

Hydrodynamisch-numerische Modelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Von Günter Luck und Peter Schäfer

Zusammenfassung

In den Jahren 1977 bis 1979 wurde für die Küsten der Deutschen Bucht ein System von HN-Modellen entwickelt. Nachdem zwei Modelle fertiggestellt und zwei weitere in Arbeit sind, wird hier über erste Resultate und daneben über die organisatorischen Voraussetzungen des Vorhabens berichtet. Für eine Normaltide können Wasserstände sowie Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen im Modell voll befriedigend wiedergegeben werden.

Es ist beabsichtigt, diese Modelle für zukünftige Aufgaben des See- und Küstenwasserbaues wie auch im Zusammenhang mit Untersuchungen natürlicher Prozesse zu nutzen. Das Modellsystem ist so angelegt, daß solche Aufgaben in feinstmöglichen Gittern behandelt werden können. Die Integration spezieller Modelle in das Gesamtsystem gewährleistet vor allem eine optimale Sicherheit bei der Randwertbeschickung.

Summary

In the years 1977 through 1979 for the coasts of the German Bay a system of HN-models has been elaborated. After two models being completed and two in preparation, besides organisatory conditions first results are reported. For normal tides the natural conditions concerning water levels and currents can be reproduced in the model with satisfactory to excellent results.

It is intended later to utilize these models for projects of the water management as well as for the judgement of natural phenomena. The model system will permit then to handle such problems in a very fine grid. The integration of special models into the system gives an optimal security of the boundary values.

Inhalt

1. Vorbemerkung	2
2. Vorgeschichte und Beginn der Untersuchungen	2
3. Organisatorische Abwicklung der Arbeiten	3
4. Zielsetzung des Vorhabens	3
5. HN-Modelle im Küsteningenieurwesen	4
6. Theorie der HN-Modelle	6
6.1 Einführung	6
6.2 Numerische Verfahren	7
7. Anwendung von HN-Modellen	8
8. Die HN-Modelle des KFKI	9
8.1 Beschreibung	9
8.2 Ergebnisse	12
9. Ausblick	14
10. Schriftenverzeichnis	25

1. Vorbemerkung

In den Jahren 1977, 1978 und 1979 wurden für die Küsten der Deutschen Bucht hydrodynamisch-numerische Modelle (HN-Modelle) entwickelt, von welchen zwei inzwischen fertiggestellt sind. Zwei weitere werden zur Zeit vorbereitet. Träger dieses Vorhabens, das durch den Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) erheblich gefördert wird, ist das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (ROHDE, 1979).

Nachdem die Arbeiten nunmehr so weit gediehen sind, daß auch erste Ergebnisse mitgeteilt werden können, erscheint es angebracht, über die mit der Herstellung der Modelle verbundenen Absichten des KFKI, die organisatorische Abwicklung der Untersuchungen und nicht zuletzt über die HN-Modelle selbst sowie die zu ihrer Entwicklung gewählten Verfahren zu berichten.

2. Vorgeschichte und Beginn der Untersuchungen

Bereits Ende 1973 wurde dem KFKI vorgeschlagen, die Erstellung eines Systems von HN-Modellen zur Berechnung von Bewegungsvorgängen in den Küstengewässern der Deutschen Bucht in Erwägung zu ziehen. Grundlage der hierzu entwickelten Vorstellungen war eine durch den Forschungsleiter Küste und den damaligen Ordinarius für Meereskunde an der Universität Hamburg ausgearbeitete Denkschrift, die für die später einsetzenden Arbeiten richtungsweisend blieb. In der Sitzung des KFKI vom 23. März 1976 wurde dann beschlossen, im Sinne dieser Denkschrift tätig zu werden. Zur Vorbereitung des Vorhabens, dessen Beginn auf den 1. Januar 1977 festgelegt wurde, sollte eine Projektgruppe in folgender Zusammensetzung tätig zu sein:

Dr. LUCK, Land Niedersachsen (Obmann)
Baudirektor Dr. VOLLMERS, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)
Regierungsbaudirektor CAROW, Land Schleswig-Holstein
Dr. SIEFERT, Freie und Hansestadt Hamburg
Bauberrat WOHLLEBEN, Freie Hansestadt Bremen

Die „Projektgruppe HN-Modelle“ trat erstmals am 14. April 1976 zusammen, um insbesondere die Zielsetzung des Vorhabens zu beraten. Grundlage der Beratung war die bereits erwähnte Denkschrift. Folgende, für die Vornahme der Arbeiten unerläßliche Voraussetzungen waren damals durch das KFKI bereits geschaffen worden:

1. Die verwaltungsmäßige Abwicklung (Personal, Mittelbewirtschaftung u. ä.) der Arbeiten durch die Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz des Landes Niedersachsen, Norderney,
2. Bereitstellung von Räumen mit Inventar und Bürobedarf durch die Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste (BAW-AK),
3. Zusage des BMFT, das Vorhaben zunächst über drei Jahre zu fördern (1977 bis 1979).

Auf Wunsch des KFKI übernahm Prof. Dr. W. HANSEN, Hamburg, die wissenschaftliche Betreuung der Untersuchungen. – Auf der Grundlage der Besprechungsergebnisse vom 14. April 1976, die von den Mitgliedern der Projektgruppe anschließend nochmals schriftlich präzisiert worden waren, erarbeitete dann der Obmann ein Programm, das am 26. Mai 1976 beraten wurde und dann endgültig fertiggestellt werden konnte, so daß es zur Sitzung des KFKI am 8. September 1976 vorlag. Nachdem das KFKI dem Programm zugestimmt hatte, wurden die vorbereitenden Arbeiten wie Finanzierung, Personalanwerbung, Beschaffung

sowie Anmietung von Geräten usw. betrieben, so daß die Untersuchungen planmäßig am 1. Januar 1977 anlaufen konnten.

3. Organisatorische Abwicklung der Arbeiten

Da in den im KFKI zusammenarbeitenden Verwaltungen entsprechende Fachkräfte nicht vorhanden waren oder für die HN-Untersuchungen nicht freigemacht werden konnten, war vorgesehen worden, eine Arbeitsgruppe mit je zwei Wissenschaftlern und wissenschaftlichen Mitarbeitern ins Leben zu rufen. Die Gruppe nahm ihre Arbeit am 1. Januar 1977 auf. Auch aus fachlichen Gründen (Rechenzentrum Nähe DHI, wissenschaftliche Kontakte) wurde sie in Hamburg tätig.

Zur Vornahme der Rechnungen wurde eine Terminalstation mit den entsprechenden Peripheriegeräten beschafft und eine Postleitung zum Rechenzentrum der BAW in Karlsruhe angemietet, wo die Rechenarbeiten ausgeführt werden (KRÖGER und ZIERZ, 1980).

Für die Gesamtarbeiten war ursprünglich ein Zeitraum von fünf Jahren veranschlagt worden. Um das Vorhaben hinsichtlich des endgültigen Erfolges abschätzen zu können, wurden zunächst drei Jahre vorgesehen (1977 bis 1979). Nachdem sich schon Mitte 1979 übersehen ließ, daß die anfangs gesteckten Ziele bis Ende des Jahres nicht erreichbar sein würden, andererseits die vorliegenden Ergebnisse eine Weiterführung der Arbeiten gerechtfertigt erscheinen ließen, wurden dann zwei weitere Jahre (1980 bis 1981) für die Fortsetzung der Untersuchungen vorgesehen.

Die „Projektgruppe HN-Modelle“ des KFKI blieb auch nach Fertigstellung des Untersuchungsprogramms tätig. Ihr oblag es, den Fortschritt der Arbeiten laufend zu beurteilen und die Erfahrungen aus den Naturmessungen im Küstenvorfeld in die Modellentwicklung einfließen zu lassen. Sie traf sich seit Beginn des Vorhabens zweimal im Jahr, um mit der Arbeitsgruppe deren Ergebnisse zu erörtern. Zu diesen Sitzungen wurden auch interessierte Gäste und Fachleute aus dem numerischen Modellwesen eingeladen. Infolge anderer dienstlicher Verwendung mußten Baudirektor Dr. VOLLMERS und Regierungsbaudirektor CAROW die Projektgruppe verlassen. Sie wurden ersetzt durch Dr. WISMER (WSV) und Dr. RENGIER (Schleswig-Holstein). Der Forschungsleiter Küste, Dr. ROHDE, war bei den meisten Sitzungen zugegen.

4. Zielsetzung des Vorhabens

In dem vom KFKI gebilligten Programm der „Projektgruppe HN-Modelle“ ist vorgesehen, aus einem vorhandenen Nordseemodell (Hansen, 1977) ein Basismodell „Deutsche Bucht“ zu entwickeln, dessen westlicher Rand etwa mit einem durch Schiermonnikoog verlaufenden Meridian identisch ist und dessen nördlicher südlich Blaavandshuk von Ost nach West verläuft. Aus diesem Basismodell waren dann folgende Regionalmodelle zu entwickeln (Abb. 1):

1. Nordfriesisches Wattenmeer,
2. Innere Deutsche Bucht von der Eider bis Wangerooge mit den Ästuaren von Elbe, Weser und Jade,
3. Ostfriesische Küste mit vorgelagerten Inseln und Emsästuar.

Die Regionalmodelle wiederum sollten die Grundlage engmaschiger Lokalmodelle sein, die für konkrete Fragestellungen oder Bauvorhaben des See- und Küstenwasser-

baues gesondert zu entwickeln sind. In diesen Fällen könnten auch kombinierte Studien von hydraulischen und mathematischen Modellen (Hybridmodelle) empfehlenswert sein.

Im Programm der „Projektgruppe HN-Modelle“ sind die Anwendungsmöglichkeiten der Modelle in allgemeiner Form wie folgt gefaßt worden:

1. Ablauf von Sturmtiden an den Küsten mit den Strömen Elbe, Weser und Ems,
2. Einfluß wasserbaulicher Eingriffe auf Sturmtiden und Normaltiden vor den Küsten und in den Ästuaren,
3. Einfluß und Entwicklung natürlicher sowie künstlicher morphologischer Änderungen auf das Tidegeschehen in den Strömen,
4. Einfluß von Tideänderungen in der Nordsee auf den Ablauf von Normaltiden in den Ästuaren und Unterläufen der Ströme,
5. Ausbreitungsvorgänge (Kühlwasser, Abwasser, Öl aus Havarien u. ä.).

Darüber hinaus können die Modelle im Rahmen von Untersuchungen zu Transportvorgängen der Feststoffe, für örtlich verbesserte Sturmflutvorhersagen, Verursacherfeststellungen bei unerlaubten Einleitungen von Öl oder Abwasser usw. eingesetzt werden.

Vorausschauend wurde – über die eigentliche Erstellung der Basis- und Regionalmodelle hinausgehend – gefordert:

1. Die ständige Weiterentwicklung der HN-Modelle muß – dem wissenschaftlichen Fortschritt im nationalen wie internationalen Bereich folgend – sichergestellt sein.
2. Die Naturähnlichkeit der Modelle ist im Rahmen der gestellten Untersuchungen laufend zu überprüfen.
3. Die Untersuchungen müssen in engem Kontakt mit den im Küsteningenieurwesen tätigen Fachleuten vorgenommen werden.

Diese Forderungen wurden in der Erkenntnis gestellt, daß die Entwicklung der HN-Modelle im Hinblick auf deren Nutzenanwendung eine über den Zeitraum der Modellerstellung verbleibende Aufgabe sein wird, da sowohl natürliche Vorgänge als auch künstliche Eingriffe örtlich Änderungen des Tidegeschehens oder des morphologischen Formeninventars bewirken können, die weit über deren unmittelbaren Wirkungsbereich hinausreichen. Insofern müssen die Modelle im Sinne fortdauernder Aktualität und unter Einbeziehung jeweils neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse ständig unter Kontrolle gehalten werden. Auch in der Erwartung, daß insbesondere die Regionalmodelle Grundlage der in naher und weiterer Zukunft zu erstellenden Lokalmodelle sein werden, ist auf die so umrissenen Forderungen nicht zu verzichten.

