT und v. STERNECK für eindimensionale, kanalartige Meeresgebiete schon 1916 angegeben. Sie ergaben infolge Berücksichtigung der Tiefenstrukturen eine deutliche Verbesserung der Übereinstimmung von Modell und Natur. In großem Ausmaß verwendete LORENTZ (1926) die numerische Mathematik im Planungsstadium für die Abdeichung der Zuiderzee. Eine Verallgemeinerung auf zweidimensionale, flächenhafte Gebiete erreichte HANSEN (1956) mit dem Hydrodynamisch-Numerischen Verfahren, kurz HN-Verfahren genannt. Mit der Weiterentwicklung dieses Verfahrens für die Anwendung in Wattgebieten wurde ein leistungsfähiges Hilfsmittel für die Bearbeitung von Fragestellungen aus dem Küsteningenieurwesen geschaffen.

2.1.2 Die hydrodynamischen Differentialgleichungen

Alle mathematischen Tidemodelle basieren auf den hydrodynamischen Differentialgleichungen von NAVIER und STOKES sowie der Kontinuitätsgleichung (z. B. SÜNDERMANN, 1966).

Für die praktische Anwendung lassen sich diese Gleichungen besser in Komponenten- als in Vektorschreibweise behandeln. Dazu ist die Wahl eines Koordinatensystems erforderlich. Wenn die geographische Lage des zu untersuchenden Gebietes und seine räumliche Ausdehnung es erlauben, daß die Krümmung der Erdoberfläche vernachlässigt und die Meridiankonvergenz rechnerisch ausgeglichen werden kann, wird zweckmäßig ein kartesisches Koordinatensystem zugrunde gelegt.

Für ein rechtsorientiertes, kartesisches Koordinatensystem, dessen Ursprung im ungestörten Meeresniveau liegt, dessen x-Achse nach Osten, die y-Achse nach Norden weist und dessen z-Achse senkrecht darauf mit positiver Richtung nach oben steht, ergeben sich die Bewegungsgleichungen:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - f\bar{v} + f\bar{w} - A\Delta \bar{u} - \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = X \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + f \bar{u} - A \Delta \bar{v} - \gamma \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = Y \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} - f \bar{u} - A \Delta \bar{w} - \gamma \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = Z \quad (3)$$

und die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

mit folgenden Bezeichnungen:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ = Geschwindigkeitskomponenten in x, y, z - Richtung

X, Y, Z = äußere Kraftkomponenten

ω = Winkelgeschwindigkeit

$\bar{f}$ = $2\omega \cos \psi$, $f = 2\omega \sin \psi$, Coriolisparameter

ψ = geographische Breite

A, ν = Zähigkeitszahlen

p = Druck

ς = Dichte des Wassers

Für die Beschreibung der Bewegungsvorgänge wird je nach Aufgabenstellung eine Reihe von Annahmen getroffen, die das Gleichungssystem (1 bis 4) vereinfacht.

Bei der Untersuchung gezeitenbedingter Vorgänge, bei denen die vertikale Bewegung gegenüber der horizontalen sehr klein ist, werden üblicherweise die Geschwindigkeitskomponenten in z-Richtung und ihre Ableitung nach Ort und Zeit sowie die äußeren Kräfte – bis auf die Schwerkraft – vernachlässigt. Aus Vereinfachungsgründen wird mit über die Wassertiefe gemittelten horizontalen Geschwindigkeiten gerechnet. Die Schubspannungen an der Sohle werden im allgemeinen über den Reibungsansatz von TAYLOR (1919) berücksichtigt. Außerdem wird die Corioliskraft in z-Richtung gegenüber der Schwerkraft vernachlässigt. Mit diesen Annahmen ergeben sich dann die Gleichungen

$$u_t - f v - \frac{A}{H} (\Delta (hu) + \gamma \Delta u) - \frac{1}{H} (\nu \bar{u}_z(\gamma) - r \sqrt{u^2 + v^2} u) + g(\gamma_x - p_x) = 0 \quad (5)$$

$$v_t + f u - \frac{A}{H} (\Delta (hv) + \gamma \Delta v) - \frac{1}{H} (\nu \bar{v}_z(\gamma) - r \sqrt{u^2 + v^2} v) + g(\gamma_y - p_y) = 0 \quad (6)$$

$$\gamma_t + (Hu)_x + (Hv)_y = 0 \quad (7)$$

mit folgenden Bezeichnungen:

u, v = Geschwindigkeitskomponenten (gemittelte)

u_t, v_t = Ableitung der Geschwindigkeitskomponenten nach der Zeit

h = mittl. Wassertiefe

H = h + ς = aktuelle Wassertiefe

$\varsigma, \varsigma_x, \varsigma_y, \varsigma_t$ = Wasserstand und Ableitungen

Für den Übergang von Differentialquotienten zu Differenzenquotienten werden zweckmäßigerweise räumlich zentrale Differenzen und zeitlich Vorwärtsdifferenzen gebildet. Wird für den Windschub an der Meeresoberfläche ein in der maritimen Meteorologie üblicher und zum quadratischen Reibungsterm analoger Ansatz

$$\nu \tilde{u}_z(\xi) = \lambda \sqrt{U^2 + V^2} U$$

$$\nu \tilde{v}_z(\xi) = \lambda \sqrt{U^2 + V^2} V$$

mit

U, V = Komponenten der Windgeschwindigkeit an der Meeresoberfläche in x- bzw. y-Richtung

λ = Windschubkoeffizient

verwandt, so ergibt die Umformung des Systems (5 bis 7) in Differenzengleichungen für das HN-Gitter:

$$\begin{aligned} u^{n+1}(\ell, m) = & u^n(\ell, m) \left(1 - \frac{r \cdot \Delta t \cdot \sqrt{u^n(\ell, m)^2 + \bar{v}^n(\ell, m)^2}}{\bar{H}^n(\ell, m)} \right) \\ & + \frac{\lambda \cdot \Delta t \cdot \sqrt{U^n(\ell, m)^2 + \bar{V}^n(\ell, m)^2}}{\bar{H}^n(\ell, m)} U^n(\ell, m) + f \bar{v}^n(\ell, m) \Delta t \\ & + \frac{A \cdot \Delta t}{\bar{H}^n(\ell, m) \Delta s^2} \left[(hu)^n(\ell+1, m) + (hu)^n(\ell-1, m) \right. \\ & + (hu)^n(\ell, m+1) + (hu)^n(\ell, m-1) - 4(hu)^n(\ell, m) \\ & + \bar{\xi}^n(\ell, m) \cdot (u^n(\ell+1, m) + u^n(\ell-1, m) + u^n(\ell, m+1) \\ & + u^n(\ell, m-1) - 4u^n(\ell, m)) \left. \right] - g \frac{\Delta t}{\Delta s} \left[(\xi^n(\ell, m+1) \right. \\ & \left. - \xi^n(\ell, m)) - (P^n(\ell, m+1) - P^n(\ell, m)) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
v^{n+1}(l,m) = & v^n(l,m) \left(1 - \frac{\tau \cdot \Delta t \cdot \sqrt{\bar{u}(l,m)^2 + v^n(l,m)^2}}{\bar{H}^n(l,m)} \right); \\
& + \frac{\lambda \cdot \Delta t \cdot \sqrt{\bar{U}^n(l,m)^2 + V^n(l,m)^2}}{\bar{H}(l,m)} V^n(l,m) - f \bar{u}^n(l,m) \Delta t \\
& + \frac{A \cdot \Delta t}{\bar{H}^n(l,m) \Delta s^2} \left\{ (hv)^n(l+1,m) + (hv)^n(l-1,m) \right. \\
& + (hv)^n(l,m+1) + (hv)^n(l,m-1) - 4(hv)^n(l,m) \\
& + \bar{\zeta}^n(l,m) \cdot (v^n(l+1,m) + v^n(l-1,m) + v^n(l,m+1) \\
& + v^n(l,m-1) - 4v^n(l,m)) \left. \right\} - g \frac{\Delta t}{\Delta s} \left\{ (\bar{\zeta}^n(l,m) \right. \\
& \left. - \bar{\zeta}^n(l+1,m)) - (P^n(l,m) - P^n(l+1,m)) \right\}
\end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
\bar{\zeta}^{n+1}(l,m) = & \bar{\zeta}^n(l,m) - \frac{\Delta t}{\Delta s} \left[\bar{H}^n(l,m) u^{n+1}(l,m) - \bar{H}^n(l,m-1) u^{n+1}(l,m-1) \right. \\
& \left. + \bar{H}^n(l-1,m) v^{n+1}(l-1,m) - \bar{H}^n(l,m) v^{n+1}(l,m) \right] \quad (10)
\end{aligned}$$

In den Gleichungen (8 bis 10) wurde der Einfachheit halber der gleiche Ortsschritt in x- und y-Richtung $\Delta x = \Delta y = \Delta s$ angenommen. Der Index n gibt den Zeitpunkt an, der den einzelnen Feldern der Variablen zugeordnet wird. Die überstrichenen Größen werden durch Interpolation der Werte umliegender Punkte für den jeweiligen Geschwindigkeitspunkt gewonnen.

Für das Gleichungssystem (8 bis 10) eignet sich zur Abschätzung der numerischen Stabilität die Bedingung von COURANT, FRIEDRICHS und LEWY (1928):

$$\Delta t \leq \frac{\Delta s}{\sqrt{2 g h_{\max}}}$$

Durch diese Stabilitätsbedingung wird der maximal zulässige Zeitschritt Δt in Abhängigkeit vom Ortsschritt Δs und der maximalen in die Rechnung eingehenden Tiefe $h_{\max}$ begrenzt.

2.2 HN-Modelle des KFKI

2.2.1 Allgemeines

Die HN-Modelle des KFKI unterscheiden sich hinsichtlich ihrer geographischen Lage und Ausdehnung (Abb. 2) sowie in ihrem Auflösungsvermögen. Sie basieren alle auf dem unter 2.1.3 beschriebenen HN-Verfahren und sind in einem regelmäßigen Gitternetz formuliert, das parallel zum geographischen Koordinatensystem liegt.

Die vorgenommene Staffelung der Modelle, ausgehend vom Basismodell Deutsche Bucht über die Regionalmodelle für die Küstenbereiche bis hin zu den für lokale Untersuchungen anzufertigenden Lokalmodeilen, berücksichtigt die je nach Zielset-

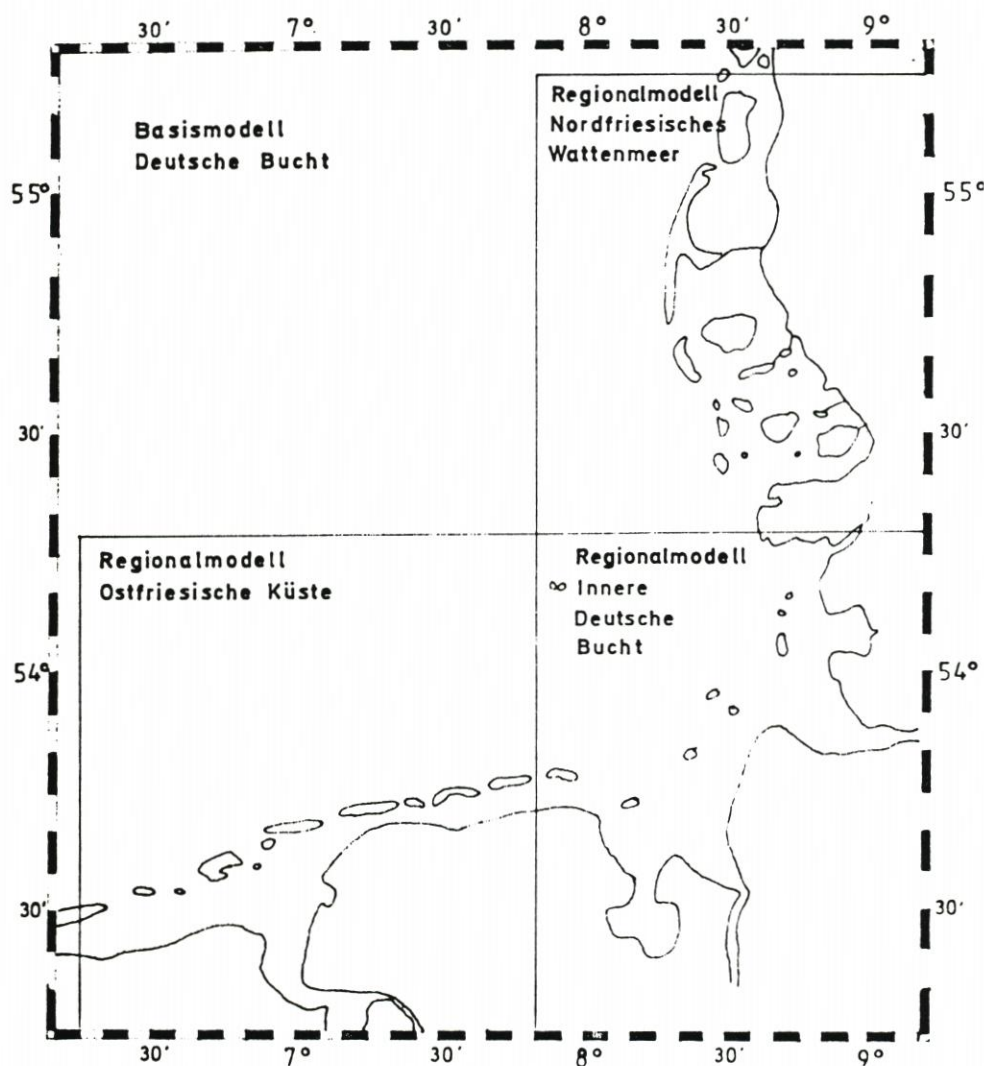


Abb. 2. Deutsche Bucht mit Grenzen der KFKI-Modelle

zung an die Modelle zu stellenden Anforderungen. Dieses Modellsystem für die Deutsche Bucht wurde in ein bestehendes Nordseemodell (Abschn. 2.2.2) eingepaßt.

