

Sturmflutvorhersagen mit mathematisch-physikalischen Modellen

Von Ludwig F. Dolata und Manfred Engel

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden in Teil 1 (ENGEL) die Motivation und die Grundlagen der Arbeit des Sonderforschungsbereiches „Meeresforschung“ der Universität Hamburg an einem numerischen Sturmflutvorhersage-System beschrieben und in Teil 2 (DOLATA) erste Ergebnisse und Erfahrungen diskutiert. Die dargestellten Aktivitäten sind Teile der Bemühungen der „Modellgruppe Nordsee“.

Summary

This contribution describes in part 1 (ENGEL) the motivation and basics of the work by the Special Research Area Oceanography at the University of Hamburg on a numerical storm surge prediction system. In part 2 (DOLATA) first results and experiences with this system are discussed. The activities presented herein belong to the efforts of the "Model Group North Sea".

Inhalt

1. Grundlagen und Modelldaten	203
1.1 Einführung	203
1.2 Probleme der Datenbeschaffung	204
1.3 Das numerische Modellsystem zur Sturmflutvorhersage	206
2. Probleme numerischer Berechnungen und Beispielsrechnung der Sturmflut vom 2./3. Januar 1976	208
2.1 Vorbemerkung	208
2.2 Vergleichbarkeit von Ergebnissen	208
2.3 Allgemeine Fehlerquellen	209
2.4 Windschubbestimmungen	210
2.5 Beispielsrechnung der Sturmflut vom 2./3. Januar 1976	210
2.6 Analyse der Ergebnisse mit Beobachtungsdaten	224
2.7 Ergebnisse mit den meteorologischen Vorhersagedaten	224
2.8 Schlußbemerkung	225
3. Schriftenverzeichnis	225

1. Grundlagen und Modelldaten

1.1 Einführung

Kurz nach den Sturmflutereignissen im Januar 1976 diskutierte der Sonderforschungsbereich 94 „Meeresforschung“, Hamburg, sein Forschungsprogramm für den jetzt laufenden Förderungszeitraum. Da die umfangreichen Erfahrungen mit numerischen Sturmflutwasserstands-Modellen im Institut für Meereskunde der Universität Hamburg und die Verfügbarkeit eines atmosphärischen Vorhersagemodells im Meteorologischen Institut die Kopplung dieser

beiden Modelle zu einem Vorhersagesystem aussichtsreich und auf dem Hintergrund der großen Sturmflutkatastrophe notwendig erscheinen ließen, wurde die Erprobung dieses Systems in das Programm aufgenommen und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert. Die Entwicklung und Erprobung des Sturmflutvorhersage-Systems hat zum Ziel, ein für den Einsatz im Routinewarndienst geeignetes Modellsystem zur Verfügung zu stellen und Aussagen über die erreichbare Genauigkeit zu gewinnen.

Auf Initiative des Deutschen Hydrographischen Instituts fand im Dezember 1976 eine Zusammenkunft aller an dieser Entwicklung beteiligten und interessierten Wissenschaftler statt. Aus diesem Kreis wurde die Modellgruppe Nordsee gebildet, die die weiteren Arbeiten zu diesem Thema koordiniert. Durch die Beteiligung des Deutschen Hydrographischen Instituts und des Deutschen Wetterdienstes an diesen Arbeiten ist gewährleistet, daß neben der Behandlung der wissenschaftlichen Fragen der Aspekt der praktischen Anwendbarkeit bei der weiteren Entwicklungsarbeit hinreichend berücksichtigt wird.

Die Zusammenarbeit der angeführten Institutionen hat sich als sehr förderlich für die bisherigen Untersuchungen erwiesen.

1.2 Probleme der Datenbeschaffung

Für die Erprobung eines Sturmflut-Modellsystems werden Daten vergangener und eventuell aktueller Sturmflut-Wetterlagen und zugehöriger Pegelaufzeichnungen benötigt. Die Beschaffung dieses Datenmaterials ist bisher eines der Hauptprobleme bei der Modellentwicklung.

An den deutschen Küsten werden ausschließlich für Cuxhaven stündliche Werte der Gezeitenwasserstände vorausberechnet und das Residuum, d. h. die Differenz zwischen beobachtetem und vorausberechnetem Wasserstand, aktuell bestimmt. Auf Helgoland, Borkum, Norderney, in Büsum und an anderen Küstenpegeln sind zwar die Wasserstände aufgezeichnet, sie werden jedoch nicht routinemäßig analysiert und in einem Datenzentrum digitalisiert erfaßt. Die zuständigen Wasser- und Schifffahrsdirektionen führen lediglich Statistiken über die Extremwerte (Hoch- und Niedrigwasser), und das Deutsche Hydrographische Institut berechnet gleichfalls nur Hoch- und Niedrigwasser der astronomischen Gezeiten voraus. Zur Überprüfung numerischer Sturmflutsimulationen werden zumindest stündliche Vorausberechnungen des Gezeitenwasserstandes und stündliche Werte der tatsächlich eingetretenen Wasserstände von vielen Pegeln rund um die Nordsee benötigt. Für Vergleiche von Modellergebnissen mit deutschen Pegeln müssen diese Daten bisher, außer für Cuxhaven, jeweils selbst erstellt werden. In Großbritannien sind diese Daten gesammelt; ein regelmäßiger Datenaustausch ist jedoch nicht organisiert. Die Pegeldata des übrigen Auslandes können nur mühsam, zum Teil durch persönliche Kontakte, beschafft werden.

Ähnlich unerfreulich ist die Situation hinsichtlich der meteorologischen Daten. Die immerhin organisierte synoptische Erfassung meteorologischer Daten über See durch Schiffsmeldungen ist stark vom Zufall abhängig. In der Nordsee liegen bei Sturmflutsituationen naturgemäß weniger Meldungen vor als normalerweise. Die vorhandenen Plattformen sind noch nicht in die Datenerfassung integriert, und die Installation eines Bojenmeßnetzes ist erst in Ansätzen in Angriff genommen. Für Starkwindsituationen ist also die Erstellung zuverlässiger Wetterkarten besonders schwierig.