5. HN-Modelle im Küsteningenieurwesen

Numerische Modelle haben sich bisher im Gegensatz zur Ozeanographie im Küsteningenieurwesen nicht voll durchsetzen können. Ursächlich scheinen folgende Gründe diese Entwicklung bewirkt zu haben:

1. Dem Ingenieur erscheint im Verhältnis zum hydraulischen das numerische Modell zunächst zu abstrakt, und er bevorzugt daher im Rahmen seiner Planungen das erstere. Weiterhin ist ihm die rein mathematische Behandlung von Strömungs- und Tidevorgängen erfahrungsgemäß wesensfremd. So werden z. B. für die örtlichen Sturmflutvorhersagen bei den Nordseeanrainern numerische Modelle nicht verwendet (SIEFERT, 1980).
2. Für die Herstellung numerischer Modelle – insbesondere im amphibischen Flachwasserbereich des Küstenvorfeldes – sind oftmals Voraussetzungen zu schaffen (Pegel- und Strömungsmessgeräte auf den Rändern), die die Leistungsfähigkeit der im Küstenwasserbau tätigen Dienststellen überschreiten.

3. Die Naturähnlichkeit vorhandener Modelle genügt nicht immer den zu stellenden Forderungen.
4. Das Modell befriedigt nur im Rahmen der gewählten Gitterabstände. Beispielsweise kann ein durch Gitterpunkte nicht erfaßter Priel modellmäßig auch nicht nachgebildet werden.

Insgesamt scheinen hier einige Mißverständnisse dessen, was ein numerisches Modell leisten kann und was nicht, zugrunde zu liegen. Zunächst ist festzustellen, daß das numerische Modell ebenso wie das hydraulische lediglich eine Planungs- oder Entscheidungshilfe ist und weiterführender Arbeiten nicht enthebt. Weiterhin ähneln sich hydraulische und numerische Modelle insbesondere in den nur schwer zu meisternden Reibungsproblemen, die im ersteren durch Einbauten (Stacheldraht, Betonwürfel u. ä.) und im letzteren durch entsprechende Wahl von Reibungskoeffizienten einer Lösung zugeführt werden. Der Nachteil beider Modelltechniken beruht auch darauf, daß sie mit unveränderlichen bzw. nicht vorausschaubaren Änderungen (z. B. Morphologie) der Randbedingungen zu arbeiten haben.

Unter Berücksichtigung dieser im hydraulischen wie im numerischen Modell gleichgetreten Ausgangssituation sind die Modellergebnisse gleichermaßen zu bewerten. Der Vorteil des numerischen Modells ist vor allem dadurch gegeben, daß es über Räume ausgeweitet werden kann, in denen der Einsatz eines hydraulischen Modells häufig nicht mehr sinnvoll erscheint.

Die gerätemäßigen Ansprüche für die Herstellung numerischer Modelle scheinen in der Tat vielfach überhöht zu sein. Oftmals wird hier von der Modellseite her eine Genauigkeit angestrebt, die nicht mehr in gesundem Verhältnis zur Wirklichkeit steht, zumal das Modell in der Mehrzahl der Fälle der prognostischen Beurteilung unter dann geänderten Randbedingungen dient. In diesem Zusammenhang sollte auch bedacht werden, daß die Natur im amphibischen Bereich – insbesondere für die Reproduktion der Strömungsvorgänge – zahlreiche Hinweise (Formeninventar, Bodenverhältnisse, pflanzliche und tierische Besiedlung u. ä.) auf die Grenzen des Möglichen gibt, die bei der Erstellung von Modellen berücksichtigt werden können.

Eng verbunden hiermit ist die Herstellung des Naturzustandes im numerischen Modell. Im allgemeinen wird der Sonderfall (z. B. Sturmflutwasserstände oder Bauwerkseinflüsse) aus einer Normalflut entwickelt, für welche die Naturähnlichkeit unerläßliche Voraussetzung ist. Hierbei ist es nicht wesentlich, daß Wasserstände oder Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen in Natur und Modell völlig übereinstimmen. Wesentlich ist vielmehr, daß der allgemeine Verlauf des Geschehens richtig erfaßt ist. Auch hierfür gibt die Natur zahlreiche Hinweise. So wird die Strömungsgeschwindigkeit in Richtung auf die Wattwasserscheiden verzögert, in Wattbereichen mit stark schlickigem Sediment sind die Geschwindigkeiten geringer als in sandigem, in Wattgebieten mit z. B. Seegrasbeständen werden die geringsten Strömungsgeschwindigkeiten erreicht usw. Die richtige Wiedergabe dieser Vorgänge, die auch in zahlreichen Naturmeßdaten dokumentiert sind, die aber nur in den Gitterpunkten zum Ausdruck kommen können, macht das Modell bereits anwendungsfähig, auch wenn Natur- und Modellwerte voneinander abweichen. Das Maß der tolerierbaren Abweichungen ist dabei jeweils im einzelnen zu beurteilen.

Es liegt in der Natur der numerischen Verfahren, daß Rechenergebnisse nur in den Gitterpunkten gegeben werden können. Entsprechend müssen die Gitternetze der Aufgabe angepaßt werden. Eine derartige Anpassung erfordert eine eingehende Kenntnis des Geschehens im Küstenvorfeld und kann daher nur in gemeinsamer Arbeit von Numerikern und küstenerfahrenen Ingenieuren betrieben werden.

Mit der Bildung der „Projektgruppe HN-Modelle“ durch das KFKI ist im Rahmen der hier geschilderten Untersuchungen die Zusammenarbeit von Modellfachleuten und Küstenin-

genieuren gewährleistet. Entsprechend sind die vorstehend gegebenen Hinweise in die numerischen Modelle eingearbeitet worden. Die erzielten Ergebnisse sind für den Küstennahbereich – soweit es bei den bisher gewählten Gitterabständen möglich ist – vollbefriedigend.

Konkret hätten die numerischen Modelle des KFKI – wären sie anwendungsreif gewesen – in jüngerer Vergangenheit z. B. bei folgenden Planungen sinnvoll eingesetzt werden können:

1. Abschätzung der Änderungen der Strömungsverhältnisse auf dem Juister Watt in Zusammenhang mit der Verlegung der Gasrohrleitung aus dem Ekofisk-Feld,
2. Berechnung der Tidewasserstände in der Ems nach Eindeichung der Leybucht,
3. Ermittlung des Einflusses künstlicher Rinnen auf Strömung und Sedimentation im Rahmen der Hafenplanungen auf Juist und Spiekeroog,
4. Bearbeitung von hydrologisch/morphologischen Entwicklungen im Zusammenhang mit den Planungen zum Dollarthafen,
5. Beurteilung von Ausbreitungsvorgängen bei Abwassereinleitungen (z. B. veenkoloniale Abwässer im Emsästuar und neuerdings Kaliabwässer in der Außenweser),
6. Abschätzung hydrologisch/morphologischer Vorgänge im Rahmen größerer Planungen des Hafenbaues (z. B. Neuwerk/Scharhörn), der Binnenentwässerung (z. B. Eidersperrwerk) oder des Küstenschutzes (z. B. Abdeichung der Nordstrander Bucht),
7. Vertriftung von Öl bei Tankerunfällen.

Die angeführten Beispiele zeigen ein breites Anwendungsspektrum von HN-Modellen im Rahmen der Aufgaben des Küsteningenieurwesens, und es ist davon auszugehen, daß sie auch in Zukunft in vielfacher Hinsicht nutzbringend angewandt werden können. Es sei aber nochmals darauf hingewiesen, daß das HN-Modell ebenso wie das hydraulische lediglich eine Planungshilfe ist und die Eigenarbeit der Ingenieure in den Wasserbauverwaltungen nicht überflüssig werden läßt.

6. Theorie der HN-Modelle

6.1 Einführung

Schon seit NEWTON sind Physiker, Mathematiker und Ingenieure bemüht, Verfahren zu entwickeln, die es gestatten, die Gezeitenerscheinungen im Weltmeer, in den Rand- und Nebenmeeren und den Tideflüssen qualitativ und quantitativ zu erfassen. Trotz aller Fortschritte ist es bisher nicht gelungen, die Ergebnisse der Gezeitentheorie mit den an den Küsten der Ozeane und Inseln gemessenen Wasserständen in Einklang zu bringen.

Begründet ist diese unbefriedigende Entwicklung in dem Versuch, mathematische Lösungen von idealisierten Ozeanen herzuleiten. Letztere weichen vor allem in der Morphologie und der Küstengestalt entscheidend von den natürlichen Meeren ab. Es hat sich aber gezeigt, daß gerade Tiefenverteilung und Küstenkonfiguration eines Meeres die Bewegungsvorgänge wesentlich beeinflussen. Erst durch den Einsatz numerischer Methoden wurde dieses Problem einer, wenn auch nur näherungsweisen Lösung zugänglich. Noch bevor Computer zur Verfügung standen, berechnete DEFANT (1925) so die Gezeiten in der Adria. Er behandelte das Gebiet als kanalartiges Meer (eindimensional), indem die Bewegungen in Querrichtung gegenüber denen in Längsrichtung vernachlässigt werden. In großem Ausmaß verwendete LORENTZ (1926) die numerische Mathematik im Planungsstadium für die Abdeichung der Zuiderzee. Später wurde dann das Randwertverfahren (HANSEN, 1948) entwickelt, das wegen seiner Linearität getrennt auf die Partialtiden angewendet werden muß.

Da aber in küstennahen Gezeitenregionen eine enge Wechselwirkung zwischen den

Bewegungen in den Prielen und auf den Watten besteht, wurde es erforderlich, ein Verfahren zu entwickeln, das in Flachwasser- und Wattgebieten anwendbar ist und somit auch nichtlineare Effekte berücksichtigt.

6.2 Numerische Verfahren

Alle mathematischen Tidemodelle basieren auf den hydrodynamischen Differentialgleichungen von NAVIER und STOKES sowie der Kontinuitätsgleichung. Es sind grundsätzlich ein-, zwei- und dreidimensionale Modelle möglich. In den meisten Anwendungsfällen wird dieses Gleichungssystem so umgeformt, daß es für den Wasserstand ζ und die zwei Geschwindigkeitskomponenten u und v in einem karthesischen Koordinatensystem gilt (zweidimensional). Die Gleichungen lauten dann in der Form von EULER:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - A \Delta u - f v + \frac{r u}{H} \sqrt{u^2 + v^2} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} &= K_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - A \Delta v = f u + \frac{r v}{H} \sqrt{u^2 + v^2} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} &= K_y \end{aligned} \right\} \text{ (Bewegungsgleichungen)}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} H u + \frac{\partial}{\partial y} H v = 0 \text{ (Kontinuitätsgleichung)}$$

- mit $H = h + \zeta$
 h = Tiefe unter NN
 A = Austauschkoeffizient
 f = Coriolisparameter
 r = Reibungskoeffizient
 g = Erdbeschleunigung
 K_x, K_y = Komponenten der äußeren Beschleunigung

Der Reibungsterm entspricht einem Ansatz von TAYLOR. In den Termen für die äußere Beschleunigung sind die Druckgradienten und Schubspannungen an der Oberfläche des Wassers enthalten.

Der Übergang von den Differentialgleichungen zu den einer numerischen Behandlung zugänglichen Differenzengleichungen ist abhängig von dem verwendeten Gitternetz. Die Benutzung eines regelmäßigen, im allgemeinen viereckigen Netzes führt zu der „finiten Differenzen-Methode“. Die unregelmäßigen Netze, meist dreieckig gestaltet, werden durch die „finite Elemente-Methode“ repräsentiert.