Die Topographie wird in den ζ -, u - und v -Punkten (Abb. 1) erfaßt. Die Tiefen wurden aus den Küstenkarten des KFKI, den topographischen Wattkarten der Forschungsstelle Norderney (Maßstab 1 : 25 000), die einheitlich auf NN bezogen sind, und aus den Seekarten des Deutschen Hydrographischen Instituts bestimmt.

2.2.2 Nordseemodell

Das zweidimensionale Nordseemodell ist ursprünglich im Rahmen der Zusammenarbeit in der Modellgruppe Nordsee (MGN) von MAIER-REIMER und DOLATA entwickelt worden. Es basiert auf den Modellen, mit denen HANSEN und seine Mitarbeiter umfangreiche Untersuchungen der Zirkulation in der Nordsee vorgenommen haben. Das sphärische Gitter des

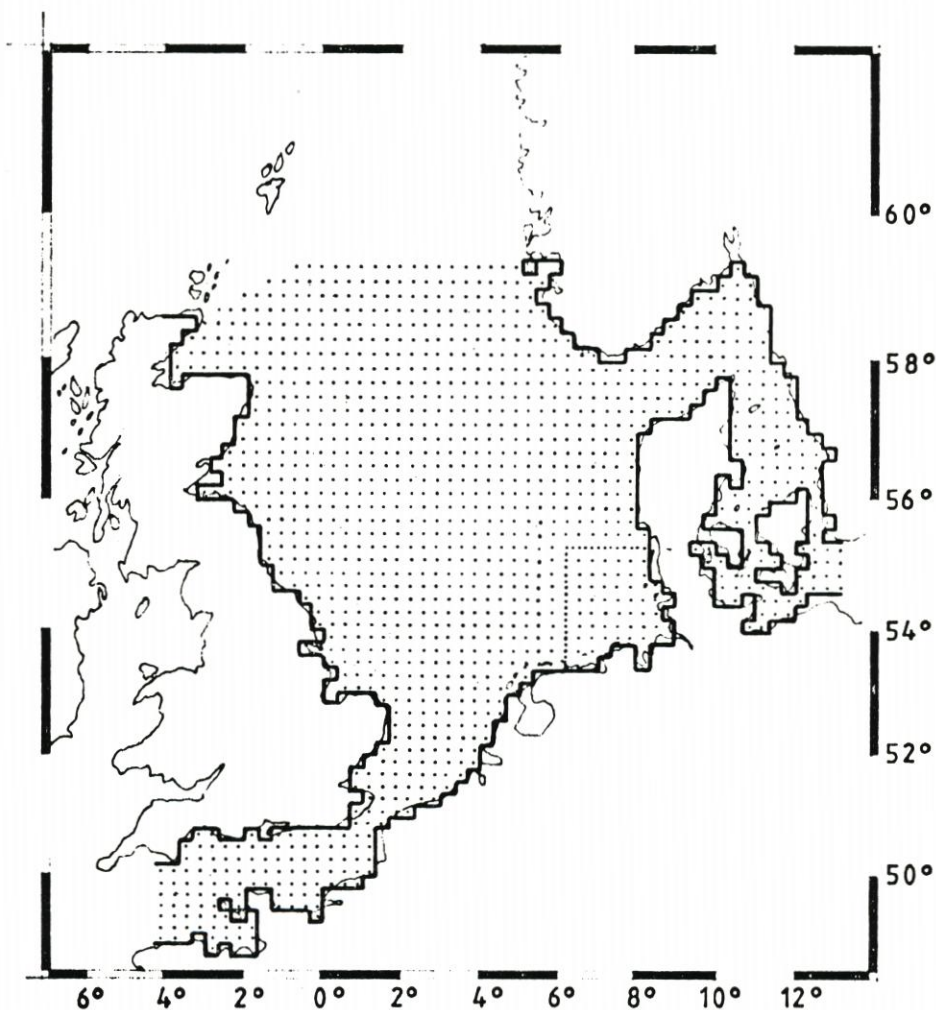


Abb. 3. Gitternetz des Nordseemodells, gepunktet: offener Rand des Basismodells

Modells hat einen meridionalen bzw. longitudinalen Gitterabstand von 12 bzw. 20 Bogenminuten. Der Zeitschritt beträgt 150 Sekunden. Das Modellgebiet umfaßt auch das Skagerrak, das Kattegat und den Ärmel-Kanal (Abb. 3). Der Nordrand liegt auf der sogenannten INOUT-Linie des Meßprogramms JONSWAP '76, für die Messungen mit Hochseepiegeln ausgeführt worden sind, die von ALCOCK und VASSIE (1977) analysiert wurden und als Randbedingung verwendet werden können.

2.2.3 Basismodell Deutsche Bucht

Das Basismodell erfaßt das Seegebiet, das durch $6^{\circ}15'$ östlich Greenwich und $55^{\circ}15'$ nördlicher Breite sowie die Nordseeküste umgrenzt ist. In den Flußmündungen der Ems, Weser und Elbe ist es in der Nähe der Pegel Rysum, Bremerhaven und Osteriff begrenzt. Die Eider wird als geschlossen aufgefaßt.

Das Gitternetz liegt parallel zur geographischen Breite und hat einen meridionalen Gitterpunktabstand von $3'$ bzw. 3 Seemeilen (5556 m). Da die Lage des Modells noch einen konstanten zonalen Gitterabstand erlaubt, der mit $5'$ (etwa 5382 m) wenig kleiner als 3 Seemeilen ist, können die Wasserstände und Strömungen in einem nahezu quadratischen Raster berechnet werden (Abb. 4). Der Rechenzeitschritt des Basismodells wurde zu 150 Sekunden gewählt.

Das Modell wird durch Vorgabe der Wasserstände an den offenen Rändern gesteuert. In den Flußmündungen stehen dafür Pegelaufzeichnungen zur Verfügung. An den Seerändern liegen aber im allgemeinen keine Messungen vor, so daß eines der in Abschn. 4 beschriebenen Verfahren anzuwenden ist.

Die Gitterweite des Basismodells erlaubt die Untersuchung großräumiger Bewegungsvorgänge. Für die Einführung der Wattentopographie und zur Berechnung kleinskaliger Erscheinungen im Küstennahbereich reicht die 3-Seemeilen-Auflösung aber nicht aus, so daß hierfür zu feineren Gitternetzen übergegangen werden muß.

2.2.4 Regionalmodelle

Für den Küstenbereich der Deutschen Bucht wurden drei Regionalmodelle entwickelt, deren Gitterweite gegenüber dem Basismodell gedrittelt wurde und somit rund eine Seemeile beträgt. Das Zeitintervall Δt wurde, da die maximale Tiefe fast die des Basismodells erreicht, ebenfalls gedrittelt und beträgt 50 Sekunden. Lage und Ausdehnung der Modelle sind aus Abb. 2 ersichtlich.

Durch den gemeinsamen Rand jeweils benachbarter Modelle und völlig gleichartige Modellstruktur ist ein problemloser Zusammenbau je zweier Regionalmodelle möglich, was für Untersuchungen im Randbereich der Modelle von Bedeutung ist. So können z. B. die beiden Regionalmodelle „Innere Deutsche Bucht“ (INDB) und „Nordfriesisches Wattenmeer“ (NF) zu einem großräumigen Regionalmodell (INDB-NF) zusammengesetzt werden, um z. B. für Untersuchungen vor der Halbinsel Eiderstedt verwendbar zu sein. Noch einfacher läßt sich aus einem Regionalmodell ein Teilmodell durch entsprechende Eingabe von Kennzahlen für die Randpunkte erstellen. Auf diese Weise ist etwa die Erstellung eines Teilmodells für das Emsästuar aus dem Regionalmodell „Ostfriesische Küste“ (OF) möglich.

In den Flußmündungen haben auch die Regionalmodelle offene Randpunkte, an denen normalerweise der Wasserstand vorgegeben wird. Um aber bei Vorausberechnungen oder

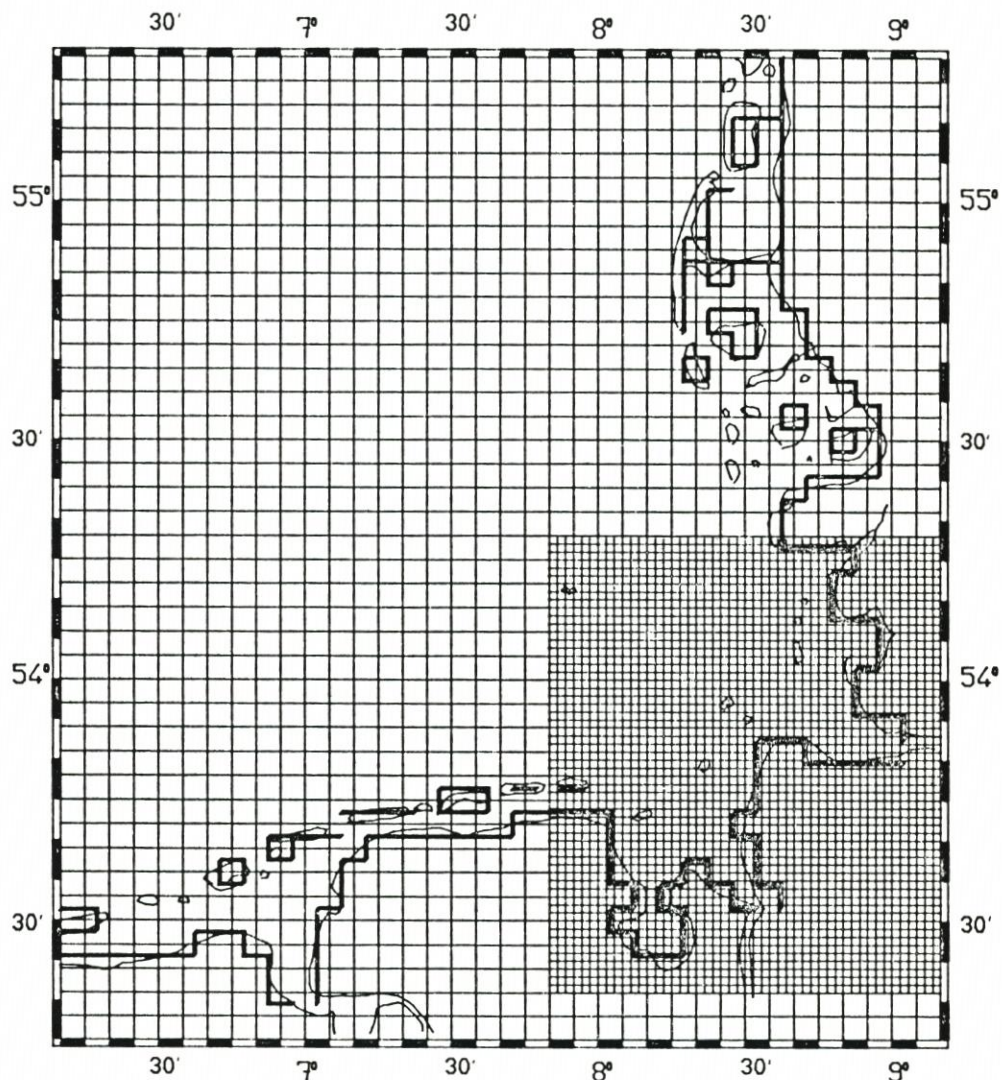


Abb. 4. Basismodell „Deutsche Bucht“ und Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ mit Gitternetzen

Untersuchungen im Mündungsgebiet frei von einer Wasserstandsvorgabe und der damit verbundenen „Einspannung“ des Vorfeldgeschehens zu sein, wurden an diesen Punkten einfache Flußmodelle (s. Abschn. 2.2.6) an das Regionalmodell gekoppelt. Diese Flußmodelle geben den Durchfluß an der Koppelstelle und ersetzen dort die Wasserstandsvorgabe.