Die aufgezählten Unzulänglichkeiten in der Datenerfassung, -aufbereitung und -verfügbarkeit sind ein Grund dafür, daß ein numerisches Sturmflutvorhersage-System bis heute nicht ausgetestet ist und zur praktischen Anwendung zur Verfügung steht. Die Schwierigkei-

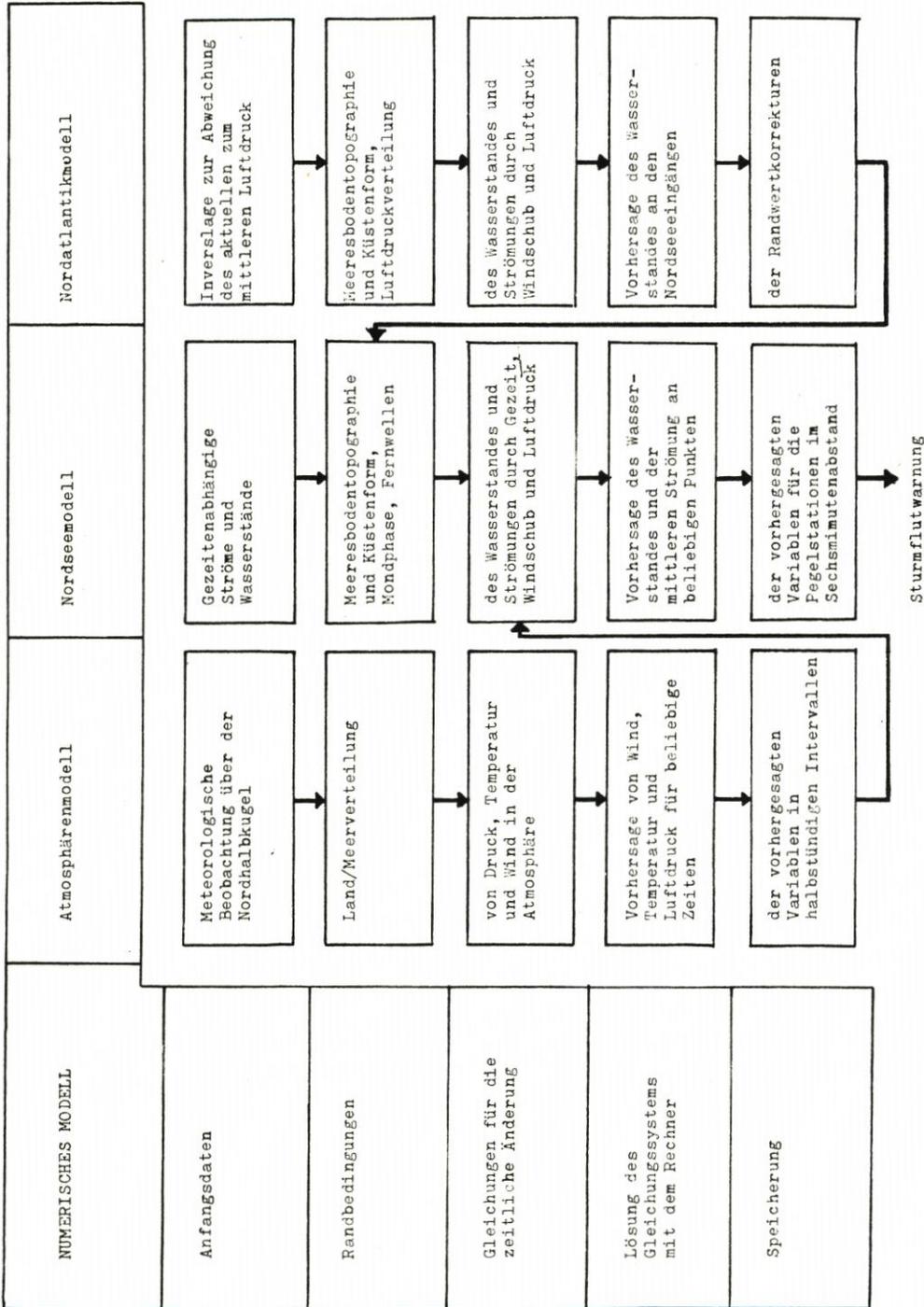


Abb. 1. Schema des Vorhersagesystems

ten beim Zusammentragen der Pegeldaten erklären, warum in einem Beitrag 1979 lediglich über Modellergebnisse auf der Grundlage von Daten aus dem Jahre 1976 berichtet werden kann.

1.3 Das numerische Modellsystem zur Sturmflutvorhersage

Der prinzipielle Aufbau und Ablauf einer Sturmflutvorhersage-Rechnung ist in einem Blockdiagramm (Abb. 1) dargestellt. Das Modellsystem besteht zur Zeit aus drei Teilen:

- a) Ein Modell der Atmosphäre der Nordhalbkugel berechnet aus meteorologischen Beobachtungen, den Anfangswerten, die für die Wasserstandsmodelle benötigten Wind-, Luft-