In den Differenzengleichungen sind die gesuchten Größen ζ , u und v für aufeinanderfolgende Zeiten so miteinander verknüpft, daß aus bekannten die unbekannten Werte bestimmt werden können. Jede Lösung eines Differenzengleichungssystems, das sowohl räumliche als auch zeitliche Inkremente enthält, unterliegt einem Stabilitätskriterium. Dieses sagt aus, wie groß das Verhältnis zwischen Zeitschritt und Ortsschritt in Abhängigkeit von den Koeffizienten des Gleichungssystems sein darf, damit seine Lösung konvergiert. Je nach Formulierung der Differenzen kann dasselbe Gleichungssystem gar nicht oder immer stabil sein. Bei Verwendung von einfachen zeitlichen und zentralen räumlichen Differenzen ist das Gleichungssystem als explizites Verfahren instabil, als implizites Verfahren dagegen immer stabil. Durch zeitliche Trennung der Bewegungsgleichungen von der Kontinuitätsgleichung – bei der Berechnung des Wasserstandes werden schon die Geschwindigkeitskomponenten des näch-

sten Zeitschritts verwendet – ergibt sich die Stabilitätsbedingung von COURANT, FRIEDRICHS und LEWY (1928):

$$\Delta t \leq \frac{\Delta s}{\sqrt{2gh}}$$

mit Δt = Zeitschritt, Δs = Ortsschritt. Dieses Kriterium muß für alle Gitterpunkte gelten. Das Verfahren ist aber nach wie vor explizit.

Gelegentlich kann es von Nutzen sein, im- und explizites Verfahren zu verknüpfen. Das geschieht mit Vorteil, wenn die Ortsschritte in x- bzw. y-Richtung verschiedene Größenordnung haben, wie z. B. bei einem Fluß. Dann wird in Richtung des kleineren Gitterabstandes implizit, in der anderen Richtung explizit gerechnet.

Vervollständigt wird das Gleichungssystem durch die Bestimmung und Formulierung der Randbedingungen. Es werden zwei Arten von Rändern unterschieden. Offene Ränder sind Begrenzungen des Modells, die aber keine Grenzen des Bewegungssystems darstellen. Die Vorgabe des Wasserstandes und des Gradienten einer Geschwindigkeitskomponente als Funktion der Zeit ist hier eine vollständige Randbedingung. Wird der Rand so gelegt, daß der Gradient der Tangential- oder der Normalkomponente der Geschwindigkeit identisch Null gesetzt werden kann, ist die Bedingung numerisch besonders einfach. Geschlossene Ränder sind absolute Grenzen des Bewegungssystems, die durch die Forderung einer verschwindenden Normalkomponente der Geschwindigkeit an diesen Stellen realisiert werden.

7. Anwendung von HN-Modellen

In der Praxis des Küsteningenieurwesens und der Küstenforschung ist häufig zu beurteilen, welchen Einfluß Bauwerke nach ihrer Fertigstellung auf ihre Umgebung ausüben werden. Hier interessiert vor allem das Ausmaß des Eingriffes in die Bewegungsvorgänge – also auf Wasserstände und Strömungen – in deren Wirkungsbereich.

Wesentliche Grundlage für die Feststellung möglicher Änderungen des Geschehens sind in solchen Fällen Naturmessungen zur Erfassung ungestörter Vorgänge. Sie lassen sich auf der Grundlage von Messungen unter Einführung von Analogieschlüssen und Indizien zwar qualifizieren, aber nur in weiten Grenzen quantifizieren. Einen Ausweg bietet hier unter anderem die Befragung der Natur durch das Experiment, z. B. in hydraulischen Modellen. Grundsätzlich stößt die Anwendung dieser Modelle im Bereich großer Maßstäbe auf Schwierigkeiten, die etwa durch die ablenkende Kraft der Erdrotation oder die Gestaltung der Steuereinrichtungen auf dem Rand zu einem Gezeitenmeer bedingt sind. Auch ist die Einbeziehung des Windes in das Modell ähnlichkeitsmechanisch noch nicht befriedigend gelöst. Hier bieten sich mathematische Modelle an. Der Einfluß der Corioliskraft und eines natürlichen Windfeldes sind simulierbar. Können die äußeren Kräfte vernachlässigt werden, so hängt die Lösung nur von der in das Modell eingegebenen Tiefenverteilung und den Randbedingungen ab. Besondere Probleme treten allerdings auf, wenn der Rand zeitlich veränderlich ist, wie im Watt. Durch eine geeignete Rechentechnik können aber auch das Trockenfallen und Überfluten im Modell erfaßt werden. Das HN-Verfahren ist sowohl für Flüsse als auch für Meere und sogar für den Weltozean anwendbar. Untersuchungsobjekte sind Gezeitenwasserstände, Gezeitenströme, allgemeine Zirkulation und windbedingte Bewegungen. Bei Erweiterung des Modells auf drei Dimensionen lassen sich auch vertikale Strömungsgradienten berücksichtigen.

Auch für Untersuchungen, die sich auf den Einfluß äußerer Eingriffe in Teilbereichen des Anwendungsgebietes beziehen, ist ein numerisches Modell geeignet. So lassen sich etwa als

„Wirkungspunkte“ bezeichnete Bereiche bestimmen, in denen eine natürliche oder willkürliche Änderung der natürlichen Verhältnisse eine Wirkung auf weit entfernte Orte hat. In der Natur kommt das z. B. in Form einer Fernwelle vor.

Weniger naturnah, aber ebenso aufschlußreich ist der Ansatz eines örtlich begrenzten Windes, dessen Stau dann im gesamten Modellgebiet analysiert wird. Es ergeben sich hieraus die für jeden Bereich „stauwirksamsten Windfelder“. Durch Hinzunahme weiterer Ansätze – etwa Zustandsgleichungen für Dichte, Temperatur und Salzgehalt – lassen sich auch Vermischungs- und Transporterscheinungen darstellen. Die Unsicherheit bei der Parametrisierung von Ausbreitungs- und Diffusionsvorgängen ist aber noch erheblich.

8. Die HN-Modelle des KFKI

8.1 Beschreibung

Für die HN-Modelle des KFKI wurde die Verwendung eines regelmäßigen Gitternetzes (Abb. 2) in einem expliziten Differenzenverfahren vorgesehen. Die verfahrensmäßige Handhabung eines solchen Modells ist besonders einfach. Alle Rechnungen werden mit einem räumlich und zeitlich konstanten Reibungskoeffizienten $r = 0,003$ vorgenommen, wodurch die Energiedissipation an einem Punkt allein von der augenblicklichen Wassertiefe und Geschwindigkeit abhängt. Auf die Berücksichtigung der konvektiven Terme und des Terms des horizontalen Impulsaustausches wird verzichtet.

Das Gitternetz des Basismodells „Deutsche Bucht“ ist parallel zur geographischen Breite angelegt. Der meridionale Abstand der Gitterpunkte beträgt 3' bzw. 3 Seemeilen (5556 m). Die Lage des Modells zwischen etwa 53° N und 55° N erlaubt noch einen konstanten zonalen Gitterabstand, der mit 5' (etwa 5382 m) wenig kleiner als 3 Seemeilen ist, so daß ein nahezu quadratisches Netz entsteht. Der West- und der Nordrand sind so gelegt, daß sie mit den Gitterpunkten eines bereits existierenden Nordseemodells zusammenfallen (Abb. 1).

In den so fixierten Gitterpunkten wurden dann aus den topographischen Karten des KFKI und der Forschungsstelle Norderney, die einheitlich auf NN bezogen sind, und den Seekarten des DHI die Tiefen und die Küstenkonfiguration bestimmt. Auf den Gitterlinien benötigt das Modell noch je eine Tiefe zwischen den Kreuzungspunkten. So ist eine möglichst genaue Erfassung der Topographie gewährleistet. Dabei muß sehr genau auf das Verhältnis zwischen Gitterabstand und Strömungsquerschnitt geachtet werden. Auch die Nord- und Ostfriesischen Inseln, jedoch keine ausgedehnten Wattflächen, werden so erfaßt. Für eine möglichst genaue Wiedergabe des Naturzustandes bzw. die Herstellung der Naturähnlichkeit wurde ein Zeitraum ausgewählt, in dem möglichst geringe meteorologische Störungen auftraten und in dem angenähert mittlere Gezeitenverhältnisse herrschten (Normaltide). Die zugehörigen Wasserstände der in der Nähe von Pegelorten gelegenen Gitterpunkte wurden ermittelt, um dort die Differenzen zwischen gemessenen und aus dem HN-Modell errechneten Wasserständen zu bilden. Das gewählte Zeitintervall reicht vom 8. Juli 1976, 15.00^h, bis zum 9. Juli 1976, 3.25^h. Wie es auch bei hydraulischen Modellversuchen üblich ist, wurde diese Tide periodisch weitergeführt.

Als Randwerte wurden für das Modell Wasserstände an den seeseitigen Öffnungen (Nordseeränder) und in den Flußmündungen benötigt. Die Ästuare sind durch Pegelaufzeichnungen hinreichend abgedeckt. An den Seerändern liegen aber keine Messungen für diesen Zeitraum vor. Aushilfsweise stehen zwei Wege offen:

1. Für ein HN-Modell der Nordsee werden auf den offenen Rändern z. B. Partialtiden

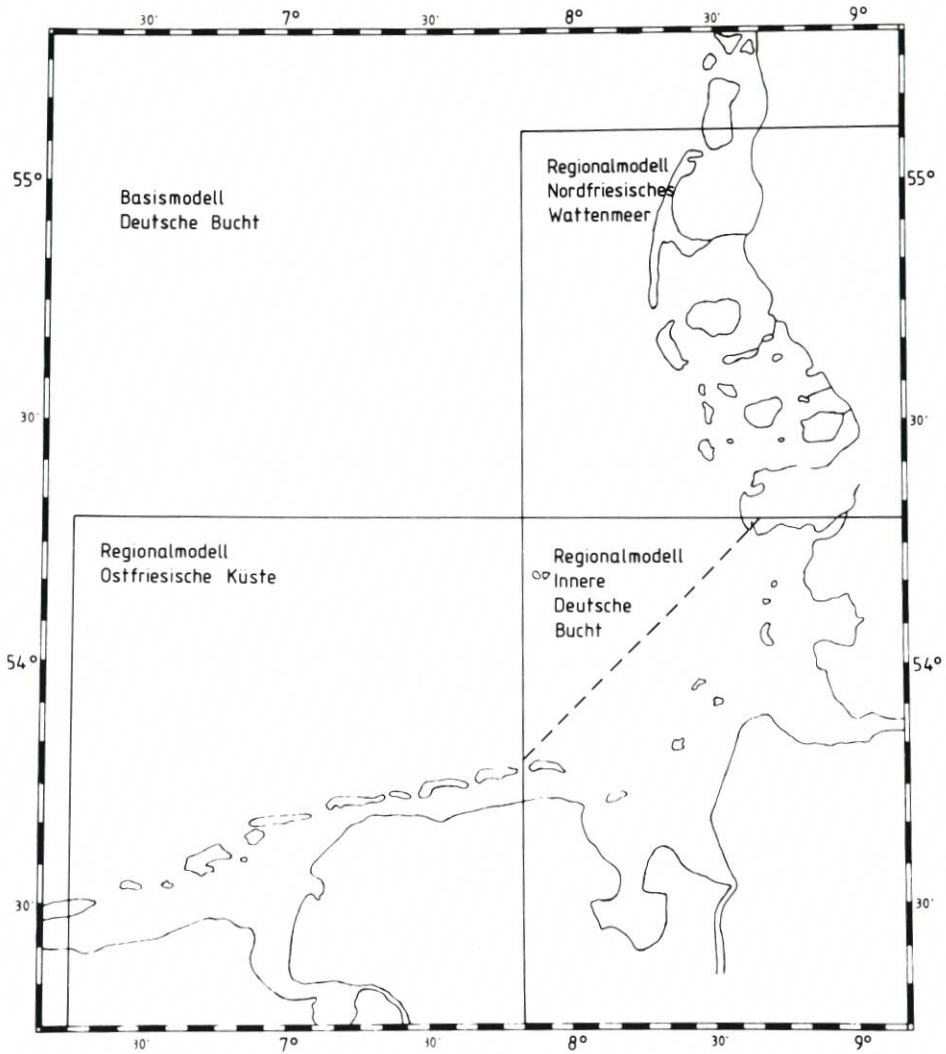


Abb. 1. Deutsche Bucht mit Grenzen der KFKI-Modelle

vorgegeben, die aus Messungen bekannt sind, und dann die Wasserstände an den Punkten bestimmt, die den Rändern des Basismodells entsprechen.