Das Auflösungsvermögen der Regionalmodelle mit einer Seemeile Gitterabstand gestattet eine Erfassung der wesentlichen Strukturen der ausgedehnten Wattgebiete im Küstenvorfeld. Das Trockenfallen und Überfluten wird durch einen vom Wasserstand abhängigen, veränderlichen Randverlauf im Wattgebiet nachvollzogen (s. Abschn. 2.3.3). Für kleinskalige Untersuchungen im Wattgebiet sind jedoch höher auflösende Modelle (Lokalmodelle) einzusetzen.

2.2.5 Basismodell mit integrierten Regionalmodellen

Für verfeinerte Untersuchungen der Bewegungsabläufe in der Deutschen Bucht wurden die drei Regionalmodelle der Küstenregion in das Basismodell als „nested grid“ integriert. Dieses Basismodell NG vereinigt die Vorteile des feineren Regionalgitters im Küstenbereich mit dem rechenzeitsparenden gröberen, aber völlig ausreichenden Basismodellgitter im tieferen, topographisch wenig gegliederten Seegebiet. Es läßt Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Teilbereichen des Modells durch dynamische Koppelung zwischen den Gittern des Basis- und Regionalmodells zu.

Die Koppelung zwischen grobem und feinem Rechengitter erfolgt derart, daß zu einem Rechenzeitpunkt zunächst im groben Raster der Wasserstand auf der Grenzlinie berechnet wird. Mit diesen Wasserständen als Randwerten werden dann die Strömungen und Wasserstände im fein diskretisierten Modellgebiet ermittelt. Die Strömungsgeschwindigkeiten und Durchflüsse an der Grenzlinie werden nun wiederum im gröberen Modellteil als Randwerte für den nächsten Zeitpunkt verwendet.

Durch die interaktive Verbindung von feinem und grobem Rechengitter eröffnet sich eine besondere Einsatzmöglichkeit dieses Modells bei der Festlegung von Modellgrenzen für Einzeluntersuchungen. Mit Hilfe dieses Modells kann nämlich nachgewiesen werden, ob z. B. in einem Regionalmodell untersuchte Bauvorhaben noch Auswirkungen bis in den Randbereich haben, die durch Nichtberücksichtigung der Änderungen am Rand die Modellergebnisse verfälschen würden.

2.2.6 Flußmodelle

Um den Einfluß der Tideflüsse in den Regionalmodellen frei von einer Wasserstandsvorgabe erfassen zu können, wurden für den Tidebereich der Elbe, Weser und Ems einfache Flußmodelle erstellt. Die eindimensionalen Flußmodelle geben den Bewegungsablauf in den Flüssen in groben Zügen wieder. Angekoppelt an das zweidimensionale Regionalmodell ersetzen sie die Wasserstandsvorgabe an den offenen Rändern in den Flußmündungen durch Berechnung und Übergabe des Durchflusses an der Koppelstelle.

Die Koppelung zwischen zweidimensionalem Regionalmodell und eindimensionalem Flußmodell erfolgt in ähnlicher Weise wie in Abschnitt 2.2.5 beschrieben: Mit dem vom Regionalmodell an das Flußmodell übergebenen Wasserstand werden die Durchflüsse und Wasserstände im Fluß errechnet. Das Flußmodell übergibt dann den Durchfluß an der Mündung an das Regionalmodell, mit dem dieses den Wasserstand für den nächsten Zeitpunkt berechnet.

Das Elbmodell erfaßt die knapp 140 km lange Flußstrecke von Geesthacht bis Cuxhaven als sogenanntes Mehrkanalmodell. Die Gerinnegeometrie geht im Kilometerabstand in Form von treppenförmigen Querprofilen in das Modell ein. Die Flußquerschnitte sind in maximal 14 äquidistanten Tiefenstufen von 2,50 m mit veränderlicher Breite approximiert. Das explizit rechnende Modell wird bei der Ostemündung an das Regionalmodell INDB gekoppelt.

Die rund 70 km lange Unterweser vom Wehr in Hemelingen bis Bremerhaven wird im Modell durch Rechteckquerschnitte im 500-m-Abstand grob approximiert. Die Modellquerschnitte sind durch die Oberflächenbreite in Mittelwasserhöhe und die zugehörige, auf NN bezogene Tiefe bestimmt worden. In diesem, die Flußgeometrie stark vereinfachenden Wesermodell werden die Wasserstände und Strömungen implizit nach dem CRANK-NICOLSON-Verfahren berechnet (SMITH, 1964).

Das Emsmodell ist nach den gleichen Grundsätzen wie das Wesermodell erstellt worden, allerdings mit veränderlichem Ortsschritt. An der unteren Grenze wird es bei Pogum an das Regionalmodell OF gekoppelt. Die obere Modellgrenze, an der wie bei allen Flußmodellen das Oberwasser vorgegeben wird, liegt bei Herbrum.

2.3 Spezielle Aspekte der Modellierung

2.3.1 Auflösungsvermögen des Gitternetzes

Für die Berechnung der Strömungen und Wasserstände in numerischen Modellen wird das zu untersuchende Gebiet mit einem Rechengitter überzogen. Der Gitterabstand bestimmt das räumliche Auflösungsvermögen des Modells sowohl hinsichtlich der Erfassung der Bodenstrukturen als auch der räumlichen Differenzierung des Bewegungsablaufes. Einer beliebigen Verfeinerung des Gitternetzes sind durch die zur Verfügung stehenden Rechnerkapazitäten Grenzen gesetzt.

Bei impliziten Verfahren ist die Wahl des Rechenzeitschrittes nur von der gewünschten zeitlichen Auflösung abhängig; bei expliziten Verfahren unterliegt er dagegen außerdem numerischen Stabilitätsbedingungen, die ihn in der Größe begrenzen.

Das unterschiedliche Auflösungsvermögen des Basisgitters (≈ 3 Seemeilen) und des Regionalgitters (≈ 1 Seemeile) ist beim Vergleich der Abb. 5 mit den Abbildungen 6 bis 8 erkennbar. Sowohl die Küstenlinie als auch die Tiefenstrukturen werden in den Regionalmodellen deutlich besser approximiert.

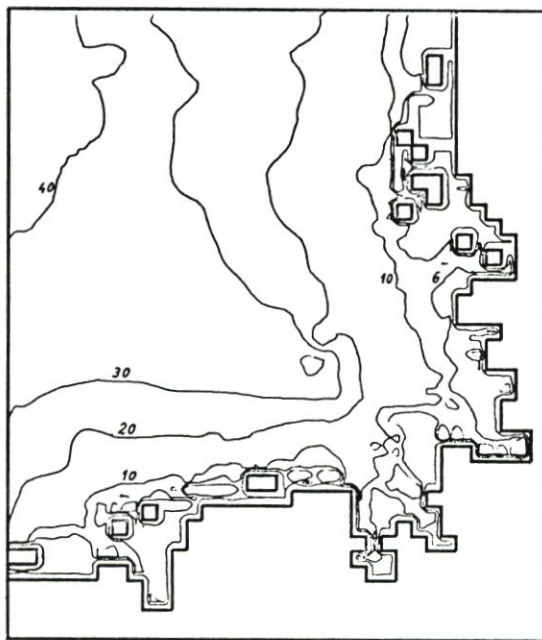


Abb. 5. Tiefenstruktur und Küstenlinie im Basismodell „Deutsche Bucht“

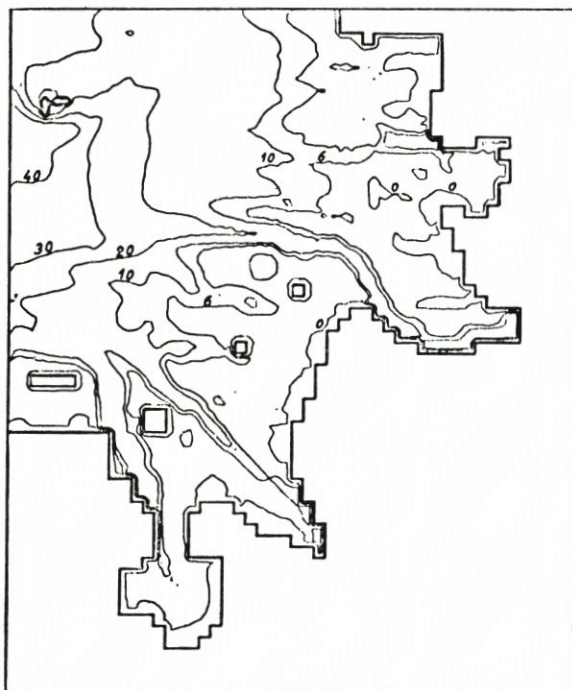


Abb. 6. Tiefenstruktur und Küstenlinie im Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“

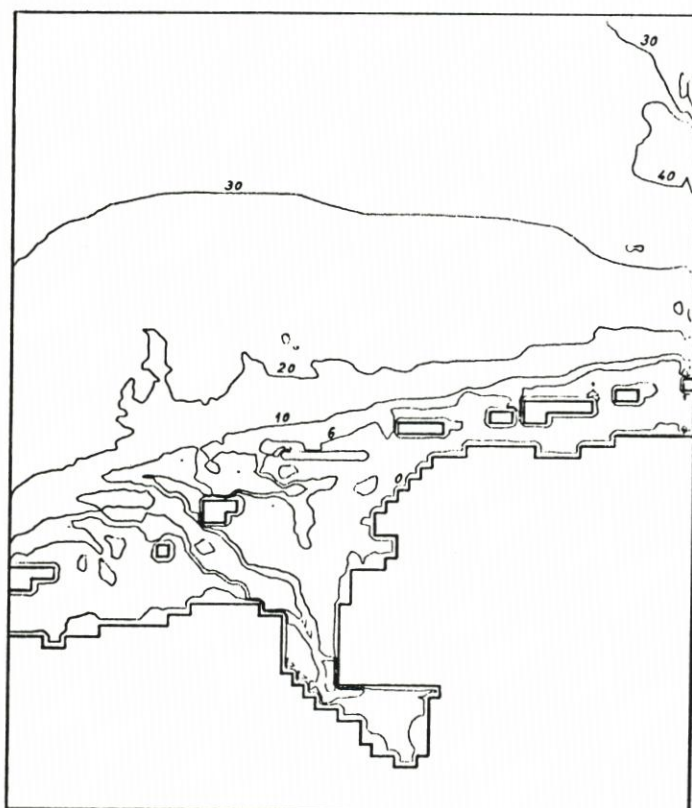


Abb. 7. Tiefenstruktur und Küstenlinie im Regionalmodell „Ostfriesische Küste“

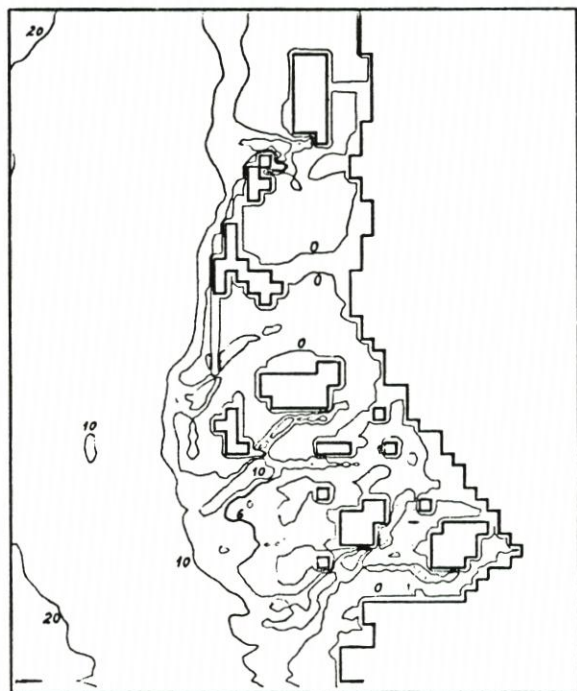


Abb. 8. Tiefenstruktur und Küstenlinie im Regionalmodell „Nordfriesisches Wattenmeer“

2.3.2 Ermittlung der Modelltiefen

Die in die Modellrechnung eingehenden Tiefen werden in den Gitterpunkten vorgeschrieben und repräsentieren die natürlichen topographischen Verhältnisse im Modell. Abhängig vom Auflösungsgrad des Rechengitters und der zu erfassenden Bodengestalt sind bei der Tiefenermittlung mehr oder weniger grobe Mittelungen erforderlich.

Besondere Beachtung bei der Ermittlung der Modelltiefen erfordert der Verlauf der Rinnensysteme und die richtige Wiedergabe des Verhältnisses zwischen Gitterabstand und Strömungsquerschnitt. Es kann zweckmäßig sein, mehrere kleinere Priele in der Natur zu einer Rinne im Modell zusammenzufassen, wie es z. B. für das Rinnensystem der Hever im Basismodell vorgenommen wurde.