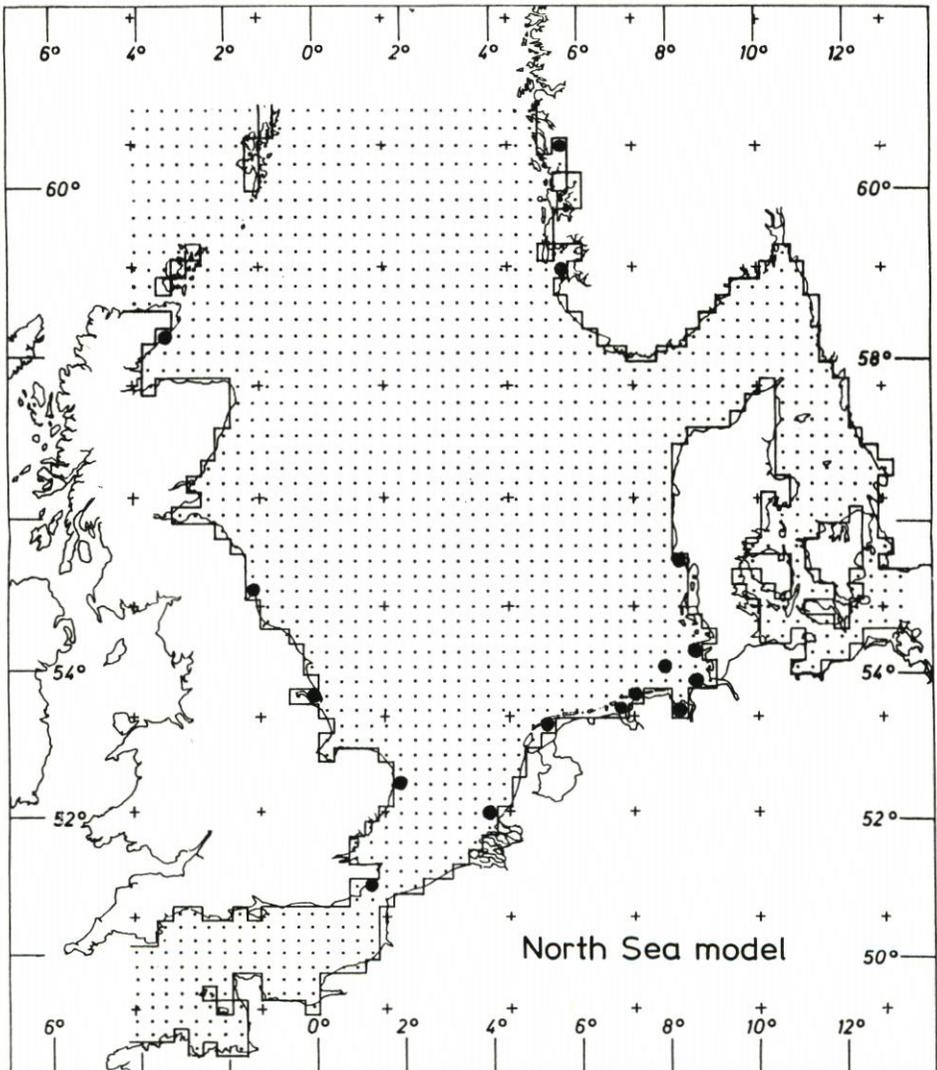


Abb. 2. Nordseemodell

druck- und Temperaturverteilungen bis zu 48 Stunden voraus. Es ist in sphärischen Koordinaten formuliert mit einem Gitternetz von 2,8 Grad Auflösung in zonaler und 1.4 Grad in meridionaler Richtung, das sind jeweils ca. 150 Kilometer über der Nordsee. Das Modell rechnet mit 8 Schichten in der Vertikalen (FISCHER, 1979).

- b) Das Nordseemodell (Abb. 2) berechnet bei Vorgabe der Wasserstände an den offenen Rändern und Übernahme der meteorologischen Antriebsgrößen an den Gitterpunkten des Atmosphärenmodells (Kreuze in Abb. 2) Wasserstände und vertikal gemittelte Geschwindigkeiten im Innern. Es besitzt ebenfalls ein sphärisches Gitternetz mit $\frac{1}{3}$ Grad zonaler und einem $\frac{1}{3}$ Grad meridionaler Auflösung, d. h. etwa 20 Kilometer.
- c) Ein Nordostatlantikmodell (Abb. 3) wird zusätzlich mit den Wind- und Luftdruckdaten des Atmosphärenmodells betrieben, um für das Nordseemodell die an den offenen Rändern vorgegebenen Gezeitenwasserstände um die Beiträge zum aktuellen Wasserstand zu korrigieren, die durch die Luftdruck- und Windverteilung über diesem Gesamtgebiet hervorgerufen werden. Es sollen mit diesem Modell insbesondere die als Fernwellen (external surges) bekannten Beiträge zu dem im Nordseeinnern aufgebauten Windstau erfaßt werden.

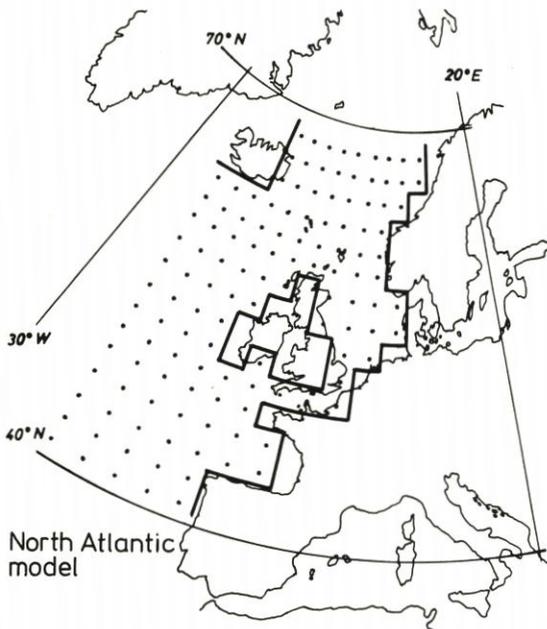


Abb. 3. Atlantikmodell

Mit diesem Modellsystem werden zur Zeit eine Reihe von Sturmfluten nachgerechnet. Um die Abweichungen zwischen Modellvorhersage und Pegelbeobachtung besser analysieren zu können, werden zusätzlich für diese Sturmflutsituationen die vom Seewetteramt erstellten Wetterkarten in geeigneter Weise digitalisiert und der daraus abgeleitete atmosphärische Antrieb für Vergleichsrechnungen mit dem Nordseemodell herangezogen. Ergebnisse, Erfahrungen und Probleme dieser Sturmflutsimulationen werden im folgenden dargestellt.

2. Probleme numerischer Berechnungen und Beispielsrechnung der Sturmflut vom 2./3. Januar 1976

2.1 Vorbemerkung

Dieser Beitrag enthält einige Anmerkungen zu allgemeinen Problemen von mathematisch-physikalischen Modellen zur Sturmflutvorhersage. Diskussionen hatten die Notwendigkeit gezeigt, einzelne Schwierigkeiten detaillierter darzustellen, um zusätzliche Informationen zur kritischen Beurteilung der Ergebnisse anzubieten. Als Beispielsrechnung ist die Sturmflut vom 2./3. Januar 1976 angeführt.

2.2 Vergleichbarkeit von Ergebnissen

Die Entwicklung eines Sturmflut-Vorhersagesystems auf der Grundlage mathematisch-physikalischer Modelle fordert einen Vergleich mit den in Sturmflutwarndiensten benutzten empirischen Verfahren heraus. Mit einfachen statistischen Größen wurde für frühere Warnungen eine Gütebeurteilung versucht (TOMCZAK, 1960). Für die im Sonderforschungsbereich geplante Serie von Nachrechnungen wären entsprechende Angaben mittlerer Fehler und Abweichungen von Extremwasserstandsvorhersagen möglich. Bei einem Vergleich dieser Art, der letztlich auf die alternative Beantwortungsform „besser/schlechter“ zielt, geraten eventuell zwei Gesichtspunkte außer acht.