2. Die harmonischen Konstanten derselben Partialtiden auf dem Basismodellrand werden den Karten der harmonischen Gezeitenkonstanten entnommen. Da die Karten aber fast 40 Jahre alt sind, müssen Korrekturen angebracht werden.

Dieser zweite Ansatz ist angewandt worden. Die Korrektur erfolgte durch den Vergleich gemessener und errechneter Wasserstände an den im Tiefwasser gelegenen Pegeln nach der Methode der Wirkungspunkte. Da der Wirkungsbereich für die Deutsche Bucht in der westlichen Nordsee liegt, sind die Korrekturwerte für den Westrand hinreichend genau. Der Nordrand läßt sich auf diese Weise nicht mit entsprechender Genauigkeit erfassen. Allerdings ist sein Einfluß auf die Vorgänge innerhalb des Basismodells verhältnismäßig gering.

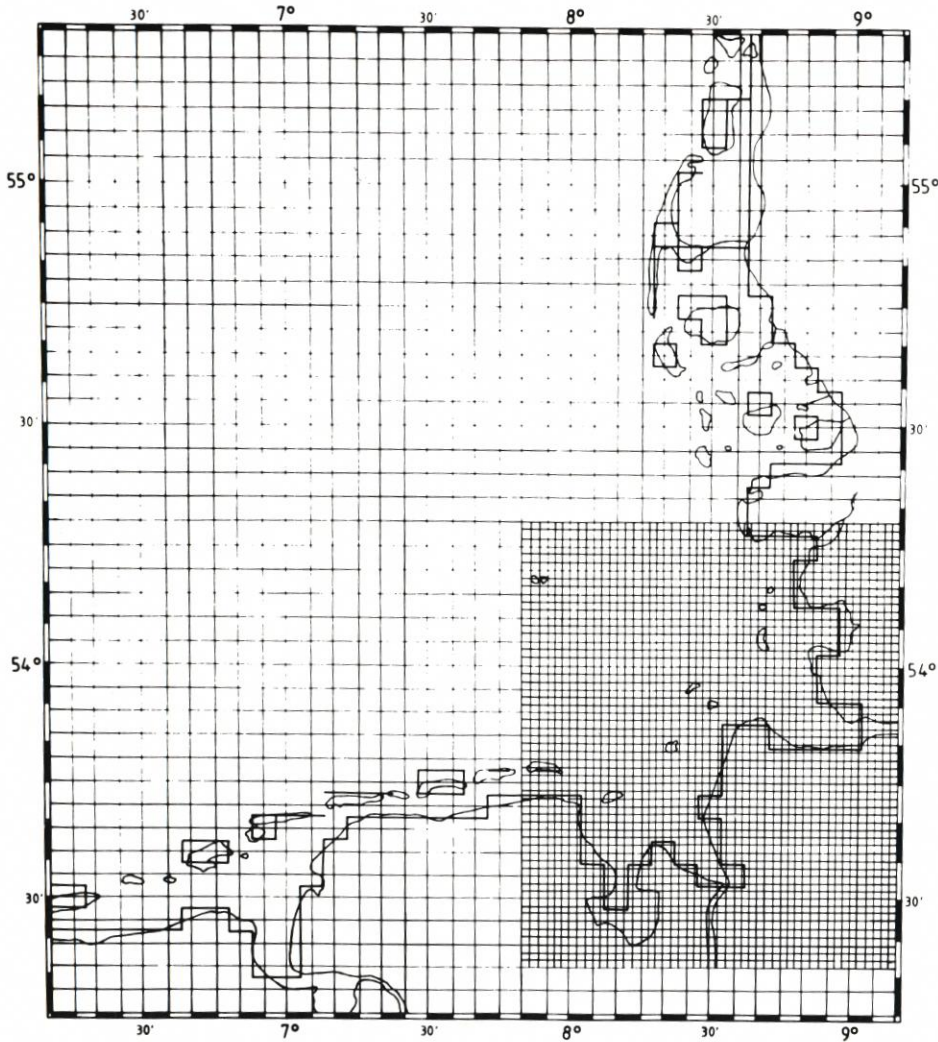


Abb. 2. Basismodell „Deutsche Bucht“ und Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ mit Gitternetzen

Aus dem Basismodell war das HN-Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ zu entwickeln. Es hat ein Gitternetz, dessen Abstände gegenüber denen des Basismodells auf ein Drittel verkleinert sind. Sie betragen somit etwa eine Seemeile. Dadurch ist die Topographie mit den ausgedehnten Wattflächen um Hohe Weg, den Knechtsand und Trischen wesentlich besser erfaßt worden als im Basismodell. Da die Arbeiten am Basismodell und an dem Regionalmodell etwa gleichzeitig anliefen und Randwerte aus dem Basismodell zunächst nicht übernommen werden konnten, wurde der Seerand 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 ausnutzen zu können. Diese Werte wurden laufend mit den Ergebnissen des Basismodells verglichen und in Übereinstimmung zu bringen versucht, was in großen Teilen gelang. Später soll das Regionalmodell mit einem

rechteckigen Rand, dessen Nordwestecke etwa Nordnordwest von Helgoland liegt, betrieben werden und seine Randwerte endgültig aus dem Basismodell erhalten.

Da die Gezeiten aber bis weit in die Flußmündungen hineinwirken, ist mit Erfolg ein vorhandenes Flußmodell der Elbe an das Regionalmodell angekoppelt worden. So ist ein Randwert überflüssig geworden. Insofern wurde hier der Randwert des Elbeästuars durch das Elbmodell ersetzt. Da ein Modell für die Weser bisher nicht zur Verfügung stand, konnte dort nicht entsprechend verfahren werden.

Die in Arbeit befindlichen Regionalmodelle „Nordfriesland“ und „Ostfriesland“ sind hinsichtlich der Gitterabstände, Tiefenverteilung und Randwertermittlung gleichermaßen behandelt worden. Da die offenen Ränder hierbei aber verhältnismäßig lang sind und sich über drei Seiten erstrecken, sind die Randwerte von noch größerer Bedeutung als beim Basismodell oder Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“.

8.2 Ergebnisse

In den Abbildungen 3 bis 19 sind für ausgewählte Pegel die gemessenen und errechneten Wasserstände aus dem Basismodell und dem Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ in Ganglinienformen dargestellt. Darüber hinaus sind die Differenzen zwischen Messung und Rechnung bei Hoch- und Niedrigwasser sowie die zugehörigen quadratischen Fehler in Tabelle 1 zusammengestellt worden. Die Abbildungen 20 und 21 zeigen beispielhaft die errechnete flächenmäßige Strömungsverteilung im Bereich des Regionalmodells „Innere Deutsche Bucht“.

Tabelle 1
Differenzen aus Natur und Modell für Thw und Tnw
sowie mittlerer quadratischer Fehler für die gesamte Tide (8./9. Juli 1976)

Abb.	Basismodell	Höhendifferenzen		mittl. quadr. Fehler (cm)
		Thw (cm)	Tnw (cm)	
3	Borkum Südstrand	- 1	- 1	7
4	Helgoland	8	0	9
5	Wangerooge Nord	- 1	- 1	2
6	Alte Weser	- 6	- 4	4
7	Scharhörn	- 8	0	12
8	Cuxhaven	- 1	7	9
9	Trischen West	0	- 7	10
10	List	- 1	-19	13
Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“				
11	Wangerooge Nord	3	0	4
12	Mellumplate	- 1	- 7	6
13	Alte Weser	- 1	- 5	5
14	Scharhörn	- 5	2	4
15	Cuxhaven	2	0	6
16	Trischen West	3	4	5
17	Hohe Weg	5	- 1	3
18	Spieka Neufeld	13	- 1	9
19	Friedrichskoog	2	- 2	11

Die in Tabelle 1 aufgeführten Hochwasserdifferenzen aus dem Basismodell sind sämtlich kleiner als 8 cm. Küstenwärts, vor allem im Watt, steigen die Differenzen dann an, bleiben aber unter 10 cm. Die Niedrigwasserdifferenzen sind von der Ems bis zur Alten Weser kleiner als 5 cm. Von der Elbe bis südlich Sylt ergeben sich Werte bis zu 7 cm, und in List wird eine Differenz von 19 cm erreicht. Insgesamt gesehen werden die Hochwasserstände durch das HN-Basismodell etwas besser als diejenigen des Niedrigwassers dargestellt.

Tabelle 1 enthält auch die entsprechenden Werte für das Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“. Von Wangerooge bis Trischen überschreiten die Differenzen der Hochwasserstände nicht 5 cm. Die Differenzen der Niedrigwasserstände werden nicht größer als 7 cm.

Weiterhin sind in Tabelle 1 die mittleren quadratischen Fehler für die Wasserstandsganglinien der Pegelorte angegeben. Dafür sind 298 Werte einer Periode benutzt worden. Dies entspricht mit einem zeitlichen Abstand von 2,5 min dem Zeitschritt des Basismodells.

Von Borkum bis List liegen die Fehler des Basismodells unter 13 cm. Die Fehler des Regionalmodells überschreiten 6 cm nicht. Insgesamt läßt sich daher feststellen: Das HN-Regionalmodell stellt mit seinem kleineren Gitterabstand die an den Küstenpegeln gemessenen Wasserstände durchweg besser dar. Dies gilt vor allem in Wattgebieten. Aus den Abbildungen 3 bis 19, die den Vergleich zwischen gemessenen und errechneten Wasserstandskurven zeigen, ist auch zu erkennen, welchen Einfluß die verbesserte Auflösung der Topographie durch das Regionalmodell hat.

Die Wasserstände, die das Basismodell liefert, entsprechen im tiefen Wasser (bis ungefähr 10 m unter NN) etwa den gemessenen. Gebietsweise, z. B. bei Wangerooge und Alte Weser, sind gute Übereinstimmungen festzustellen. Aber auch größere Abweichungen bis zu 19 cm (List) traten stellenweise auf. – Besondere Untersuchungen haben gezeigt, daß eine noch größere Naturnähe erzielt wird, wenn das Basismodell flächenmäßig – etwa durch einen diagonal verlaufenden offenen Rand – verkleinert wird. Hierdurch kann nämlich die Güte der Randwerte und damit diejenige der Modellergebnisse wesentlich verbessert werden.

Das Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ zeigt eine vollbefriedigende Übereinstimmung zwischen gemessenen und errechneten Wasserstandskurven. An den Wattpegeln bleiben auch die Zeitpunkte des Trockenfallens und des Überflutens im Rahmen der allgemeinen Fehlergrenzen.

Die flächenmäßige Verteilung von Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten im Gebiet des Regionalmodells „Innere Deutsche Bucht“ ist für zwei Tidephasen in den Abbildungen 20 und 21 dargestellt. Diese Darstellungen enthalten die Ergebnisse der Rechnung, die durch einen Plotter in die graphische Form übertragen wurden. Soweit es in dem dem Regionalmodell zugrunde liegenden Maßstab überhaupt möglich ist, entsprechen die Ergebnisse dem aus Naturmessungen belegten Ablauf des Geschehens.