Im Basismodell und in den Regionalmodellen werden die Tiefen, die im wesentlichen aus den Küstenkarten des KFKI entnommen sind, sowohl in den ζ - als auch in den u- und v-Punkten vorgegeben. Die Tiefen in den Geschwindigkeitspunkten gehen direkt in die hydrodynamischen Gleichungen ein, während die Tiefe in den Wasserstandspunkten nur beim Trockenfallen von ζ -Punkten signifikant ist. Durch die unterschiedliche Vergabe der Tiefen in den Wasserstands- und Geschwindigkeitspunkten wird eine verfeinerte Auflösung des Wattgebietes ermöglicht (s. Abschn. 2.3.3). Die Tiefenverteilung im Basismodell und den Regionalmodellen ist in Form von Isolinien der diskretisierten Tiefen in den Abbildungen 5 bis 8 dargestellt.

2.3.3 Behandlung der Watten im Modell

Die ausgedehnten Wattgebiete vor der deutschen Nordseeküste haben großen Einfluß auf die Ausbreitung der Gezeitenwelle in Küstennähe, der in den Tidekurven als sogenannter „Wattknick“ erkennbar ist. Die Überflutung der Watten erfolgt über ein Rinnensystem, das sich in Haupt- und Nebenrinnen gliedern läßt. Die Auflösung dieser Prielsysteme und des damit verbundenen Wassertransportes ist stark von der Maschenweite des Gitternetzes abhängig.

In den KFKI-Modellen wird das Wattniveau durch die Tiefen in den ζ -Punkten festgelegt, der Wassertransport aber in den Geschwindigkeitspunkten berechnet. Durch diese verschiedenartige Bedeutung der Tiefen kann die Oberflächengestalt der Watten im Modell verfeinert berücksichtigt werden, so daß die Tiefen in den Geschwindigkeitspunkten im allgemeinen etwas größer sind als die den Trockenfall kennzeichnenden ζ -Tiefen (Abb. 9).

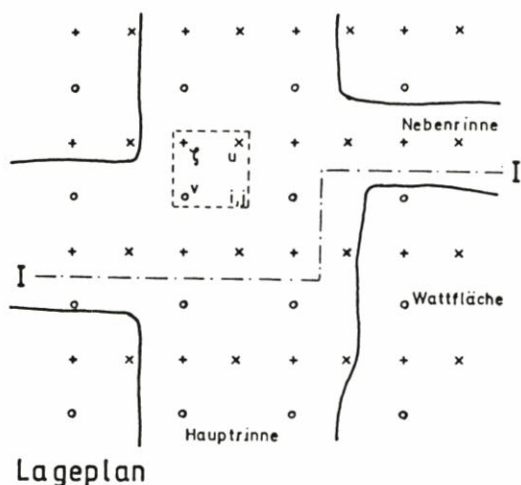
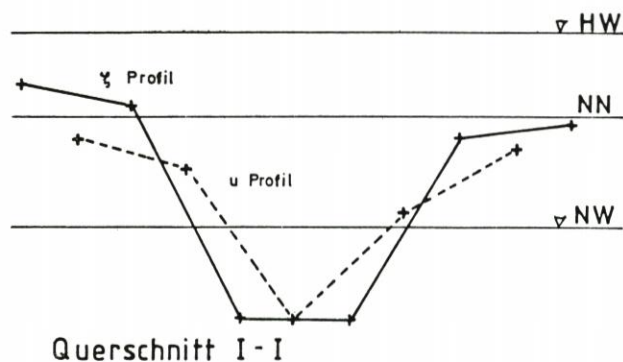


Abb. 9. Diskretisierung der Wattentopographie

Das Trockenfallen und Überfluten von Wattflächen wird im Modell durch bewegliche Ränder realisiert. Dieses bedeutet, daß ein Wassertransport von einem Gitterpunkt zum anderen nur dann erfolgen kann, wenn der Wasserspiegel oberhalb des Wattniveaus liegt. Bei

tieferliegendem Wasserspiegel wirkt die Wattkante wie ein geschlossener Rand. In Abb. 10 sind am Beispiel des Regionalmodells INDB die im Modell vorhandenen Wattflächen schraffiert dargestellt. Eine ausführliche Behandlung der Simulation der Gezeitenerscheinungen im Watt gibt BECKMANN (1981).

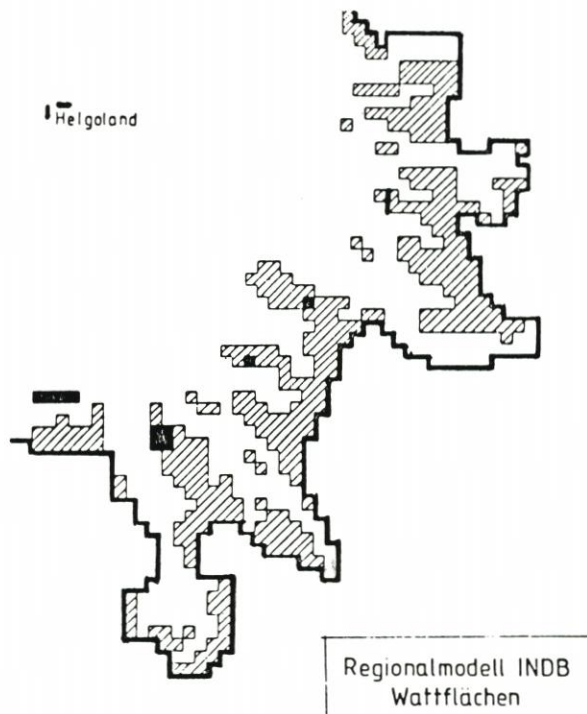


Abb. 10. Wattflächen im Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“

3. Programmierung der Modelle

3.1 Modellprozeduren

Für die Programmierung umfangreicher Modellrechnungen muß der gesamte Rechenablauf in überschaubare, in sich abgeschlossene logische Programmeinheiten gegliedert werden. Dies geschieht mit Hilfe einer Unterprogrammtechnik, bei der ein regieführendes Hauptprogramm bestimmte Teilaufgaben ausführende Unterprogramme (Subroutinen, Funktionen) aufruft.

Die Programme für die HN-Modellrechnungen wurden in der Programmiersprache FORTRAN IV geschrieben. Die allgemein formulierten Unterprogramme sind in einer Programmbibliothek gespeichert. Sie werden von einem Modellprogramm (Hauptprogramm) aufgerufen und über Parameter gesteuert. Die Modellprogramme sind als Prozeduren in Plattendateien gespeichert. Die Prozedurdatei enthält neben dem eigentlichen Modellprogramm (Quellprogramm) alle für die Organisation des Rechenablaufes durch das Betriebssystem notwendigen Kommandos sowie Bezüge auf Dateien. Eine Modellprozedur muß für eine bestimmte Modellrechnung mit aktuellen Daten versehen werden. Am einfachsten

geschieht dies mit Hilfe eines Datenbearbeitungsprogramms an einer Dialogstation (Bildschirm).

Die Gliederung eines Modellprogrammes ist in dem Ablaufplan in Abb. 11 dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, daß die für die Modellrechnungen notwendigen Steuerdaten (Felddimensionierung, Positionierung der Sonderpunkte, Rechenzeitraum, Zeitintervall, Festlegung des Umfangs der Ergebnisausgabe etc.) in der Prozedurdatei enthalten sind. Nach dem Einlesen der Tiefen aus der zugehörigen Tiefendatei beginnt die eigentliche Modellrechnung mit der Vorgabe der Randwerte aus einer Randwertdatei für die Anfangszeit der Modellrechnung. Zeitschrittweise werden dann die Differenzengleichungen bis zum Erreichen der Endzeit gelöst. Außerdem werden in Abhängigkeit von den eingelesenen Steuerparametern weitere hydrologische Größen (z. B. Reststromkomponenten) berechnet. Zum Schluß erfolgt die Abfrage von Mittel- und Extremwerten zur Bewertung der Rechenergebnisse.

3.2 Programmbibliothek

Die HN-Programmbibliothek enthält die für die Modellrechnungen und deren Auswertung erforderlichen Unterprogramme. Diese Bibliotheksprogramme sind mit allgemeinen Parametern formuliert und erfüllen nach Aufruf durch ein Modellprogramm (Hauptprogramm) mit aktuellen Parametern spezifische Teilaufgaben, wie das Einlesen von Modell- und Steuerdaten, Berechnung der Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt, Suchen von Extremwerten, Fehlerrechnungen, Druckerausgabe etc.

3.3 Plot-Programme

Für die graphische Darstellung der Rechenergebnisse auf automatischen Zeichenmaschinen (Plotter) wurden mehrere verschiedenartige Plotprogramme erstellt. Sie gestatten das Zeichnen von Wasserstands- und Geschwindigkeitskurven, Strömungsfeldern (Vektoren), Isolinen etc. und ermöglichen hierdurch einen schnellen visuellen Vergleich der Rechenergebnisse untereinander wie auch die Gegenüberstellung von Rechenergebnissen und Naturmessungen.

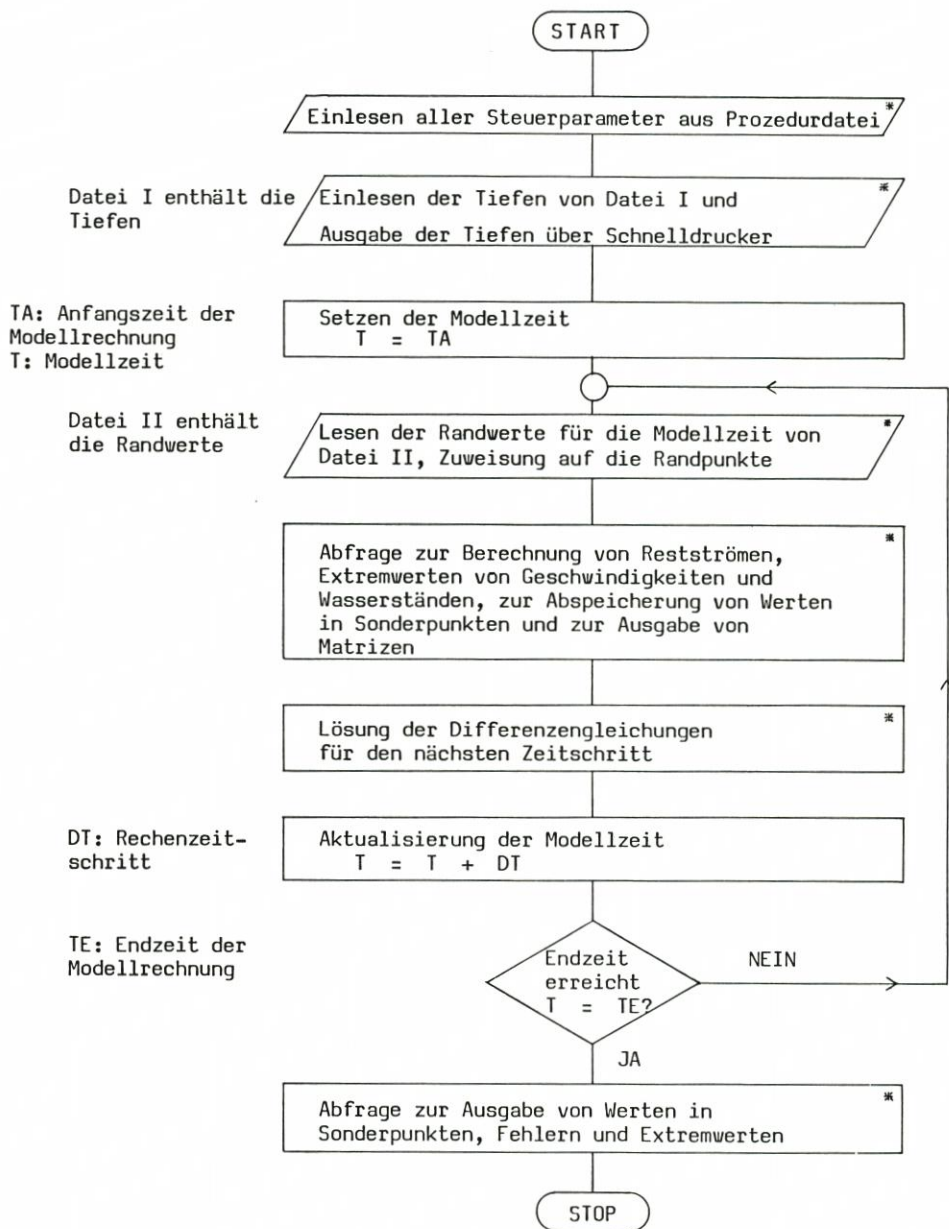
4. Eichung der Modelle

4.1 Randwerte an offenen Modellrändern

4.1.1 Allgemeines

Die Steuerung der HN-Modelle erfolgt durch Vorgabe des Wasserstandes an den offenen Modellrändern. Der Wasserstandsverlauf in den Ästuaren ist durch Pegelaufzeichnungen hinreichend erfaßt. An den seewärtigen Modellrändern liegen aber im allgemeinen keine Naturmessungen vor, so daß dort näherungsweise ermittelte Randwerte vorgegeben werden müssen. Hierfür stehen zwei Wege offen:

1. Im Nordseemodell (Abschn. 2.2.2) werden an den offenen Rändern z. B. aus Messungen bekannte Partialtiden vorgegeben und die Wasserstände an den Punkten bestimmt, die den Rändern des Basismodells entsprechen. Zwischen Basismodell und Regionalmodellen kann analog verfahren werden.