Zum ersten: Warnungen nach empirischen Verfahren berücksichtigen die tatsächliche Entwicklung und werden danach korrigiert; hier sind nicht die 36 Stunden im voraus errechneten Werte des Systems vergleichbar, sondern Ergebnisse auf der Grundlage dreistündiger Beobachtungsdaten bis zum Vorhersagetermin und sich anschließender Kurzvorhersagedaten. Ein Vergleich des Systems mit empirischen Verfahren verlangt nichtexistierende, äquivalente 36stündige Vorhersagen der Warndienste.

Zum zweiten: Lange Zeit beschränkte sich die Vorstellung von Sturmfluten auf das einfache Bild einer durch einen Nordwestwind schräg gestellten Nordseeoberfläche mit höchsten Wasserständen in der Deutschen Bucht. Der Nachweis vom Nordatlantik einlaufender Wellen, die bis zu den deutschen Küsten gelangen und dort noch beachtliche Wasserstandserhöhungen verursachen, mit empirischen Verfahren (TOMCZAK, 1960) ergänzte die Kenntnisse. Eine weitere typische dynamische Entwicklung ist ausschließlich mit mathematisch-physikalischen Modellen und deren vollständiger Information zu erfassen: eine an ein Tiefdruckgebiet gekoppelte divergente Zirkulation in der Nordsee mit erhöhten Wasserständen an allen Küsten und einer ausgeprägten Niveausenkung im Zentrum (DUUN-CHRISTENSEN, 1971). Diese Situation wird in der Beispielsrechnung näher gezeigt werden. Andere charakteristische Sturmflutabläufe sind denkbar, aber bisher nicht nachgewiesen: z. B. eine zusätzliche Überlagerung von Eigenschwingungen der Nordsee. Die statistische Gleichbehandlung der genannten Situationen ist nicht ohne weiteres gerechtfertigt. An das Vorhersagesystem werden sehr unterschiedliche Anforderungen gestellt. Im Fall eines gleichförmigen Windes sind vorab keine Schwierigkeiten zu erwarten. Beim Eintreten von Fernwellen hat das eigens dazu geschaffene Atlantikmodell Randwertverbesserungen zu liefern. Führt die Zugbahn eines Tiefkerns über die zentrale Nordsee, sind an die Auflösung im Atmosphärenmodell hohe Ansprüche gestellt. Sollten Eigenschwingungen der Nordsee die Sturmflutentwicklung vom Beginn an mitbestimmen, können die Anfangswerte der Wasserstands- und Stromverteilung zu Folgefehlern führen.

Der ozeanographische Teil des Systems wird sowohl mit Vorhersagedaten des meteorologischen Teils als auch mit Beobachtungsdaten versorgt. Für die Rechenergebnisse der aufgezählten charakteristischen Sturmflutabläufe sind zunächst Einzelbetrachtungen empfohlen.

2.3 Allgemeine Fehlerquellen

Ein nicht umgebares Hindernis liegt darin, die Anfangswerte für eine Rechnung gar nicht oder nur mit beschränkter Genauigkeit bestimmen zu können. Für das Nordseemodell sind die tatsächliche Lage der Meeresoberfläche und die Stromgeschwindigkeiten unbekannt. Es wird in einer Näherung vom allein durch die Gezeit bestimmten mittleren Zustand ausgegangen. Die Ergebnisse der Beispielsrechnung zeigen daher für die erste Zeit an einzelnen Pegelorten einen deutlichen Fehler; dieser wird im Laufe der Rechnung ausgeblendet. Im Atlantikmodell liegt die Oberfläche zu Beginn der Rechnung invers zur Abweichung des aktuellen zum mittleren Luftdruck. Dies entspricht keineswegs der wirklichen Situation, gewährleistet aber einen stetigen Start. Beim Einsatz der Modelle im Vorhersagedienst können bessere Anfangsdaten, nämlich die Endwerte der Vorrechnung, übernommen werden.

Das Atmosphärenmodell braucht möglichst exakte Anfangsfelder. Zwar liegen über dem Land zahlreiche Daten vor, doch gerade im Entstehungsbereich von Tiefdruckgebieten, über See, fehlt eine solche Datendichte. Im Gegensatz zu dem ozeanographischen Modellteil kann der meteorologische Teil die atmosphärische Entwicklung nicht korrekt reproduzieren, wenn die Ausgangsdaten nicht hinreichend genau sind. Alle Beobachtungen sind mit lokalen Effekten belastet, die im Modell zur Entstehung von Schwerewellen führen können. Deswegen ist eine Datenbereinigung erforderlich, die aber die Daten verfälscht. Zudem benötigt die numerische Berechnung noch einige Zeit, bis alle wirkenden Kräfte in einer entsprechenden Balance sind: Rasche Entwicklungen werden zu Beginn allgemein zu langsam wiedergegeben, der spätere Verlauf kann überschätzt werden.

Nach diesen Bemerkungen zu den Anfangswerten folgen einige zu den Randwerten. Das Atmosphärenmodell ist durch die Ausdehnung über die gesamte Nordhemisphäre von seitlichen offenen Rändern frei. Zum Äquator ist der Rand geschlossen.

Das Nordseemodell hat offene Ränder im Englischen Kanal und am nördlichen Eingang. Weil den Gezeiten überlagerte Wellen vom offenen Rand die Deutsche Bucht in etwa zwanzig Stunden erreichen, muß für eine Vorhersage eine Korrektur zu den von der Gezeit vorgeschriebenen Randwerten eingeführt werden. Eine länger bestehende Luftdruckverteilung deformiert die Wasseroberfläche ähnlich wie ein Siegel das Wachs; die hydrostatische Relation stellt die Luftdruck- und Wasserstandsänderung in Beziehung. Bei der schnellen Veränderlichkeit der großräumigen Luftdruckverteilung über verhältnismäßig flachem Wasser gilt die hydrostatische Relation nicht, und es kann nicht wie im Atlantikmodell eine Inverslage zur Abweichung des aktuellen vom mittleren Luftdruck im Nordseemodell angenommen werden. Eine solche Korrektur vermeidet allein zusätzliche Fehler bei der Berücksichtigung des Luftdruckgradienten für die Beschleunigungen. Für diese Rechnungen werden die Randwerte durch die im Atlantikmodell errechneten Größen verbessert. Dieses Verfahren ist im Grundsatz nicht neu; das für dieses Vorhersagesystem entworfene Atlantikmodell zeichnet sich durch seine großräumige Erstreckung aus.