Mit den Regionalmodellen „Nordfriesisches Wattenmeer“ und „Ostfriesische Küste“

Tabelle 2
Mittlerer quadratischer Fehler in cm für Pegelorte in Nord- und Ostfriesland

Pegel	mittl. quadr. Fehler (cm)
Hörnum	2
Wittdün	7
Langeness-Neuwarft	13
Pellworm	14
Südfall	11
Knock	7

sind Voruntersuchungen für flächenmäßig verkleinerte Gebiete aufgenommen worden. Tabelle 2 enthält die ermittelten Fehler für fünf Pegelorte im nordfriesischen und für einen Ort im ostfriesischen Modell.

9. Ausblick

Nachdem das Basismodell „Deutsche Bucht“ und das Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ in den Jahren 1977 bis 1979 fertiggestellt werden konnten und die Entwicklung der Regionalmodelle „Nordfriesisches Wattenmeer“ und „Ostfriesische Küste“ angelaufen ist, lassen sich die bisher erzielten Ergebnisse dahingehend beurteilen, daß es gelungen ist, eine Normaltide mit hinreichender bis sehr guter Genauigkeit modellmäßig zu erfassen. Wenn Ende 1981 auch die derzeit in Arbeit befindlichen Regionalmodelle fertiggestellt sein werden, ist damit die Grundlage geschaffen, um Vorhaben der Wasserbauverwaltungen oder Naturvorgänge im Auftrage der jeweiligen Nutzer in Lokalmodeilen behandeln zu können, wobei durch verfeinerte Gitterauflösung und Anbindung an die aus dem Basismodell entwickelten Regionalmodelle deren Randwerte optimal abgesichert sind. Hierdurch werden dann die Voraussetzungen, insbesondere für die Herstellung befriedigender Naturähnlichkeit, gegeben sein.

Neben der Fertigstellung der Regionalmodelle „Nordfriesland“ und „Ostfriesland“ in den Jahren 1980 bis 1981 ist beabsichtigt, Kopplungsmodelle herzustellen, in welchen die Wirkung unterschiedlicher Wetterlagen auf den Tideablauf zu untersuchen ist. Längerfristig sollen hierbei die Modelle des KFKI im Zusammenhang mit vorhandenen und weiterzuentwickelnden meteorologisch/numerischen Großmodellen (FISCHER, 1978) betrieben werden. Zielsetzung ist, aperiodische Ereignisse – z. B. Sturmtiden und extreme Niedrigwasserstände – in den Modellen verfeinert nachvollziehen zu können.