* Aufruf von Bibliotheksprogrammen

Abb. 11. Ablaufplan für die HN-Rechnungen

2. Die Randwerte werden mit den harmonischen Konstanten der Partialtiden (Gezeitenwasserstände) bestimmt, die den über 40 Jahre alten Karten der harmonischen Gezeitenkonstanten entnommen werden können.

4.1.2 Harmonische Gezeitenkonstanten

Für die Berechnung der Gezeitenbewegung in mathematischen Modellen wird oft auf harmonische Gezeitenkonstanten als Randbedingung an den offenen Rändern zurückgegriffen. Sie werden durch harmonische Analyse hinreichend langer Wasserstandsaufzeichnungen an einem Ort bei astronomisch vorgegebenen Winkelgeschwindigkeiten als Amplituden A und Phasen α der Partialtiden ermittelt. Der Gezeitenwasserstand an einem Ort ergibt sich dann mit dem Anfangswinkel ν näherungsweise durch Summation der Anteile der berücksichtigten Partialtiden zu:

$$\zeta = \sum_i A_i \cos(\nu_i + \omega_i t - \alpha_i)$$

In Flachwassergebieten, in denen die Amplitude der Gezeiten im Verhältnis zur Wassertiefe groß ist, treten infolge Bodenreibung Seichtwassertiden in den Gezeiten auf. Ihre Winkelgeschwindigkeit ist entweder ein ganzzahliges Vielfaches der astronomischen Tiden (Obertiden), oder sie sind Kombinationen verschiedener astronomischer Tiden (Kombinations- oder Verbundtiden). Die große Zahl der Seichtwassertiden und ihre beschränkte Erfassung bei der Randwertvorgabe durch harmonische Gezeitenkonstanten setzen der Gezeitenberechnung in Küstengewässern Grenzen.

4.1.3 Randwerte aus großräumigen Modellen

Die Steuerung eines Modells (z. B. Basismodell) mit Randwerten, die in einem großräumigen Modell (z. B. Nordseemodell) ermittelt wurden, ist grundsätzlich möglich. Die Genauigkeitsanforderungen an die Reproduktion des Naturgeschehens müssen im allgemeinen reduziert werden. Der Grund ist im wesentlichen im geringen Auflösungsvermögen des Nordseemodells und der damit verbundenen groben Approximation der Naturverhältnisse zu suchen, die sich auch in den für das Basismodell ermittelten Randwerten widerspiegeln.

4.1.4 Naturmessungen

Für die Nachbildung eines bestimmten Naturgeschehens im Modell ist die Steuerung mit hinreichend genau gemessenen Wasserständen auf dem Modellrand optimal. Erst hierdurch wird eine objektive Beurteilung der Reproduktionsgüte für ein bestimmtes Naturereignis ermöglicht.

Der Höhenbezug der mit Hochsepegeln registrierten Wasserstände macht derzeit noch Schwierigkeiten, so daß die Wasserstandsmessungen auf offener See mit einer Restunsicherheit behaftet sind.

Im Rahmen des Naturmeßprogramms DEBEX '81 (siehe Abschn. 5) waren von Mitte September bis Mitte November 1981 auf dem seeseitigen Rand des Regionalmodells Innere Deutsche Bucht Hochsepegel ausgelegt. Hierdurch bot sich erstmalig die Möglichkeit, das HN-Modell INDB mit gleichzeitig gemessenen Naturdaten zu steuern und die Naturähnlichkeit zu testen.

4.2 Eichung mit einer Normaltide

Zur Herstellung des Basismodells und der drei Regionalmodelle wurde ein Zeitraum ausgewählt, in dem möglichst geringe meteorologische Störungen auftraten und in dem angenähert mittlere Gezeitenverhältnisse herrschten (Normaltide). Das gewählte Zeitintervall reicht vom 8. Juli 1976, 15.00 Uhr, bis zum 9. Juli 1976, 3.25 Uhr. Nach Erreichung weitgehender Naturähnlichkeit sollte diese Normaltide Grundlage weiterführender Arbeiten (z. B. Sturmfluten) sein. Für den Vergleich der Modellergebnisse mit Naturmessungen wurden Aufzeichnungen von etwa 30 stationären Pegeln längs der deutschen Nordseeküste herangezogen.

An den Seerändern der Modelle lagen keine Naturmessungen vor. Die Modelle wurden daher unter Vorgabe der harmonischen Gezeitenkonstanten der zehn wichtigsten Partialtiden (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , μ_2 , K_1 , O_1 , P_1 , M_4 , MS_4) gesteuert. Die ortsgebundenen Gezeitenkonstanten wurden ursprünglich den Karten der harmonischen Gezeitenkonstanten entnommen. Im Zuge der Modellentwicklung wurden die harmonischen Konstanten mit Korrekturen versehen, die an neueren Analysen gemessener Wasserstandsreihen des Deutschen Hydrographischen Instituts orientiert sind (PANSCH, 1977). Die vorgegebenen harmonischen Gezeitenkonstanten der beiden dominierenden Partialtiden M_2 und S_2 in den Gitterpunkten des Basismodells sind in Abb. 12 dargestellt. Wesentliche Voraussetzung für die Herstellung der Naturähnlichkeit der Regionalmodelle war die modellmäßige Behandlung der Tiefen (s. Abschn. 2.3.3) in den Wattgebieten, wodurch charakteristische Erscheinungen in den Wasserstandskurven im Modell reproduziert werden können.

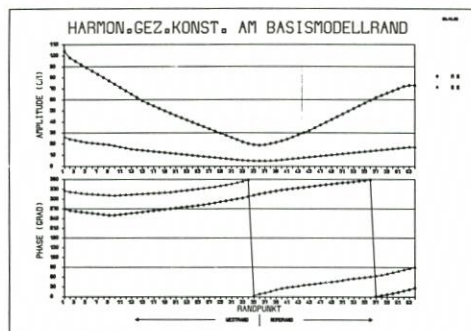


Abb. 12. Harmonische Gezeitenkonstanten (M_2 und S_2) am Basismodellrand

In einer frühen Entwicklungsphase der Modelle wurde der Seerand des Regionalmodells Innere Deutsche Bucht auf eine Diagonale von Wangerooge nach Eiderstedt gelegt, um die Nähe der Pegel Wangerooge-Nord, Alte Weser, Großer Vogelsand, Trischen-West und Linnenplate für die Bestimmung der Randwerte nutzen zu können. Die bei der Entwicklung dieses Modells gewonnenen Erfahrungen bezüglich der Tiefenermittlung und Wattbehandlung flossen in die Erstellung der beiden anderen Regionalmodelle ein, für die nicht so günstige naturnahe Randwertvorgaben bestanden. Die Ergebnisse dieser Modellrechnungen sind bei LUCK und SCHÄFER (1980) dargestellt.

Neuere Rechnungen, die mit dem Basismodell Deutsche Bucht mit integrierten Regionalmodellen (nested grid) und am Basisrand vorgegebenen Gezeitenkonstanten von zehn Partialtiden (siehe oben) ausgeführt wurden, zeigen das Reproduktionsvermögen der Modelle, wie für einige Pegel in den Abbildungen 13 bis 24 dargestellt.