Eine dritte mögliche Fehlerquelle mathematisch-physikalischer Modelle liegt in der Diskretisierung. Die Möglichkeit einer stetigen Verfeinerung der Auflösung, also eines immer engeren Gitternetzes, ist durch die damit stark wachsende Rechenzeit und auch durch die

begrenzte Speichermöglichkeit des jeweiligen Rechners eingeschränkt. Für die Modelle sind Prozesse, die durch die Diskretisierung nicht mehr erfaßt werden, parametrisiert. Diese Parametrisierung ist Gegenstand vieler laufender Untersuchungen.

Im Nordseemodell werden die Bodentopographie und Küstenkonfiguration nur angenähert; gerade der Küstenbereich wird nicht genau beschrieben. Die Wasserstandsrechenpunkte des Modells, die zentral im Gitter liegen, können nicht beliebig nahe an die Orte der Vergleichspegel gerückt werden, die zum Teil auf Inselrückseiten oder in Flußläufen liegen. Für den Vergleich wären Hochseepegel vorzuziehen; leider ist eine Datensammlung nicht organisiert.

2.4 Windschubbestimmungen

Von entscheidender Bedeutung für die Sturmflutrechnung ist die Bestimmung des Windschubes an der Meeresoberfläche. Von der Methode her sind drei Verfahren zu unterscheiden:

Das gebräuchliche Verfahren stellt eine Beziehung zwischen dem geostrophischen Wind und dem Seeoberflächenwind her. Eine solche Beziehung, die aus Messungen in der Deutschen Bucht abgeleitet wurde und die Stabilität der Schichtung bei der Bestimmung von Windgeschwindigkeit und -richtung einbezieht (HASSE, 1973), ist für die Beispielsrechnung verwendet. Der Windschub wurde mit einem für numerische Berechnungen geeigneten Koeffizienten, der ebenfalls aus Messungen gewonnen wurde (SMITH u. BANKE, 1975, zitiert nach DAVIES u. FLATHER, 1977), bestimmt. Es kann nicht deutlich genug betont werden, daß die Annahme des geostrophischen Windes als wahrer Wind eine grobe Näherung ist.

Die zweite Möglichkeit der Windschubberechnung basiert auf der Grenzschichttheorie und enthält nur einzelne empirische Elemente. Diese Theorien sind aber nur ansatzweise entwickelt, und es wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

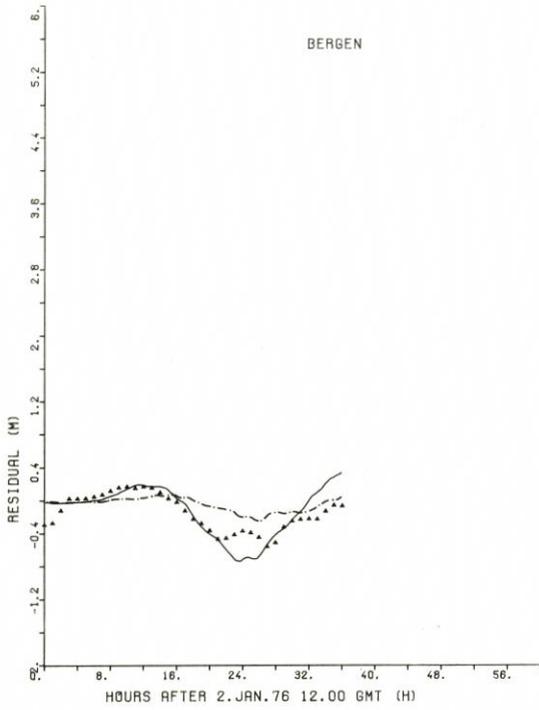
Der dritte Weg wäre die Verlegung der untersten Rechenebene des Atmosphärenmodells von ungefähr 500 Meter bis auf 50 Meter über der Seeoberfläche. Der Windschub ließe sich dann direkt angeben, jedoch würde sich die Rechenzeit erheblich verlängern. Für eine operative Wettervorhersage ist dieses Verfahren zur Zeit nicht möglich.

2.5 Beispielsrechnung der Sturmflut vom 2./3. Januar 1976

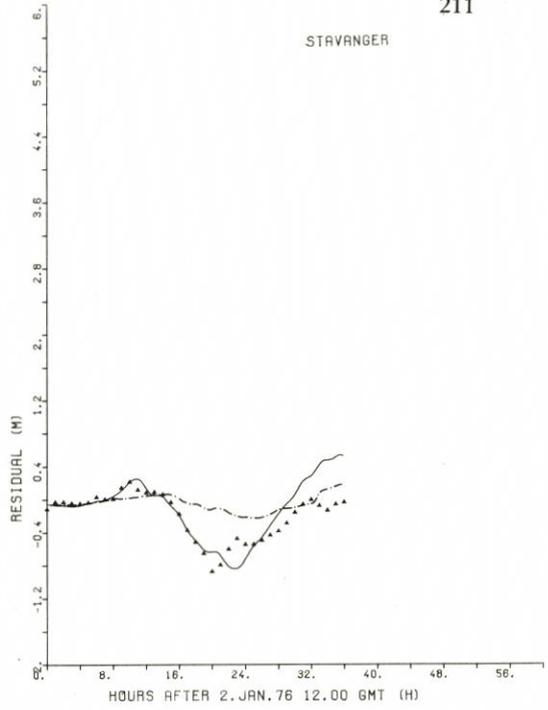
Als Beobachtungsdaten wurden Luftdruck- und Temperaturwerte aus nachanalysierten Wetterkarten digitalisiert. Eine Beschreibung der Wetterlage findet sich in der Literatur (KRUHL, 1977). Die Vorhersagezeit beträgt 36 Stunden ab dem 2. Januar 1976, 12.00 GMT. Es werden hier hauptsächlich die Ergebnisse des ozeanographischen Modellteils diskutiert.