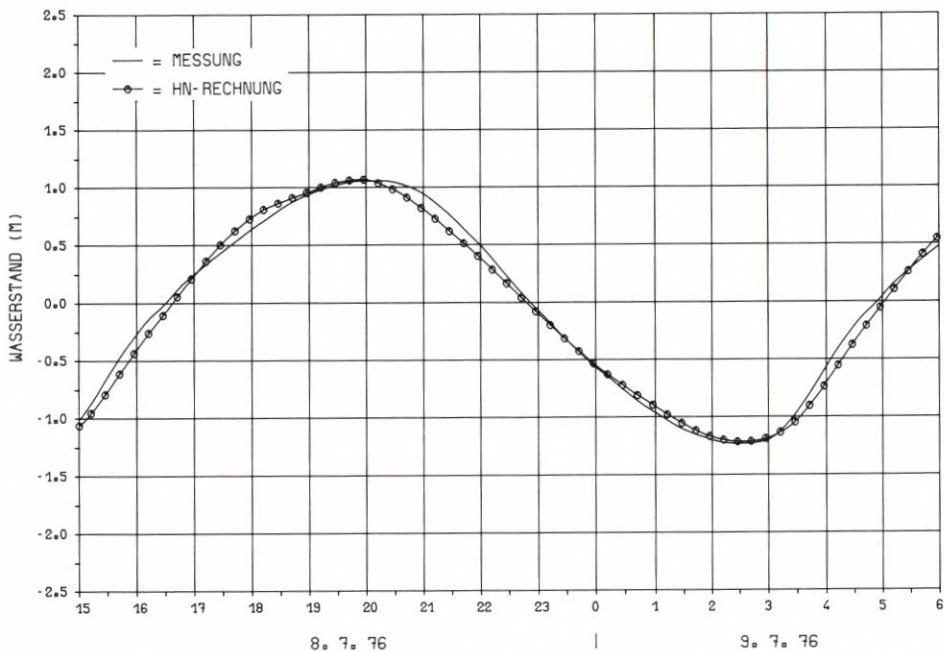


Abb. 3. Basismodell – Pegel Borkum Südstrand

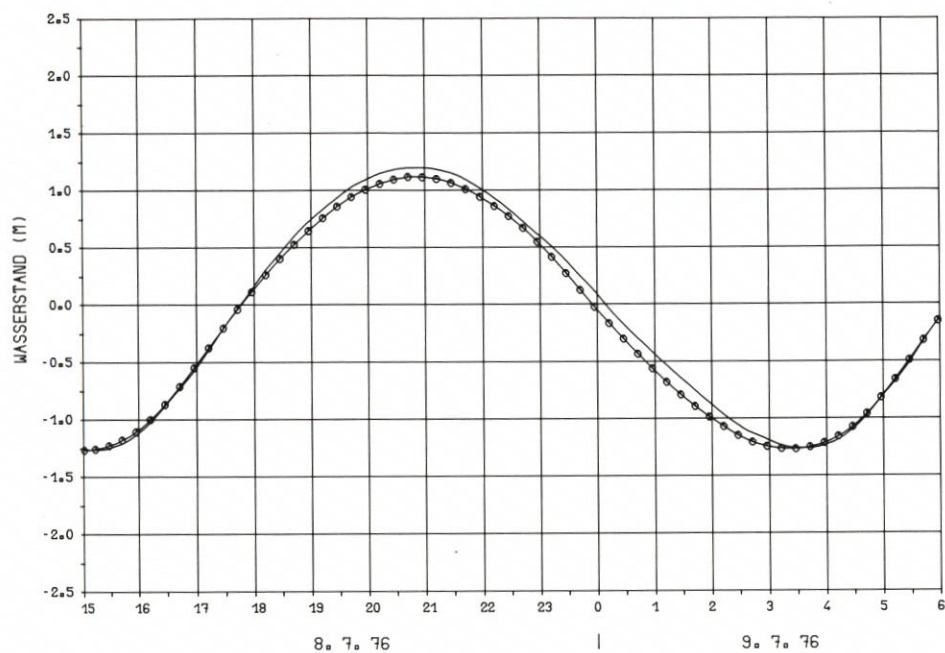


Abb. 4. Basismodell – Pegel Helgoland

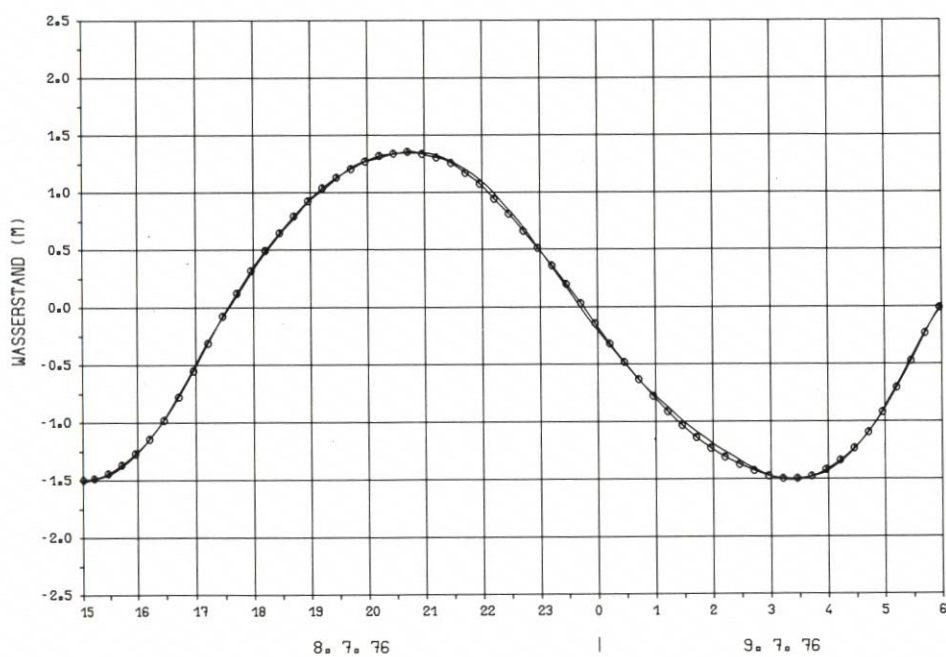


Abb. 5. Basismodell – Pegel Wangerooge Nord

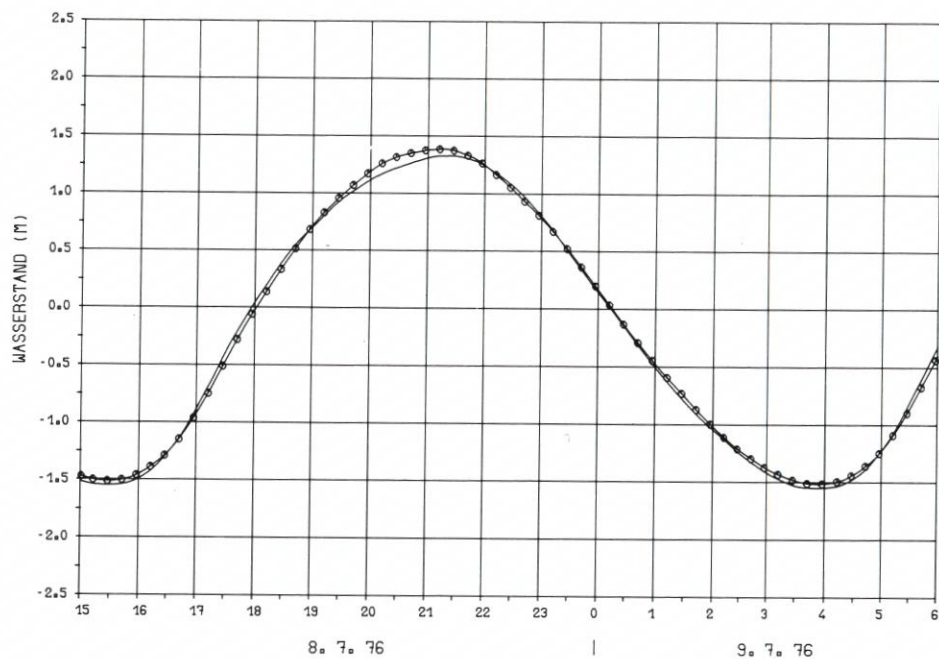


Abb. 6. Basismodell – Pegel Alte Weser

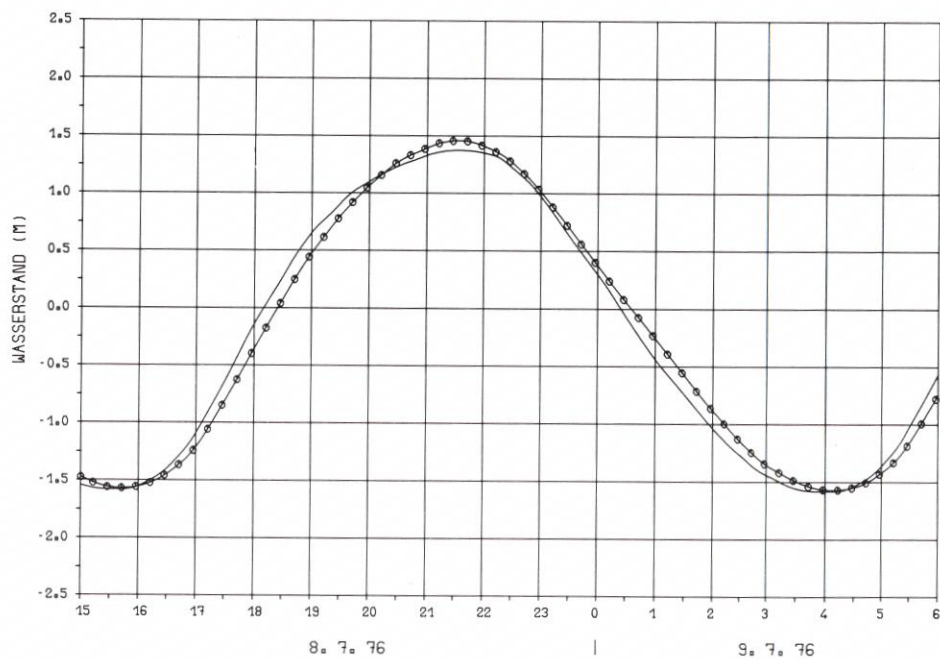


Abb. 7. Basismodell – Pegel Scharhörn

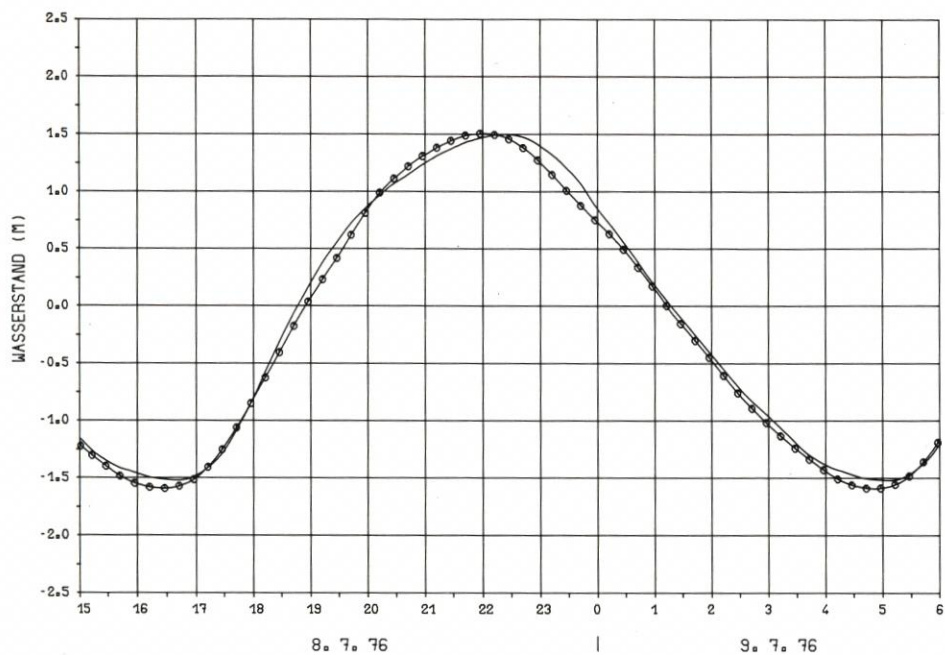


Abb. 8. Basismodell – Pegel Cuxhaven

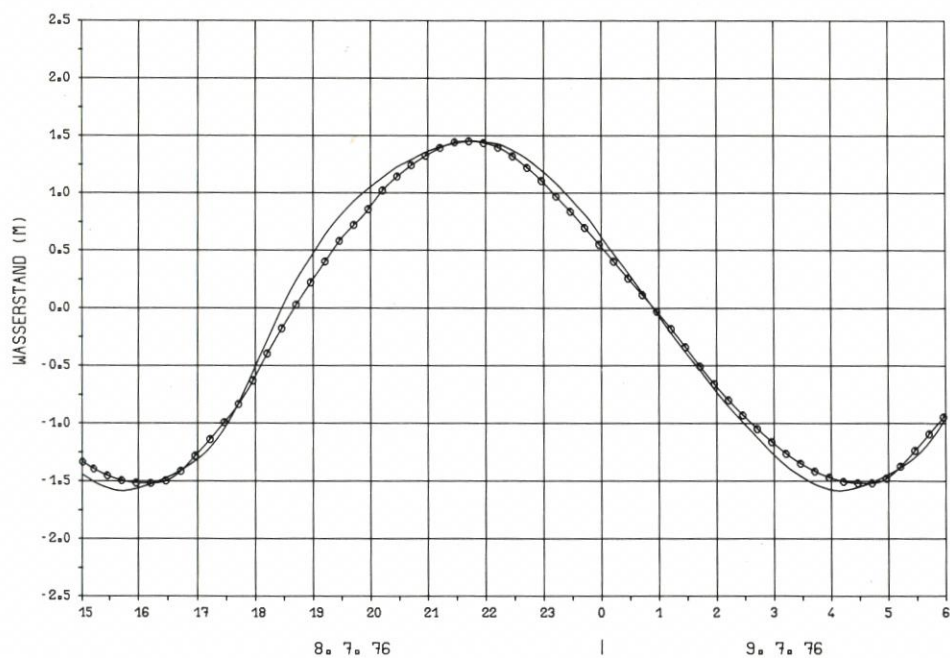


Abb. 9. Basismodell – Pegel Trischen West

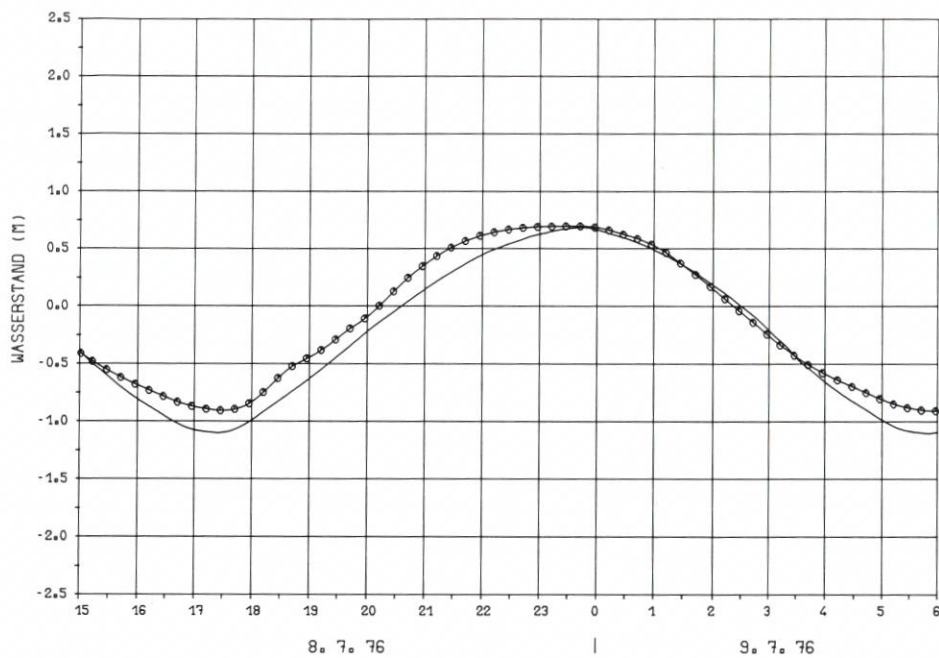


Abb. 10. Basismodell – Pegel List

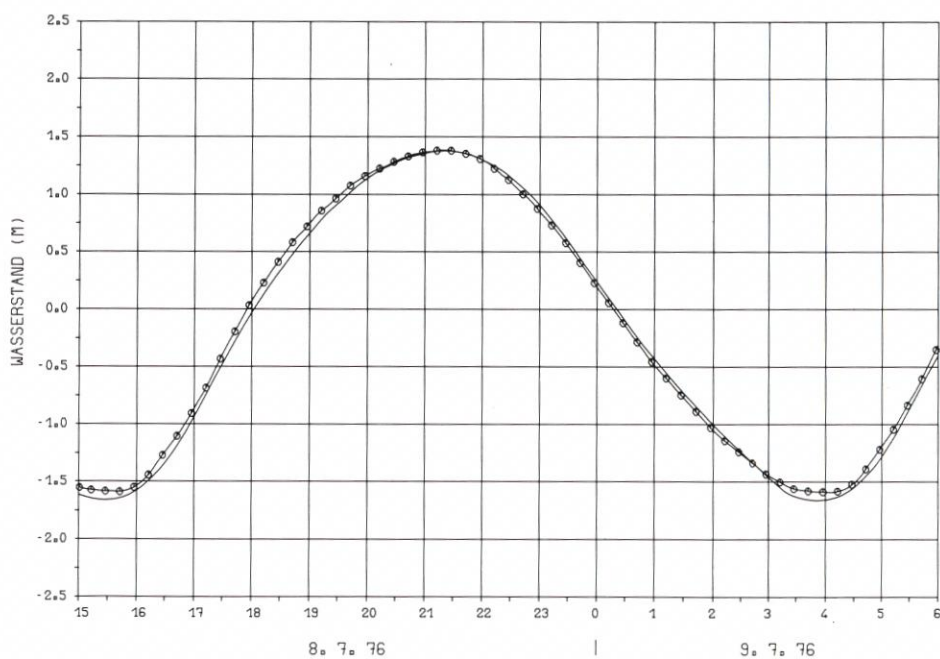


Abb. 11. Regionalmodell – Pegel Wangerooge Nord

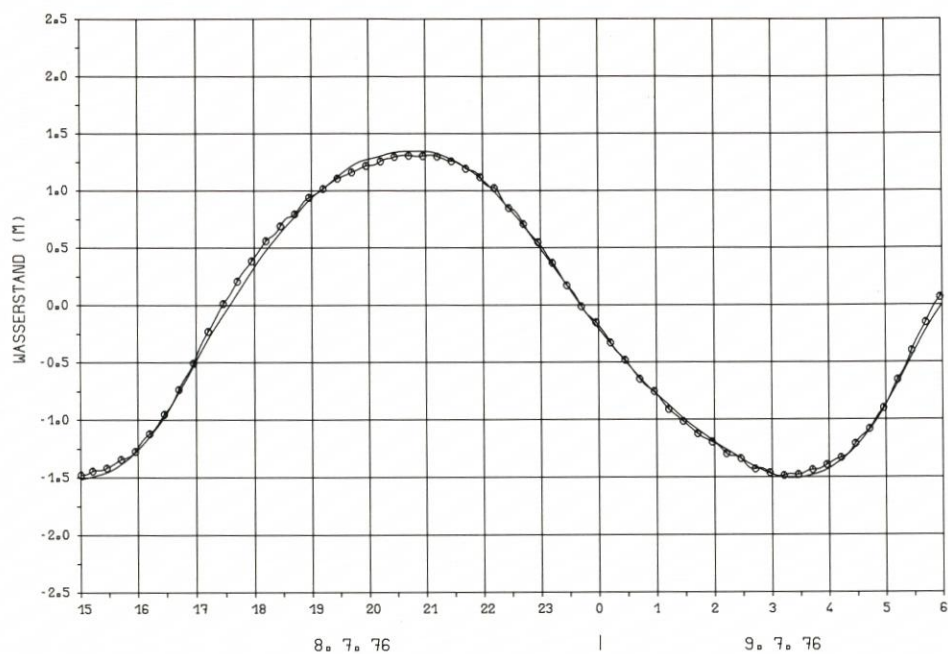


Abb. 12. Regionalmodell – Pegel Mellumplate

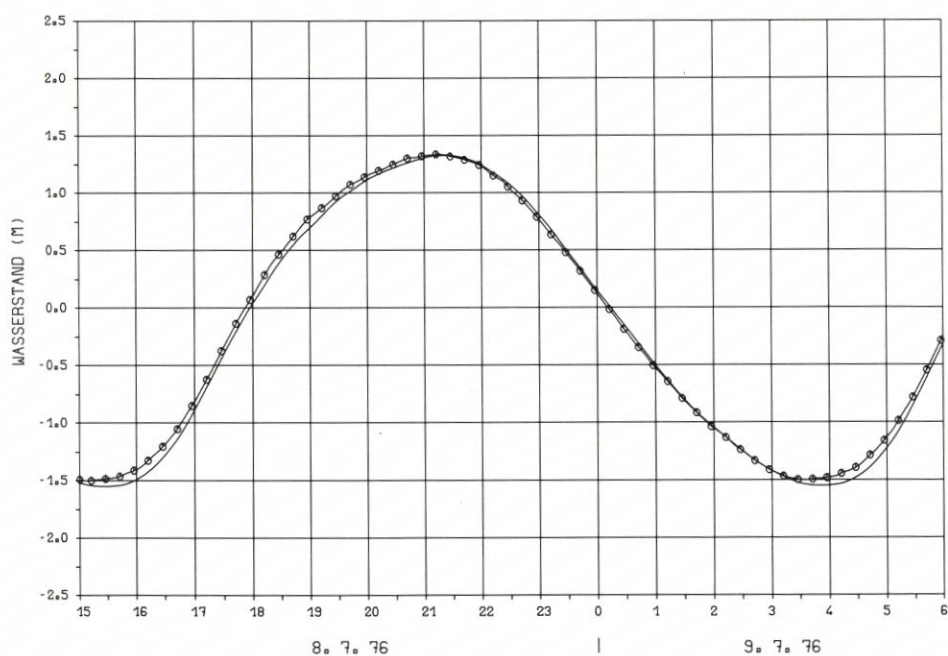


Abb. 13. Regionalmodell – Pegel Alte Weser

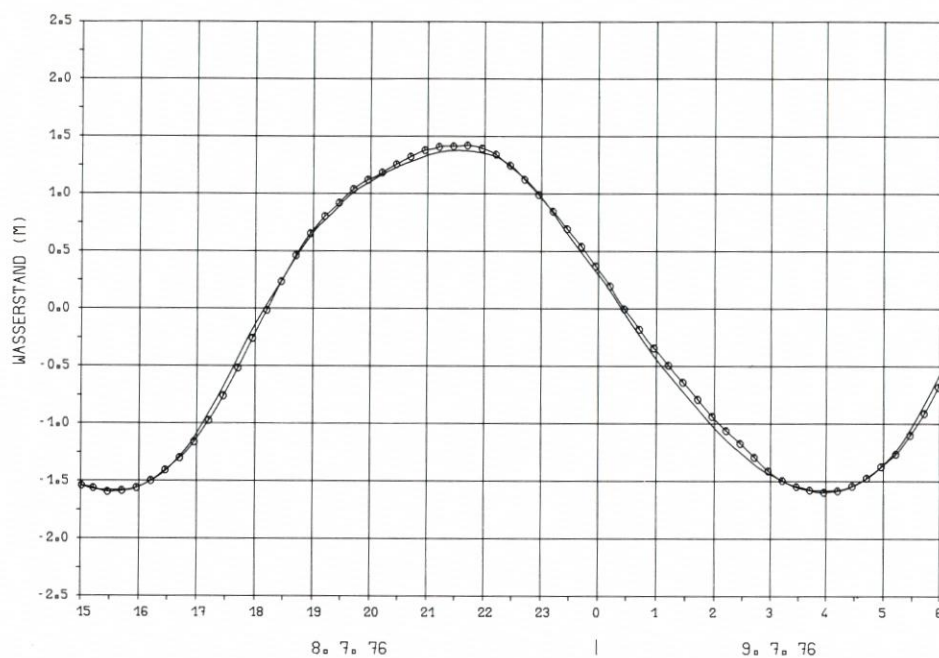


Abb. 14. Regionalmodell – Pegel Scharhörn

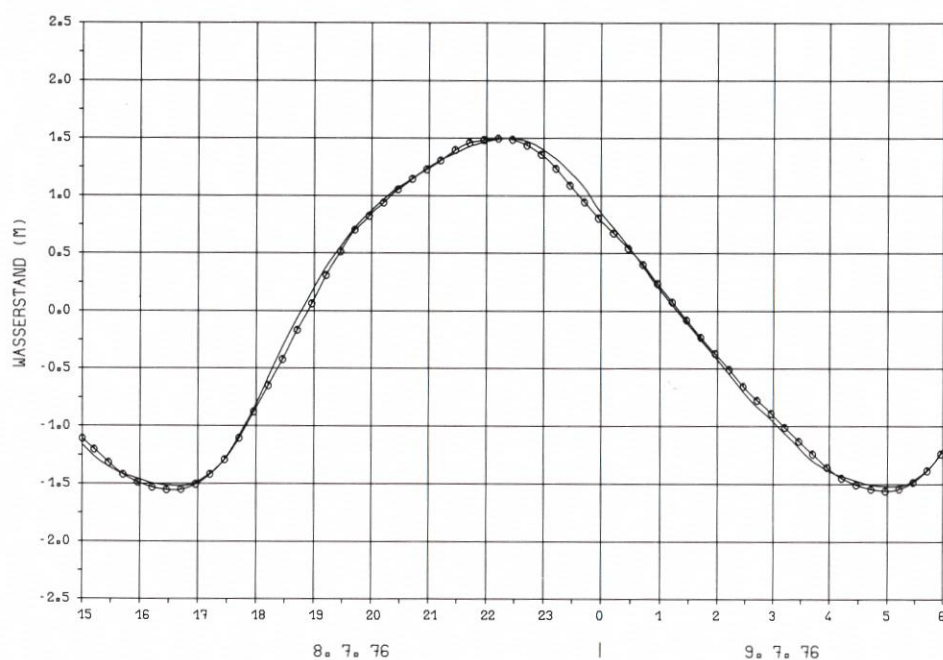


Abb. 15. Regionalmodell – Pegel Cuxhaven