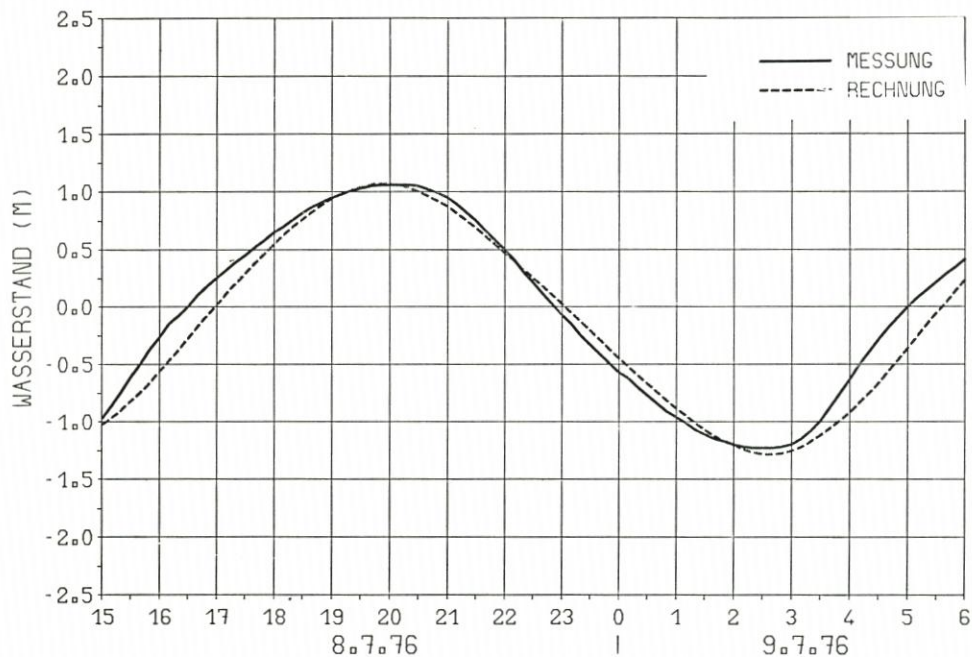


Abb. 13. Regionalmodell OF (NG)-Pegel Borkum Südstrand

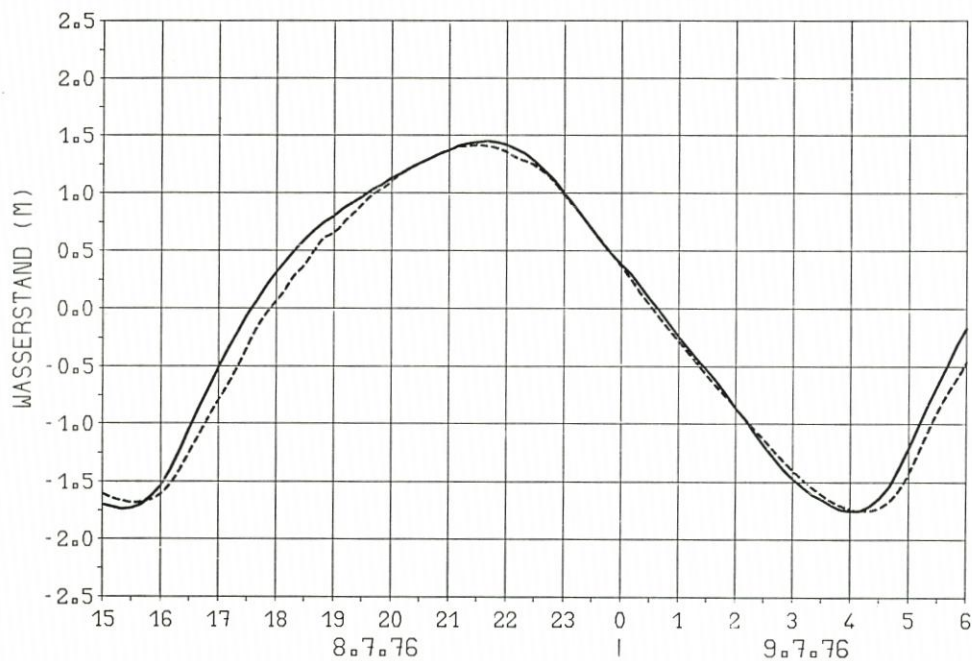


Abb. 14. Regionalmodell OF (NG)-Pegel Emden Neue Seeschleuse

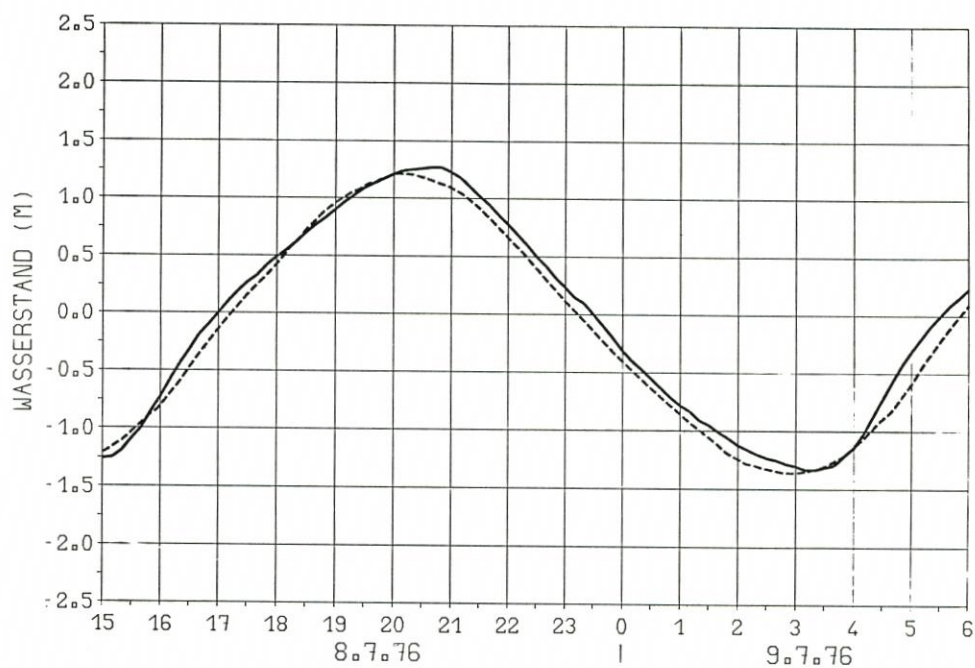


Abb. 15. Regionalmodell OF-Pegel Baltrum

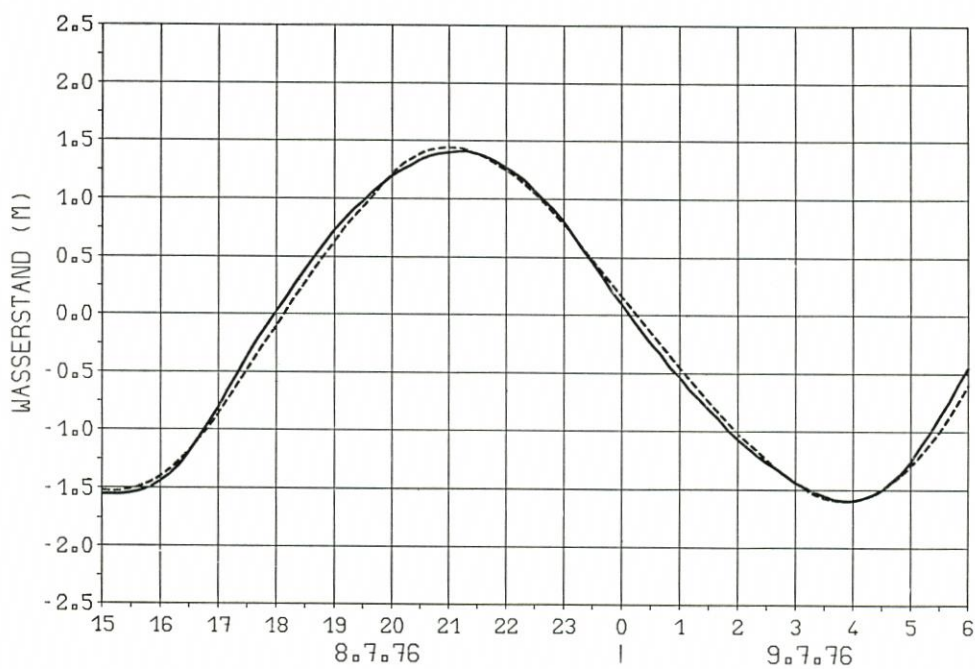


Abb. 16. Regionalmodell INDB (NG)-Pegel Wangerooge-Ost

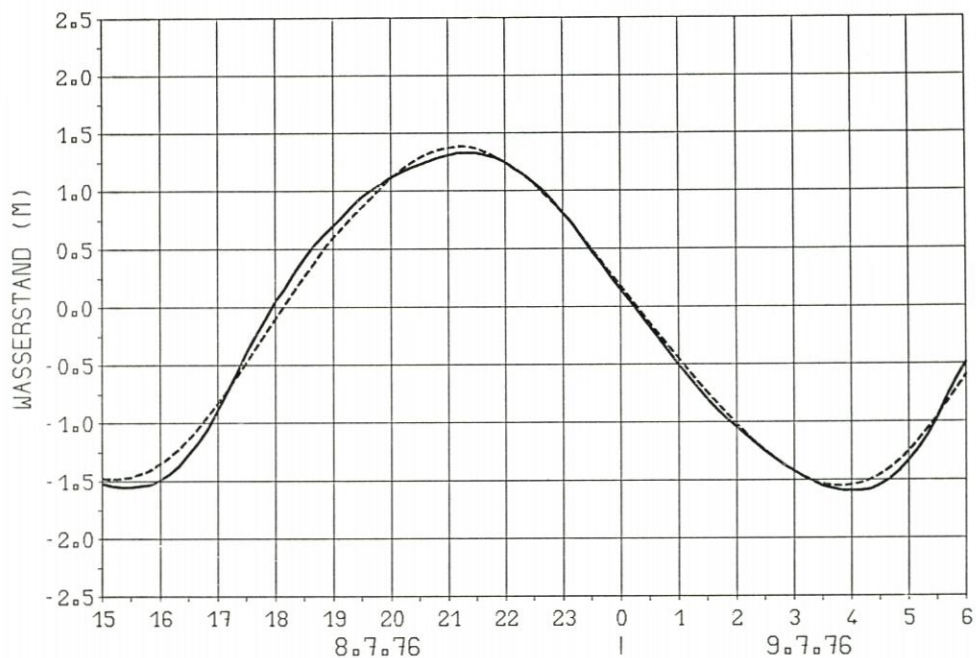


Abb. 17. Regionalmodell INDB (NG)-Pegel Alte Weser

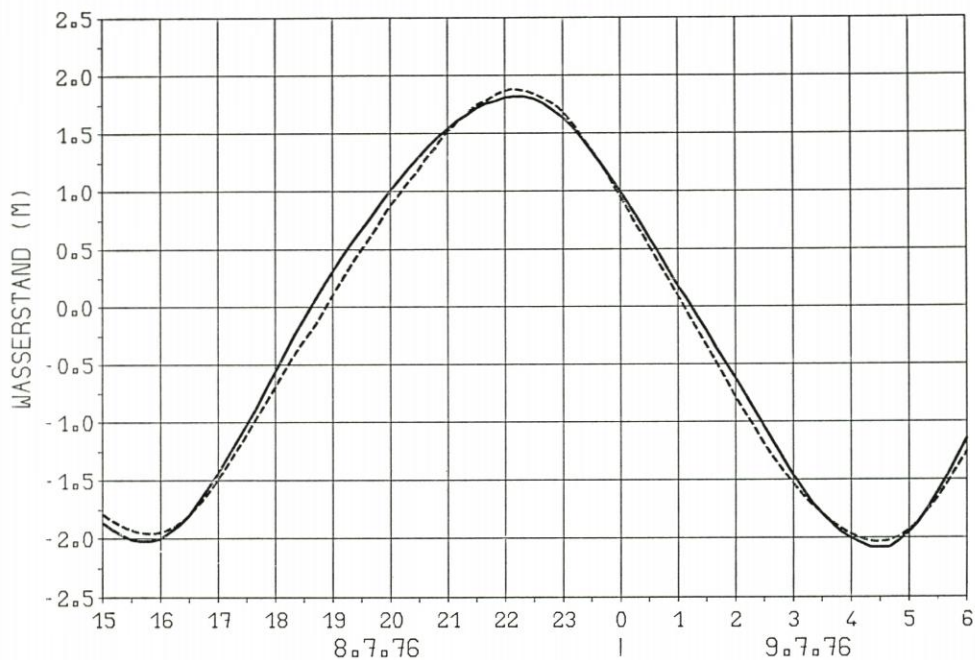


Abb. 18. Regionalmodell INDB (NG)-Pegel Wilhelmshaven-1. Einfahrt

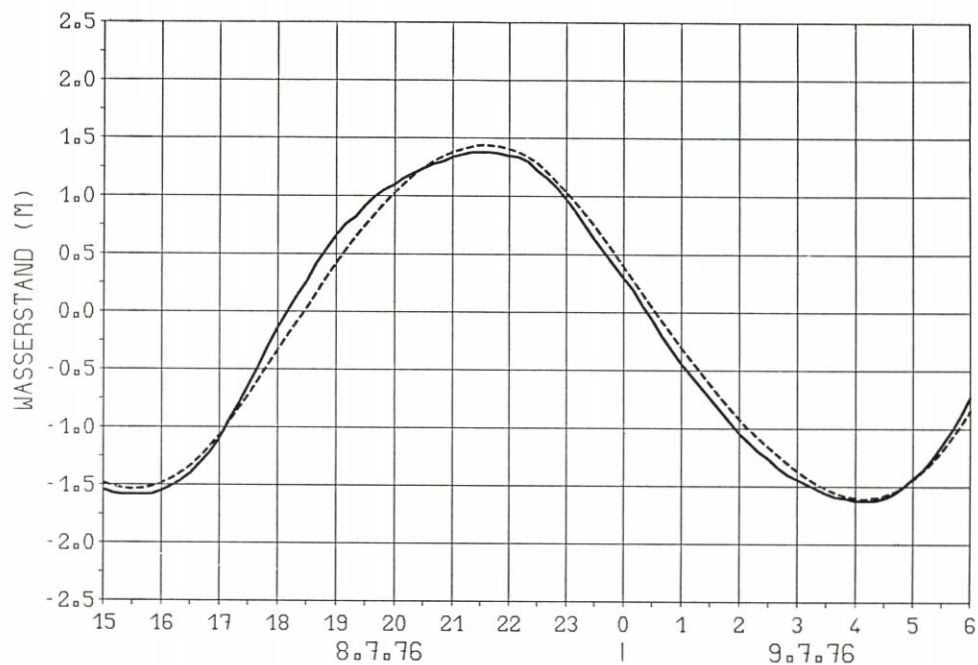


Abb. 19. Regionalmodell INDB (NG)-Pegel Scharhörn

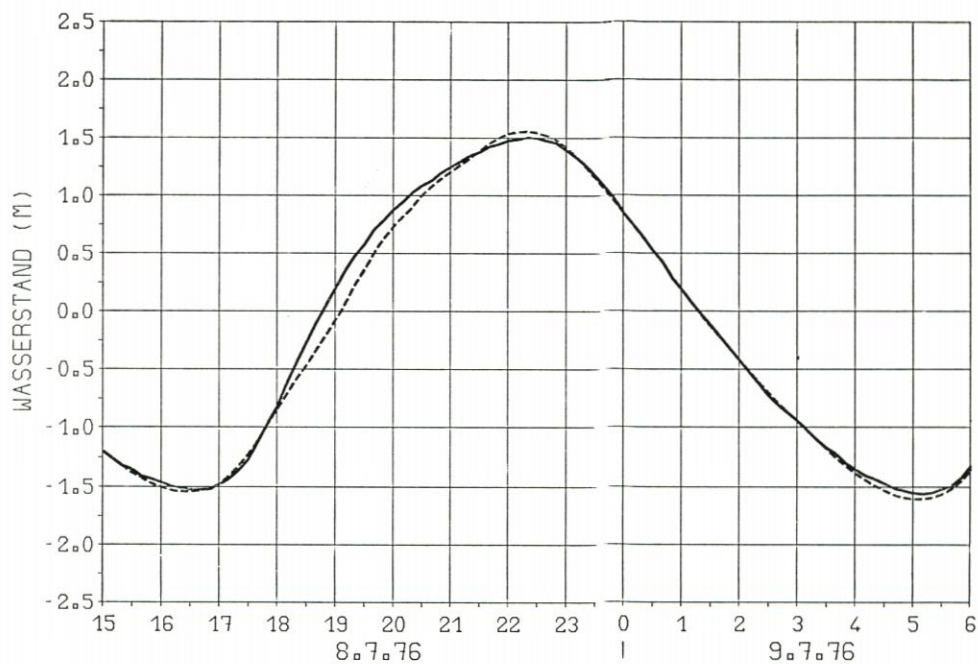


Abb. 20. Regionalmodell INDB (NG)-Pegel Cuxhaven

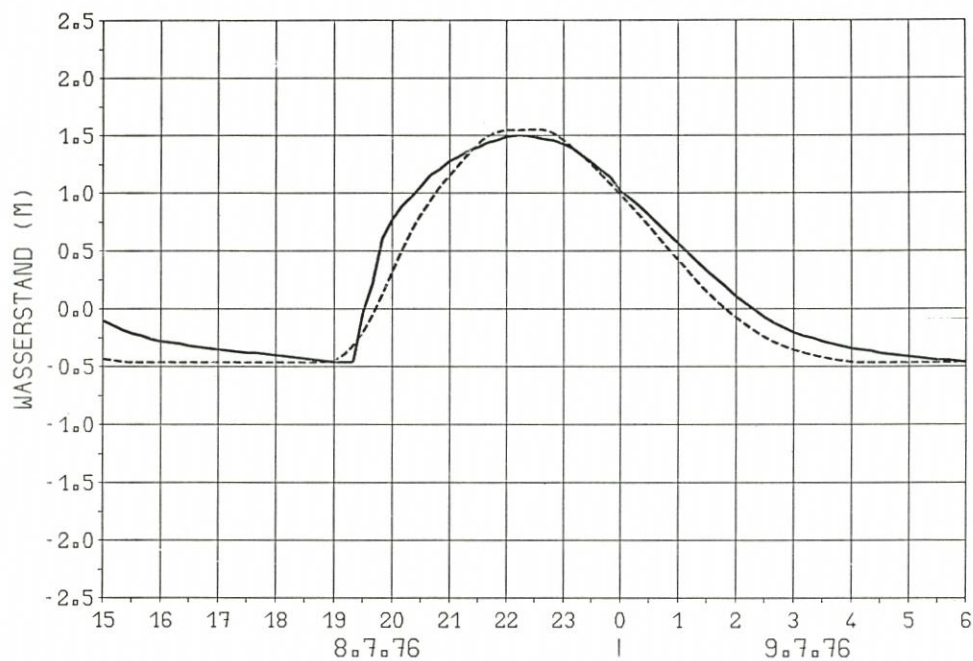


Abb. 21. Regionalmodell INDB (NG)-Pegel Friedrichskoog – Hafen

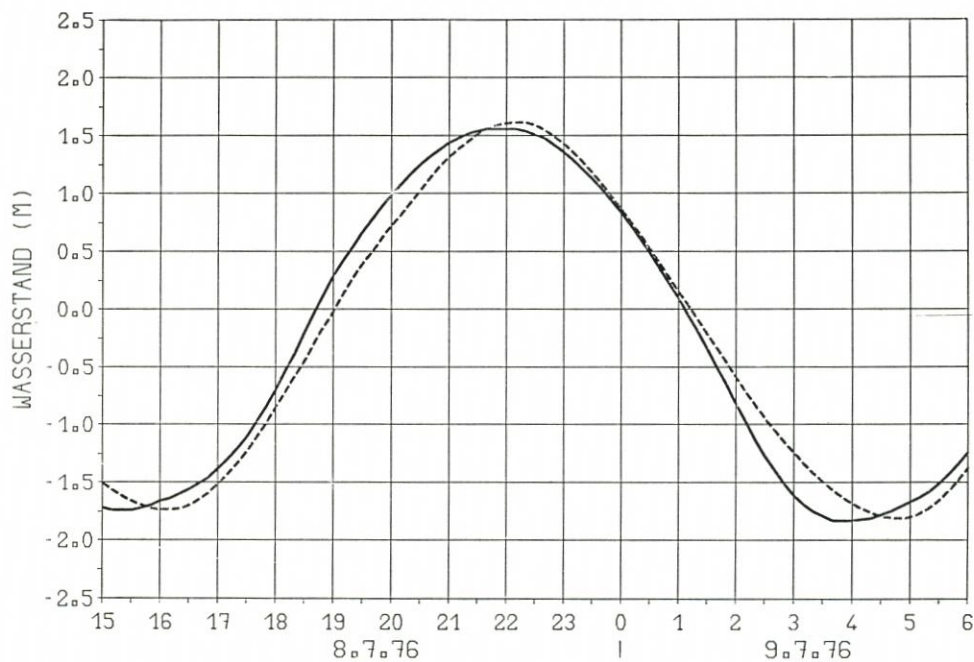


Abb. 22. Regionalmodell INDB (NG)-Pegel Büsum

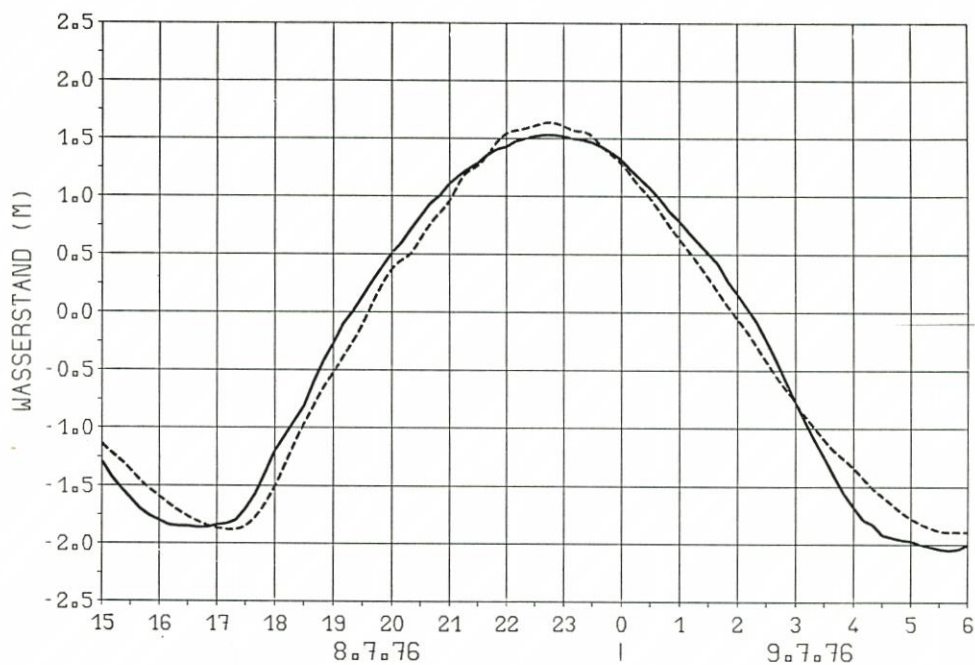


Abb. 23. Regionalmodell NF (NG)-Pegel Husum

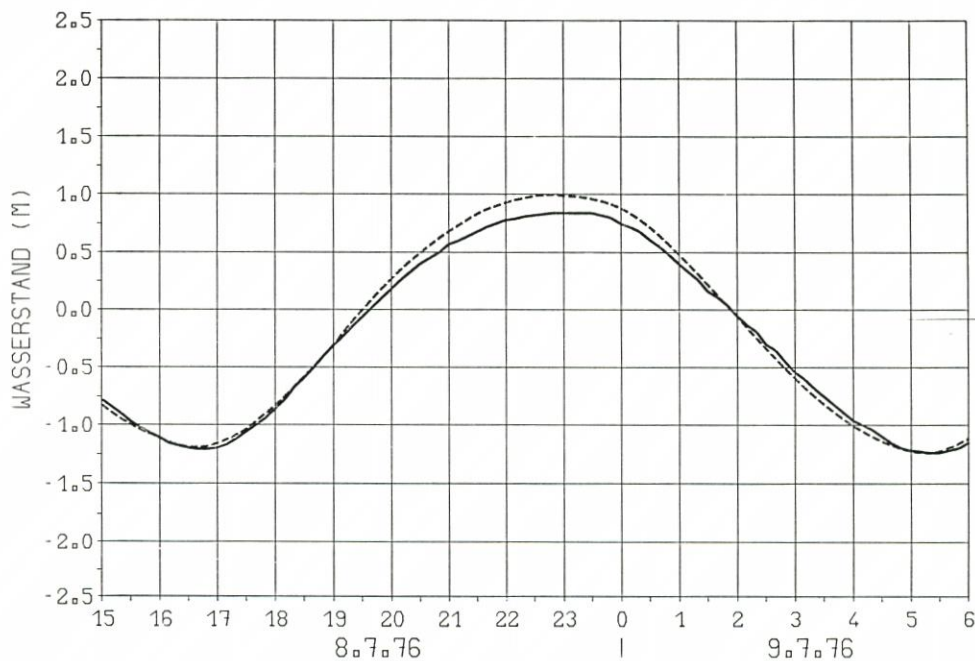


Abb. 24. Regionalmodell NF (NG)-Pegel Hörnum

5. Naturmeßprogramm DEBEX '81

5.1 Ziel und Umfang

Von Mitte September bis Mitte November 1981 wurden im Gebiet des Regionalmodells Innere Deutsche Bucht umfangreiche Naturmessungen vorgenommen. Die während dieses Projektes DEBEX '81 (Deutsche Bucht Experiment) gewonnenen Daten ermöglichen folgende Untersuchungen:

- a) Bestätigung der bisher getroffenen Annahmen am seeseitigen Rand,
- b) Test der Naturähnlichkeit anhand vergleichender Modellrechnungen – Steuerung des Modells mit gleichzeitig gemessenen Randwerten,
- c) Auswirkungen der Windfelder auf die Reproduktionsgüte.

Die Auswertung des Datenmaterials, die Modellrechnungen sowie der Vergleich der Modell- und Naturdaten erfolgte 1982. Auch dieses Vorhaben wird durch den Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) erheblich gefördert.

Die Planungen für dieses Projekt begannen 1979. Am 26. März 1981 beschloß das KFKI, das Programm DEBEX '81 zu realisieren. Ziel des Vorhabens war, sowohl die Voraussetzungen für eine optimale Steuerung eines Modells zu schaffen – d.h. die Registrierung von Tidewasserständen an hinreichend vielen Meßstellen auf den offenen Rändern – als auch anhand vergleichender Modellrechnungen die Naturähnlichkeit zu testen.