Der Vergleichbarkeit wegen wurden Residuen gebildet, d. h. von der Sturmflutrechnung wurde der Gezeitenanteil abgezogen; entsprechend sind die Pegelwerte vom Anteil aller astronomischen Gezeiten befreit. In einer solchen Darstellung ist der Fehler der Rechnung relativ zur sehr viel größeren Gesamtwasserstandsänderung nicht mehr zu erkennen, das Bild ist sehr viel deutlicher: eine auf die Erkennung von Fehlern dramatisierte Darstellung. Will man die absoluten Wasserstände der Vorhersage wissen, so sind das Vorhersageresiduum des Modells und die Vorhersage der astronomischen Gezeiten nach den Tafeln zu addieren.

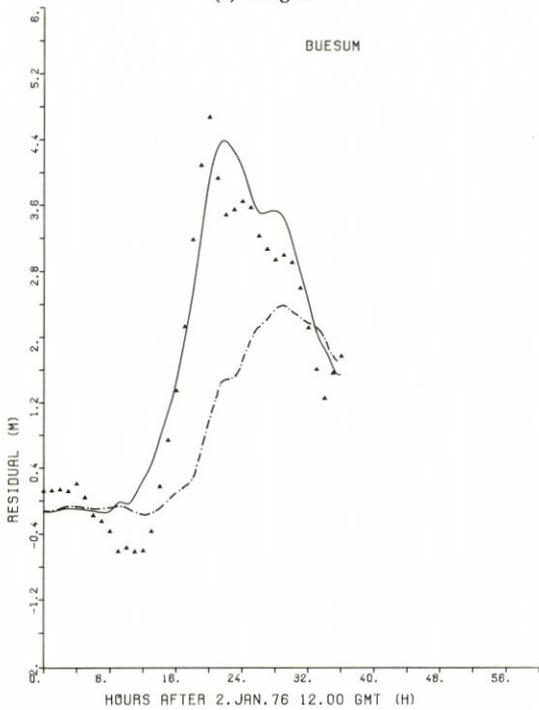
Die Pegelstationen (Abb. 4 a-l) verteilen sich um die gesamte Nordsee. Ihre Residuen sind im einstündigen Abstand in die Abbildungen eingetragen. Die Modellresiduen nach Beobachtungsdaten wurden in zehnminütigen Abständen abgelegt und sind durchgehend gezeichnet; Modellresiduen nach meteorologischen Vorhersagedaten sind strichpunktiert.