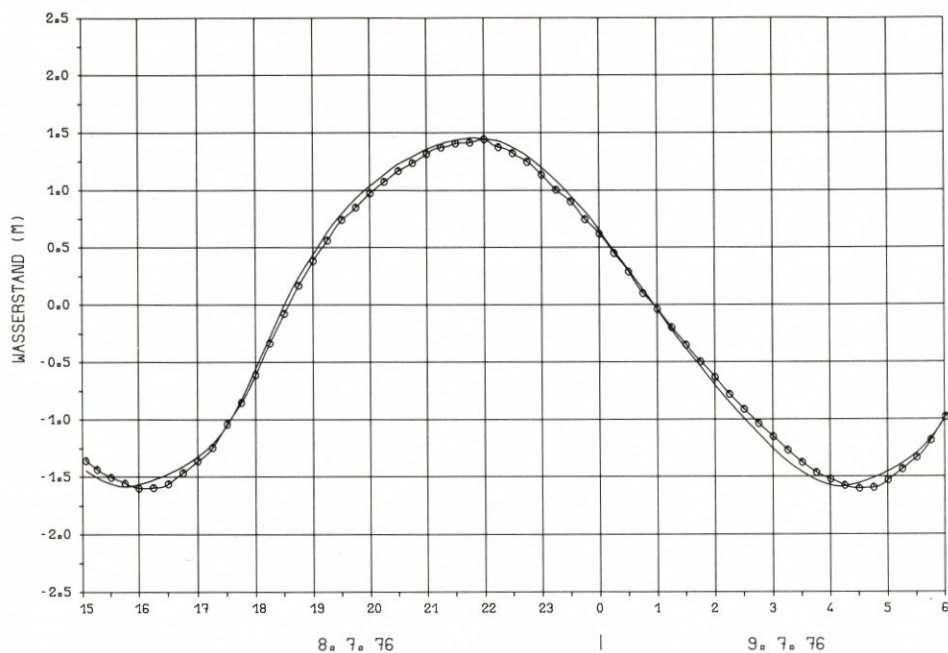


Abb. 16. Regionalmodell – Pegel Trischen West

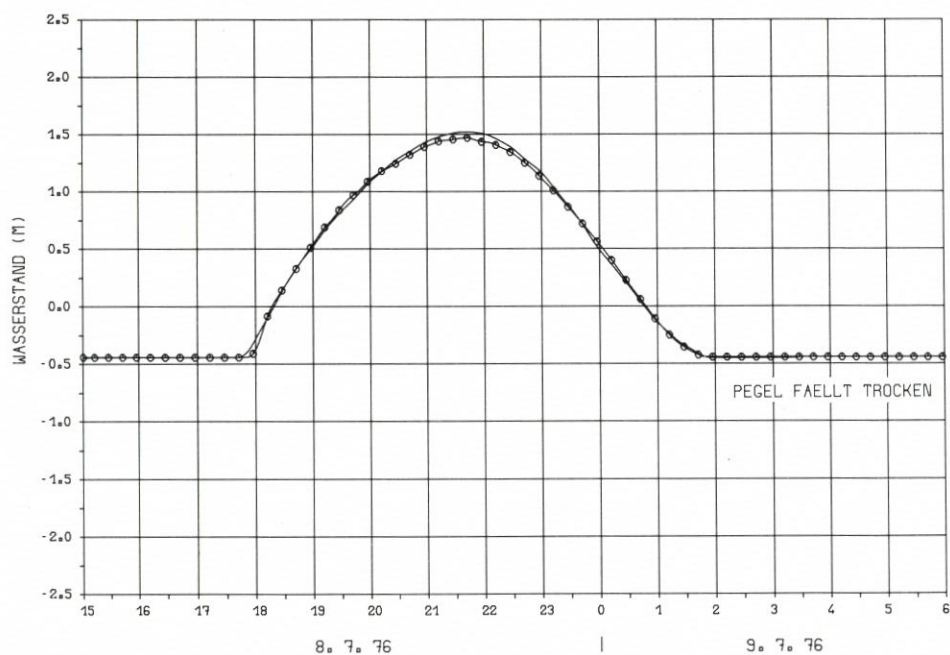


Abb. 17. Regionalmodell – Pegel Hohe Weg

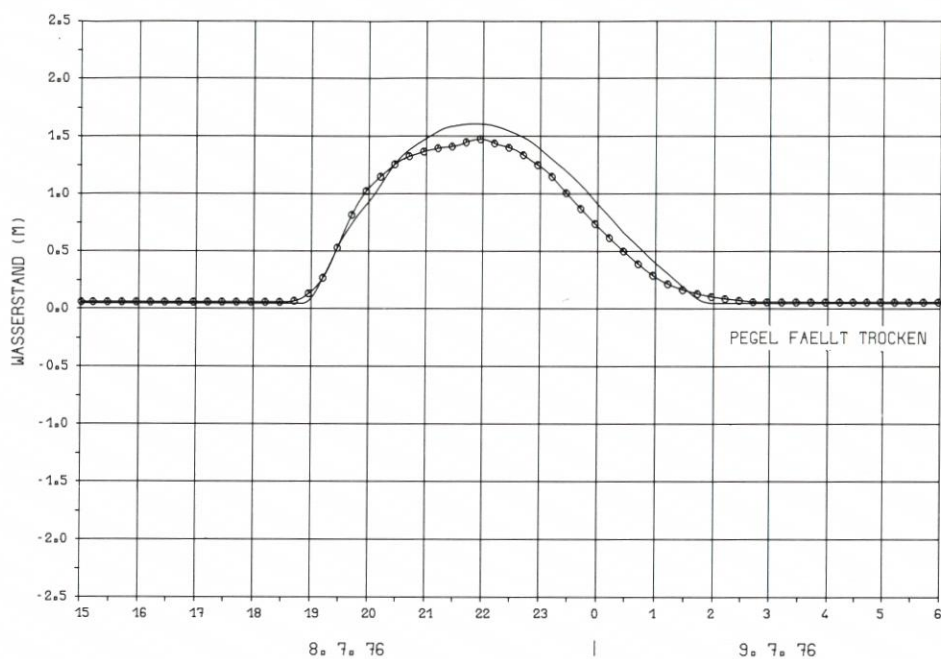


Abb. 18. Regionalmodell – Pegel Spieka Neufeld

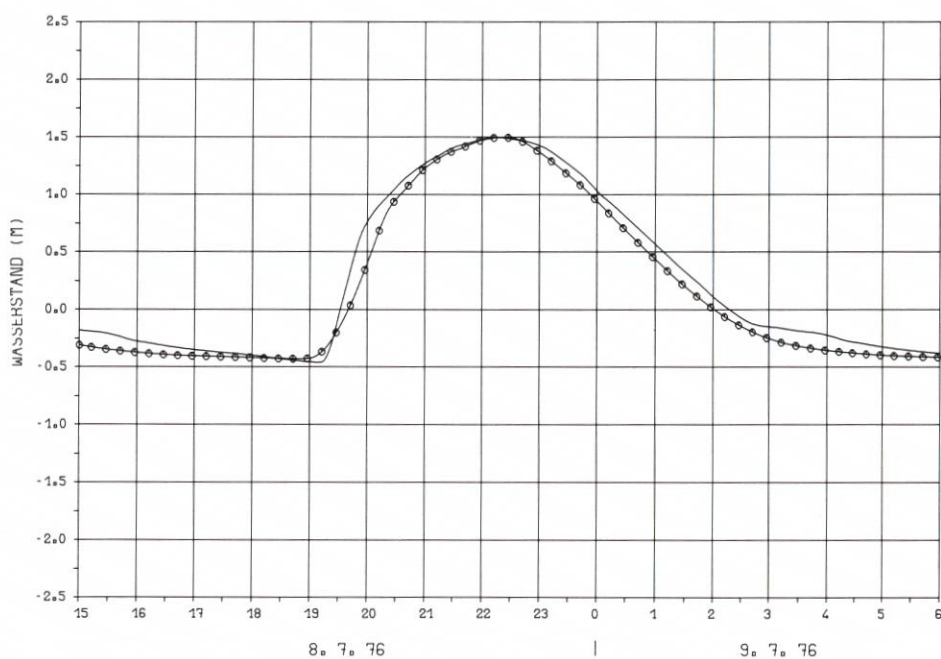


Abb. 19. Regionalmodell – Pegel Friedrichskoog-Hafen

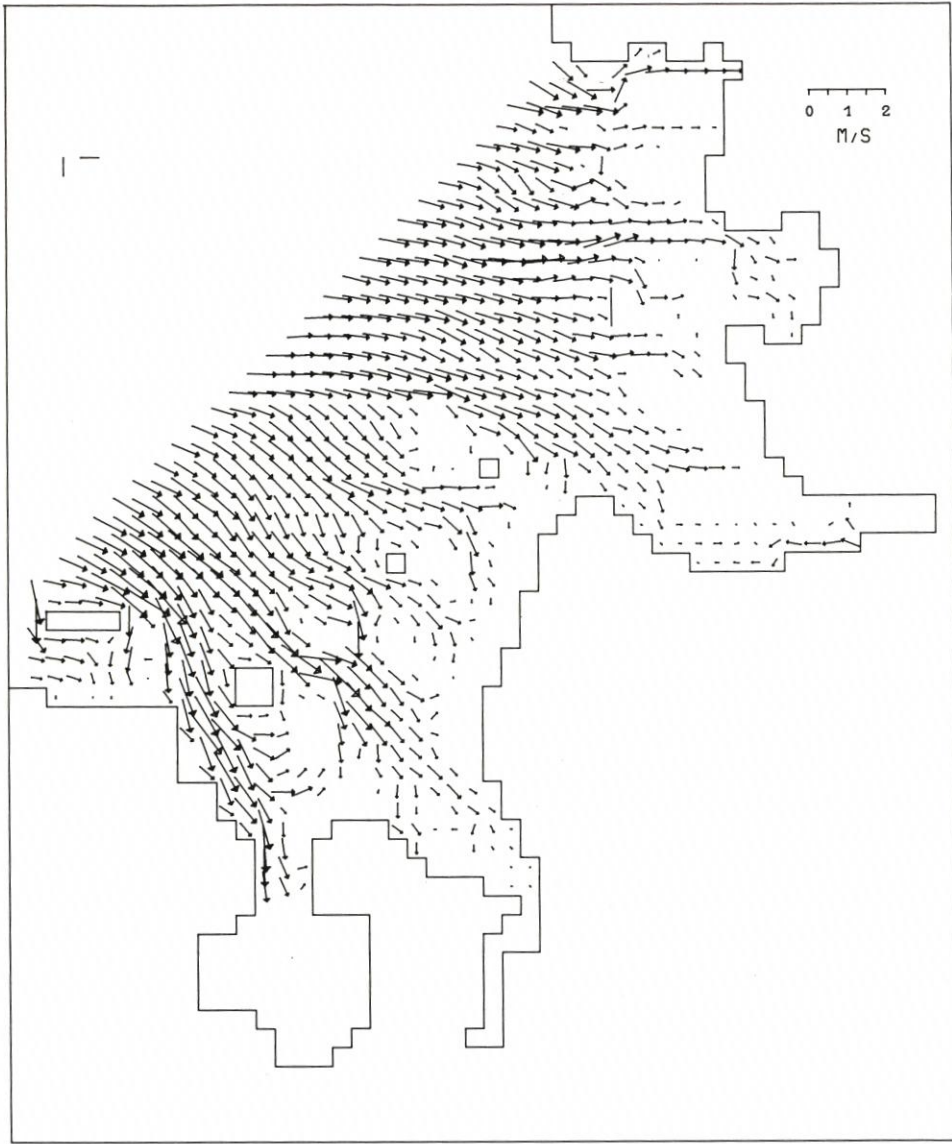


Abb. 20. Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ – Strömungsverteilung bei auflaufend Wasser (8. 7. 1976, 18.00^h, etwa halbe Tide)

Zur Überprüfung der Naturähnlichkeit des Regionalmodells „Innere Deutsche Bucht“ ist geplant, im Herbst 1981 ein Naturmeßprogramm in dem durch das Modell erfaßten Gebiet auszuführen. In Wattgebieten wird es das erste Mal sein, daß HN-Modelle und Naturmessungen gleichzeitig betrieben werden. Über die Ergebnisse dieses Testprogramms wird zu gegebener Zeit berichtet werden.

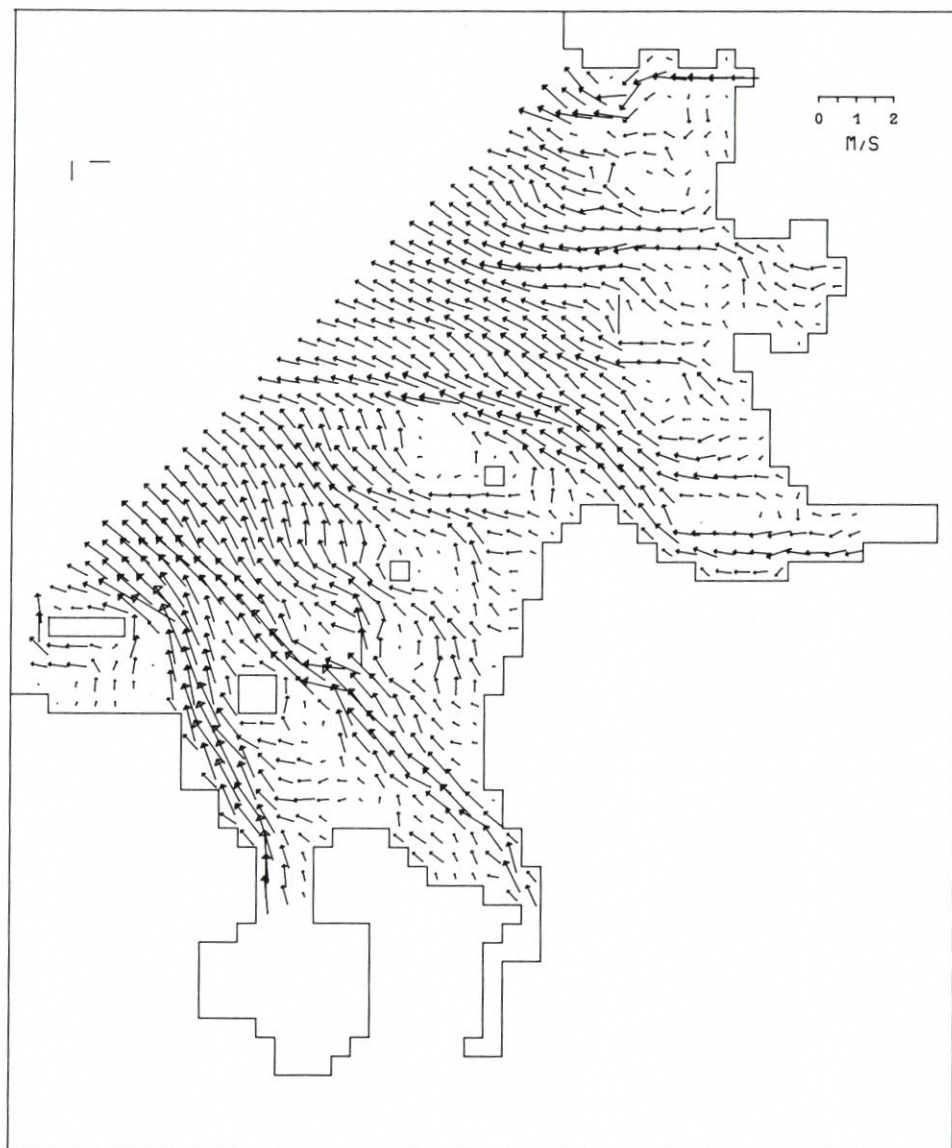


Abb. 21. Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ – Strömungsverteilung bei ablaufend Wasser (9. 7. 1976, 1.00^h, etwa halbe Tide)