Eine alleinige Überprüfung des Basismodells erschien aus mehreren Gründen nicht sinnvoll. Einerseits erfordert das hierfür benötigte großräumige Meßnetz einen hohen geräte-technischen Aufwand sowie erhebliche Betreuungskapazität, andererseits ist das besonders interessierende Küstengebiet nur in idealisierter Form modelliert, wodurch dort die Naturähnlichkeit von vornherein eingeschränkt ist. Die gleichzeitige Überprüfung von zwei oder sogar drei Regionalmodellen war ebenfalls nicht möglich, da bei den betreffenden Dienststellen die dafür benötigte Kapazität an Geräten und Personal nicht verfügbar war. Für den Test wurde das Regionalmodell Innere Deutsche Bucht gewählt, da dieses Gebiet morphologisch und strömungsmäßig außerordentlich komplex ist: Wattgebiete, Flußmündungen und Tiefwasser kommen vor.

Die Ausführung der Naturmessungen wurde in den Herbst 1981 gelegt, da während dieser Jahreszeit unterschiedliche Wetterlagen zu erwarten waren, sowie die meteorologischen Experimente KonTur (Konvektion und Turbulenz) und PUKK (Projekt zur Untersuchung des Küstenklimas) stattfanden. Somit stand für die Modellrechnungen besonders umfangreiches Datenmaterial der meteorologischen Vorgänge zur Verfügung.

Der Vergleich der Werte aus Natur und Modell sollte der Abschätzung der Reproduktionsgüte des Regionalmodells Innere Deutsche Bucht bei unterschiedlichen Tiden und unter Berücksichtigung der Windverhältnisse dienen. Zielsetzung war dabei im wesentlichen, das INDB-Modell – insbesondere in den morphologisch stark gegliederten Küstengebieten – hinsichtlich der Übereinstimmung der Wasserstände sowie der Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen in Natur und Modell zu überprüfen. Für eine Normaltide konnte eine solche Übereinstimmung – zumindest bezüglich der inneren Logik des Modells – bereits nachgewiesen bzw. festgestellt werden, daß sich Abweichungen im Rahmen tolerierbarer Grenzen bewegen (LUCK und SCHÄFER, 1980). Des weiteren ist beabsichtigt, jene Tidewasserstände zu ermitteln, bis zu welchen das vorhandene – aus einer Normaltide entwickelte – Modell ohne Modifikation noch angewendet werden kann.

5.2 Planung und Durchführung der Messungen

Das Meßprogramm wurde der Funktionsweise des zu vergleichenden Modells Innere Deutsche Bucht angepaßt. Für eine ideale Verifizierung müßten in jedem der wasserführenden Gitterpunkte Wasserstand, Wind (Geschwindigkeit und Richtung), Luftdruck sowie Fließgeschwindigkeit des Wassers (Größe und Richtung) bekannt sein. Da ein so umfangreiches Naturmeßprogramm nicht realisierbar wäre, wurde ein Meßnetz entwickelt, das von den beteiligten Dienststellen zu bewältigen war.