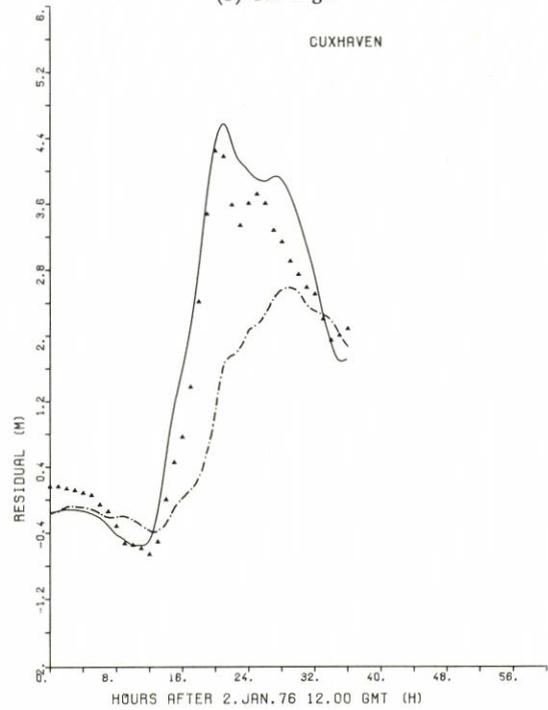
(a) Bergen



(b) Stavanger

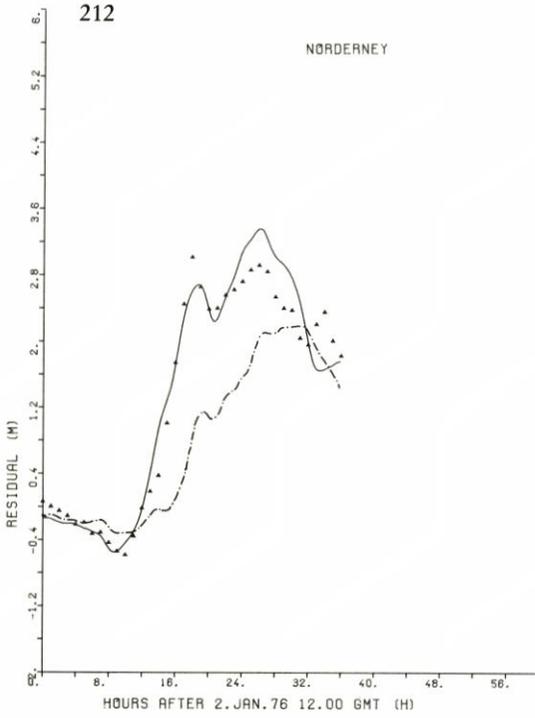


(c) Büsum

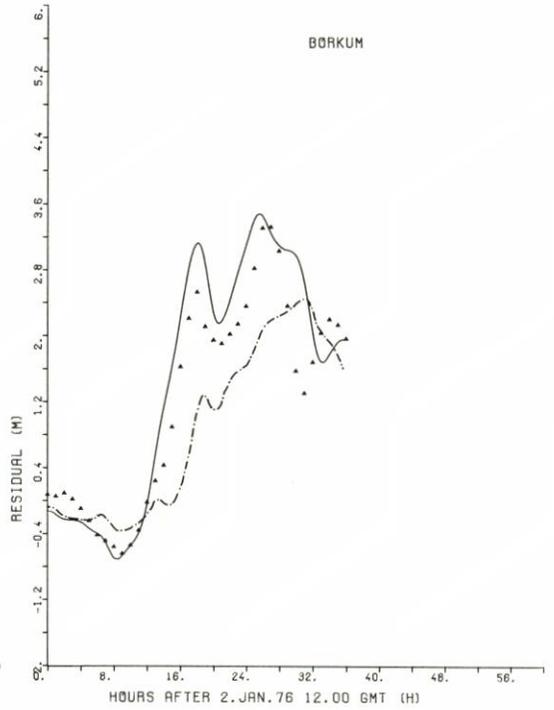


(d) Cuxhaven

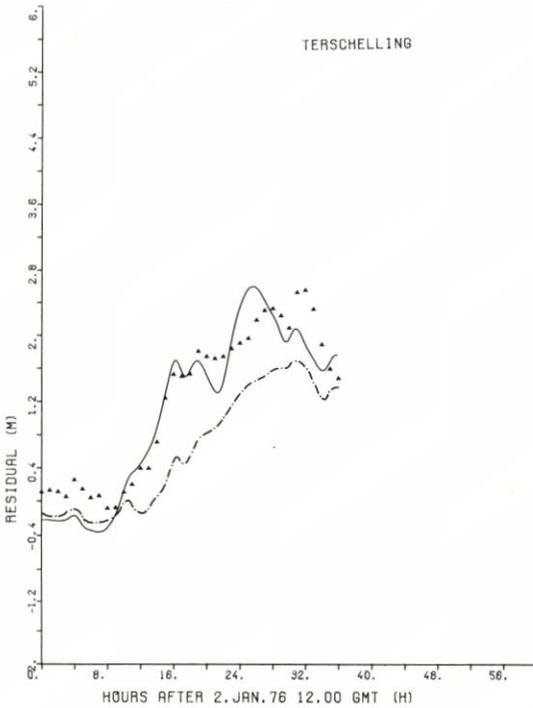
Abb. 4. Wasserstandsresiduen (m) ab 2. 1. 1976, 12.00 GMT (std)



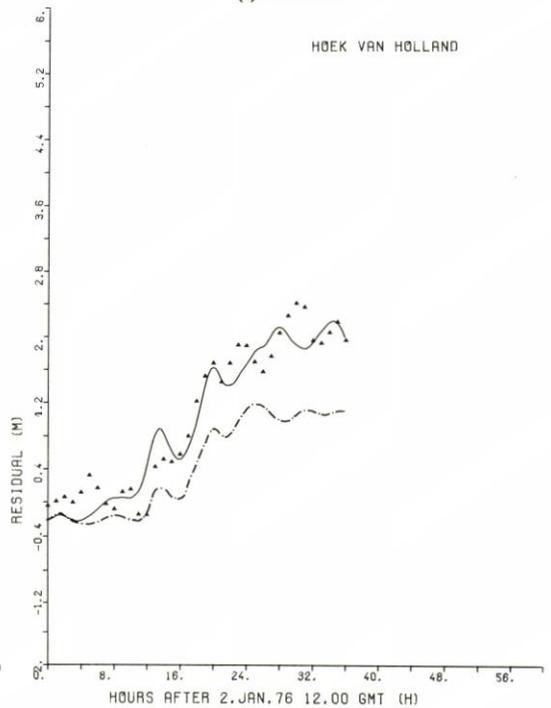
(e) Norderney



(f) Borkum

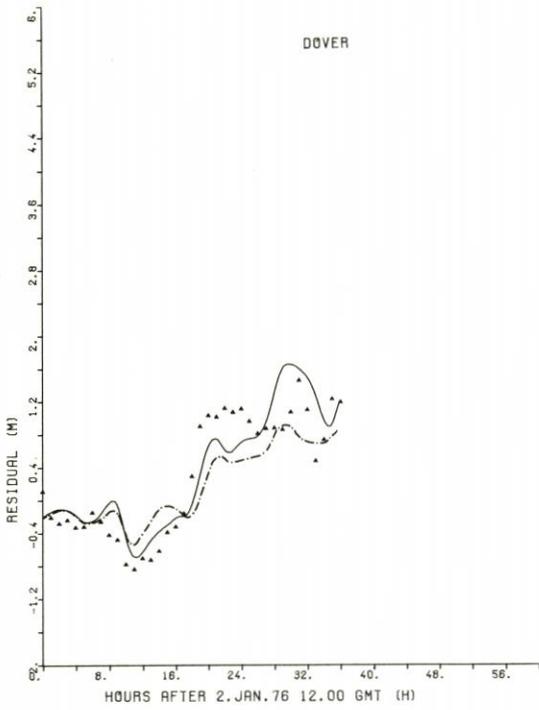


(g) Terschelling

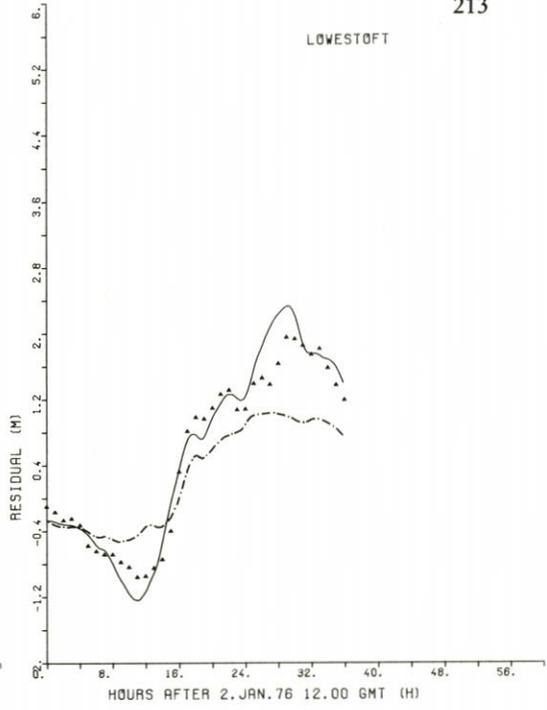


(h) Hoek van Holland

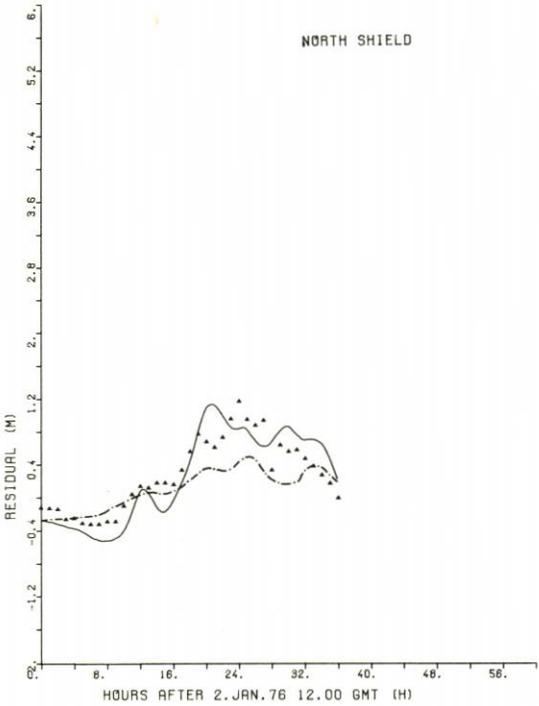
Abb. 4. Wasserstandsresiduen (m) ab 2. 1. 1976, 12.00 GMT (std)