10. Schriftenverzeichnis

- COURANT, R., FRIEDRICH, K. u. LEWY, H.: Über die partiellen Differentialgleichungen der mathematischen Physik. Math. Ann., Bd. 100, 1928.
- DEFANT, A.: Gezeitenprobleme des Meeres in Landnähe. Probleme der kosmischen Physik, IV., Verlag Henri Grand, Hamburg, 1925.
- FISCHER, G.: Ergebnisse der Sturmflutvorhersage – Modellierung im SFB 94. Promet-Meteorologische Fortbildung. 8. Jg., Heft 4, 1979.
- HANSEN, W.: Die Ermittlung der Gezeiten in beliebig gestalteten Meeresgebieten mit Hilfe des Randwertverfahrens. DHZ, Bd. 1, 1948.
- HANSEN, W.: Anwendung von HN-Modellen für Probleme des Küsteningenieurwesens. Jb. HTG, Bd. 35, 1977.
- KRÖGER, A. u. ZIERZ, R.: Rechenanlage für HN-Modelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI). Jber. 1979 d. Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 31.
- LORENTZ, H. A. et al.: Verslag van de Staatscommissie Zuiderzee. 's-Gravenhage, Alg. Landsdrukkerij, 1926.
- ROHDE, H.: Die Forschungsvorhaben des KFKI. Die Küste, H. 34, 1979.
- SIEFERT, W.: Sturmflutvorhersage-Verfahren für Küsten und Flüsse im Tidegebiet. Jb. HTG, Bd. 37, 1980.