Das vorhandene stationäre Pegelnetz – bestehend aus 38 Küstenpegeln im Gebiet des INDB-Modells – wurde um 12 mobile Schwimmertidepegel sowie 16 Hochseepegel, die überwiegend am seewärtigen Rand ausgelegt wurden, ergänzt (ROHDE und WIESE, 1982). Die Tideströmungen wurden in den Hauptstromrinnen mit 11 Flachseestrommessern sowie mit sechs Wattstrommessern auf den Wattwasserscheiden gemessen. Um einen direkten Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten von Modell (Geschwindigkeitsintegral einer Wassersäule) und Natur zu ermöglichen, wurde an sechs Stationen die Vertikalverteilung der Strömungsgeschwindigkeit über jeweils eine Tide in verschiedenen Tiefen erfaßt. Meteorologische Messungen wurden während des Programms in verstärktem Maße vorgenommen.

Beim Aufbau und bei der Betreuung des Meßnetzes sowie bei der Datenaufbereitung wirken mit:

- Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney (Federführung)
- Strom- und Hafenbau Hamburg, Referat Hydrologie Unterelbe, Cuxhaven
- Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide
- Wasser- und Schiffsamt Bremerhaven
- Wasser- und Schiffsamt Cuxhaven
- Wasser- und Schiffsamt Tönning
- Wasser- und Schiffsamt Wilhelmshaven
- Deutsches Hydrographisches Institut Hamburg
- Seewetteramt Hamburg
- Bundesanstalt für Wasserbau – Abteilung Küste, Hamburg

Die Vorbereitung und Abwicklung der Naturmessungen erfolgte dezentralisiert unter regionaler Verantwortung der obengenannten Dienststellen für übersehbare, zusammenhängende Gebiete. Die Aufbereitung des gesamten gewonnenen Datenmaterials wurde von der Art der Datenerfassung – Registrierpapier, Magnetband, Film, Halbleiterspeicher – bestimmt. Alle auf diesen Datenträgern registrierten Meßwerte wurden auf rechnerkompatible Bänder übertragen und in den Rechner der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe eingelesen, um für die Modellrechnungen bzw. den Vergleich von Natur- und Modelldaten abrufbar zu sein.

5.3 Modellrechnungen sowie Vergleich von Natur- und Modelldaten

Das HN-Modell Innere Deutsche Bucht wurde für einige ausgewählte Zeiträume betrieben. Die Steuerung erfolgte über gemessene Wasserstände an allen offenen Rändern des Modells. Der Einfluß des Windes im Modellgebiet (lokaler Wind) wurde als Windschub aus stündlichen Windfeldern berücksichtigt. Der meteorologische Einfluß von außen auf die hydrodynamischen Vorgänge im Gebiet des Regionalmodells war in den gemessenen Randwerten enthalten.

Für den Vergleich von Natur- und Modelldaten wurden aus etwa 100 Tiden diejenigen

ausgewählt, die für spezielle Fragestellungen charakteristisch sind. Es wurden Modellrechnungen ausgeführt für eine Normaltide, erniedrigte und erhöhte Tiden sowie für eine Sturmflut. – Über die Ergebnisse des Naturmeßprogrammes DEBEX wird nach Abschluß der Arbeiten gesondert berichtet.

6. Nutzungsmöglichkeiten

Gerade im Verlaufe des letzten Jahrzehnts sind ausgeprägte Veränderungen der mittleren und der meteorologisch beeinflussten Tideverhältnisse vor der Küste und in den Tideflüssen festzustellen (SIEFERT, 1982). Die Ursachen dafür sind weitgehend unbekannt, wenn auch vielerlei Vermutungen geäußert werden. Um die Phänomene erklären zu können, bedarf es umfangreicher Unterlagen. Dazu gehört das Küstenkartenwerk des KFKI ebenso wie z. B. die Strömungsdaten aus KFKI-Messungen (SIEFERT et al., 1980). Aus den HN-Modellen können als wesentliche Ergänzungen Gesamtdarstellungen der mittleren Wasserstands- und Strömungsverhältnisse im Küstenvorfeld geliefert werden. Dann ist es zur Klärung dieser Veränderungen möglich, mit den vorhandenen Regionalmodellen und angeschlossenen Lokalmodellen Einflüsse etwaiger Störungen am Rande der Deutschen Bucht (z. B. Änderungen am Pegel Helgoland) auf die Tideverhältnisse in den Flüssen zu untersuchen. Demselben Zweck dient eine Festlegung der seeseitigen Wirkungsgrenze von Veränderungen in den Flüssen selbst.

Zu möglichen Sturmflutanalysen ist zu bemerken: Die Windstauverhältnisse an der Küste und in den Flüssen entwickeln sich als Summe und durch Wechselwirkungen aus

- „Grundwindstau“, der in der Nordsee bis etwa 20 m Wassertiefe entsteht,
- lokalem Windstau,
- Brandungstau und
- im Flachwasser küstenparallel transferiertem „Übertragungswindstau“.

Die Ermittlung der einzelnen Anteile und ihrer Wechselwirkungen ist nur unter Hinzuziehung von Modellen (Regional- und damit gekoppelte Lokalmodelle) möglich. So würden Voraussetzungen zu Verbesserungen bestehender Sturmflut-Vorhersageverfahren geschaffen. In diesem Zusammenhang wäre es auch möglich, die stauwirksamsten Windrichtungen für einzelne Ästuar- und Küstenabschnitte zu bestimmen. Die Verfügbarkeit der HN-Modelle für Tideberechnungen ermöglicht auch Grundsatzuntersuchungen im Vorfeld präziser Formulierung der planerischen Praxis.

Die kostengünstigen Variationsläufe solcher numerischer Rechnungen des großräumigen Tidegeschehens im Küstenbereich erlauben es, im Rahmen von Durchführbarkeitsstudien grundsätzliche Erkenntnisse zu gewinnen, die insbesondere auch für die immer mehr in den Vordergrund rückenden, kontrovers geführten umwelt-politischen Diskussionen von erheblichem Wert sind. Hier sind die HN-Modelle schnell in der Lage, in diesem Zusammenhang auftretende Problembehandlungen zu versachlichen.

Für derartige Einsatzmöglichkeiten lassen sich – teilweise in Anlehnung an ZIELKE (1979) – etwa folgende Gruppierungen unterscheiden:

1. Analyse und Beurteilung des bestehenden Zustandes eines Gewässers hinsichtlich der Strömungsverhältnisse, Thermodynamik, Wasserqualität oder Austauschvorgänge. Dabei wird der Ist-Zustand des Gewässers nachgerechnet, und es werden detailliertere Informationen erhalten als durch nur punktuelle oder flächenhafte Messungen (nur Oberflächeninformationen). Es ist denkbar, daß dadurch auch systematische Meßfehler aufgedeckt werden können. Desgleichen sind Anregungen für die Festlegung von Meßstationen bei der Konzipierung von Naturmeßprogrammen zu erwarten.

2. Prognose der Auswirkungen einer geänderten Randbedingung eines Gewässers durch entsprechende Modelleingaben. Beispiele sind Studien über vorgegebene Windstaukurven und Windfelder, geänderte Oberwasserabflüsse, Wärme- und Schadstoffeinleitungen, anhand derer Möglichkeiten, z. B. auch Überbelastungen, bei der Gewässernutzung aufgezeichnet werden können.
3. Vorhersage der Auswirkungen von Bauvorhaben am und im Gewässer durch entsprechende Modellierung. Beispiele sind insbesondere Studien mit schematisierten, baulichen Eingriffen und deren Auswirkungen bezüglich der mittleren Flutraumreduktion, Rinnenvertiefung, Sturmflutsperrungen, neuer Einleitungen (Zu- bzw. Abflußsysteme), die es erlauben, die funktionelle wie konstruktive Planung und Wirtschaftlichkeitsberechnungen auf sicherere Grundlage zu stellen, als es bisher der Fall gewesen ist.

Hiermit sind die grundsätzlichen Ziele der Modelluntersuchungen umrissen worden. Voraussetzung für den Vertrauensbereich der Rechenergebnisse ist eine hinreichende Naturähnlichkeit der verwendeten Rechenmodelle. Dazu sind einerseits genügend zusammenhängende Naturmeßdaten erforderlich, andererseits ist auch in Zukunft immer wieder auf die Grundlagenforschung einzuwirken, die Allgemeingültigkeit der zu verwendenden Modellparameter (z. B. Reibungsbeiwerte, Austauschkoefizienten) noch systematischer als bisher zu untersuchen und abzusichern.

An diesen Tide- und Sturmflutuntersuchungen sind interessiert:

- Dienststellen der Länder an den Küsten und Tideflüssen,
- Dienststellen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes,
- Deutsches Hydrographisches Institut und Seewetteramt,
- küstenorientierte Sonderforschungsbereiche und Hochschulinstitute,
- KFKI-Projektgruppen.

Um diese Aufgaben bewältigen zu können, sind – wie in der Gesamtkonzeption vorgesehen – Lokalmmodelle eng begrenzter Gebiete mit unterschiedlicher Zielsetzung erforderlich (s. Abschn. 2.2.1). Denn erst mit den Lokalmmodellen kann die Auflösung in Gitterabstände von wenigen 100 m die vor allem in Küstennähe gewünschte Genauigkeit liefern.

Untersuchungen werden zukünftig mit Modellfamilien und vielleicht unterschiedlichen Methoden ausgeführt werden. Daten zur Entwicklung dieser Modelle sind je nach Bedarf von den beteiligten Dienststellen bereitzustellen. Es wird auch Aufgabe der Dienststellen sein, rechtzeitig auf eine Weiterentwicklung der Modelle zu drängen, um deren Anwendbarkeit durch Anpassung an mögliche Änderungen des Tidegeschehens und des morphologischen Formeninventars – aber auch dem wissenschaftlichen Fortschritt folgend – jederzeit zu gewährleisten.

7. Schriftenverzeichnis

- ALCOCK, G. A. and VASSIE, J. M.: Off Shore Tide Gauge Data. Institute of Oceanographic Sciences, Bidston Observatory, Birkenhead, Data Report Nr. 10, 1977.
- BECKMANN, M.: Numerical Modelling of Shallow Water Areas. Mitt. des Inst. für Meereskunde der Univ. Hamburg, Nr. XXVI, 1981.
- COURANT, R., FRIEDRICH, K. u. LEWY, H.: Über die partiellen Differentialgleichungen der mathematischen Physik. Math. Annalen, 100, 1928.
- HANSEN, W.: Theorie zur Errechnung des Wasserstandes und der Strömungen in Randmeeren nebst Anwendungen. Tellus VIII, 1956.
- HANSEN, W.: Hydrodynamical Methods Applied to Oceanographic Problems. Mitt. des Inst. für Meereskunde der Univ. Hamburg, Nr. I, 1962a.
- HANSEN, W.: Tides. In M. N. HILL, The Sea, Vol. 1, Interscience Publishers, 1962b.
- KRÖGER, A. u. ZIERTZ, R.: Rechenanlage für HN-Modelle des Kuratoriums für Forschung im

- Küsteningenieurwesen (KFKI). Jber. 1979, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 31, Norderney.
- LORENTZ, H. A. et al.: Verslag van de Staatscomissie Zuiderzee. 's-Gravenhage, Alg. Landsdrukkerij, 1926.
- LUCK, G. u. SCHÄFER, P.: Hydrodynamisch-numerische Modelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI). Die Küste, H. 35, 1980.
- PANSCH, E.: Gezeitenuntersuchungen am Nordseemodell. Deutsches Hydrographisches Institut, 1977.
- ROHDE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI. Die Küste, H. 34, 1979.
- ROHDE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI 1979 bis 1981. Die Küste, H. 37, 1982.
- SIEFERT, W.: Bemerkenswerte Veränderungen der Wasserstände in den deutschen Tideflüssen. Die Küste, H. 37, 1982.
- SIEFERT, W., FAHSE, H., MIESSNER, F., RICHTER, H., TAUBERT, A. u. WIELAND, P.: Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins – Ergebnisse eines KFKI-Meßprogramms. Die Küste, H. 35, 1980.
- SMITH, G. D.: Numerische Lösung von partiellen Differenzialgleichungen. Verl. Vieweg, Braunschweig, 1970.
- SÜNDERMANN, J.: Ein Vergleich zwischen analytischer und numerischer Berechnung winderzeugter Strömungen mit Wasserständen in einem Modellmeer mit Anwendung auf die Nordsee. Mitt. des Inst. für Meereskunde der Univ. Hamburg, Nr. IV, 1966.
- TAYLOR, G. I.: Tidal Friction in the Irish Sea. Phil. Trans. Roy. Soc. London, A. 220, 1919.
- VAN VEEN, J.: Water Movements in the Strait of Dover. Journal du Conseil, Vol. XIII, 1938.
- WIESE, H. W.: Messungen der Wasserstände in der Deutschen Bucht während DEBEX '81 – Erste Ergebnisse mit neuen Hochseepegeln. Intermaritec '82, Hamburg, Kongreßbericht, 1982.
- ZIELKE, W.: Anwendung mathematischer Modelle von Küstengewässern und Tideflüssen. Vortragsveranstaltung des Lehrstuhls für Strömungsmechanik der Universität Hannover, 1978.