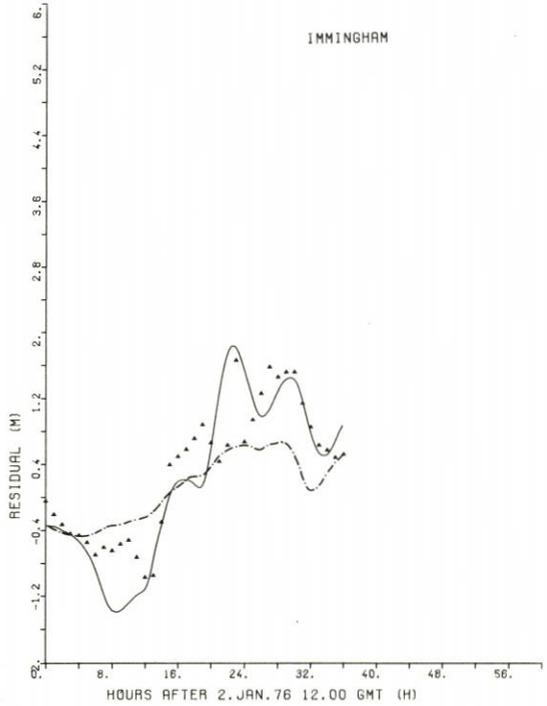
(i) Dover



(j) Lowestoft



(k) North Shields



(l) Immingham

Abb. 4. Wasserstandsresiduen (m) ab 2. 1. 1976, 12.00 GMT (std)



Abb. 5a. Beobachtete meteorologische und ozeanographische Lage, 2. 1. 1976, 12.00 GMT

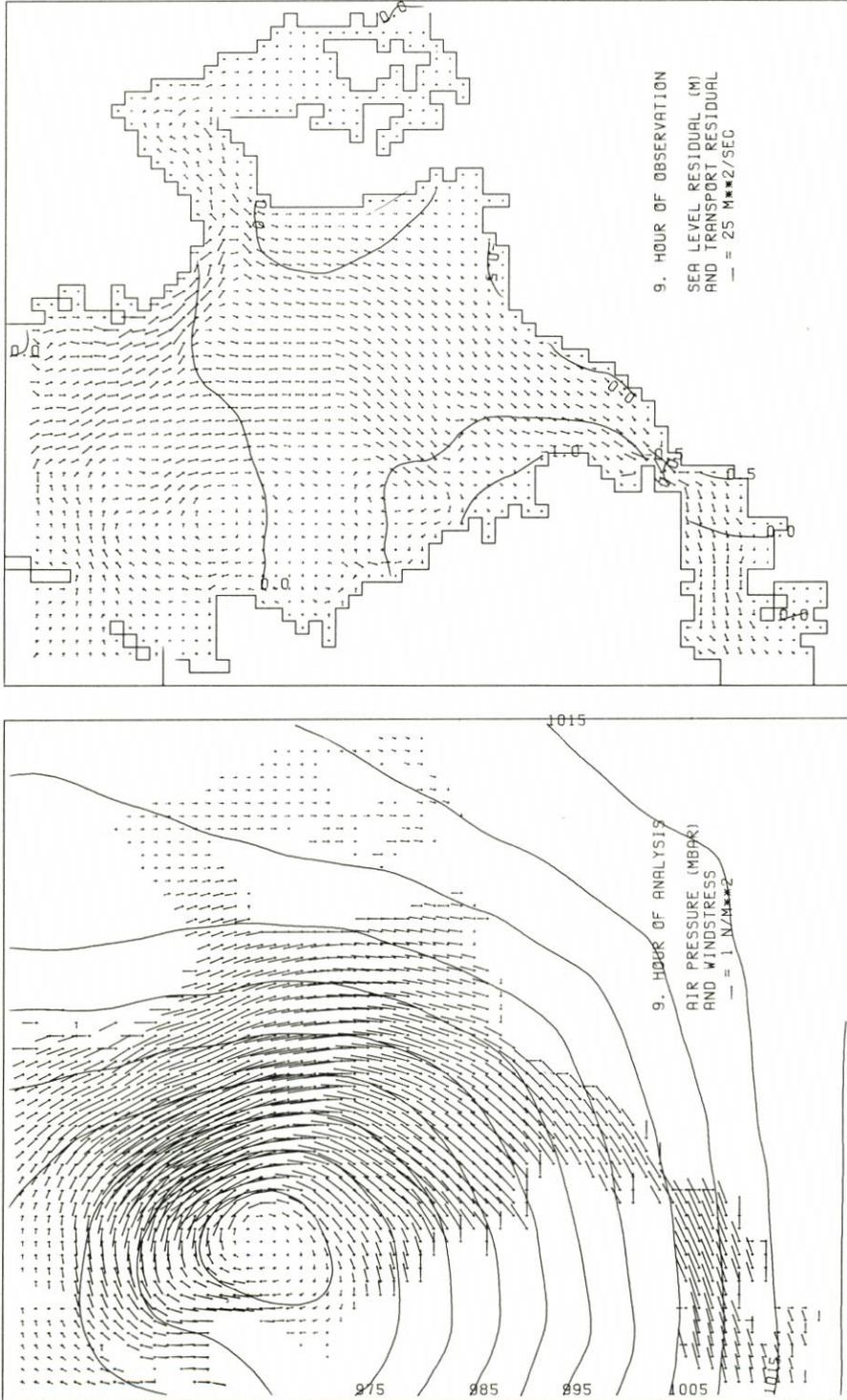


Abb. 5b. Beobachtete meteorologische und ozeanographische Lage, 2. 1. 1976, 20.00 GMT

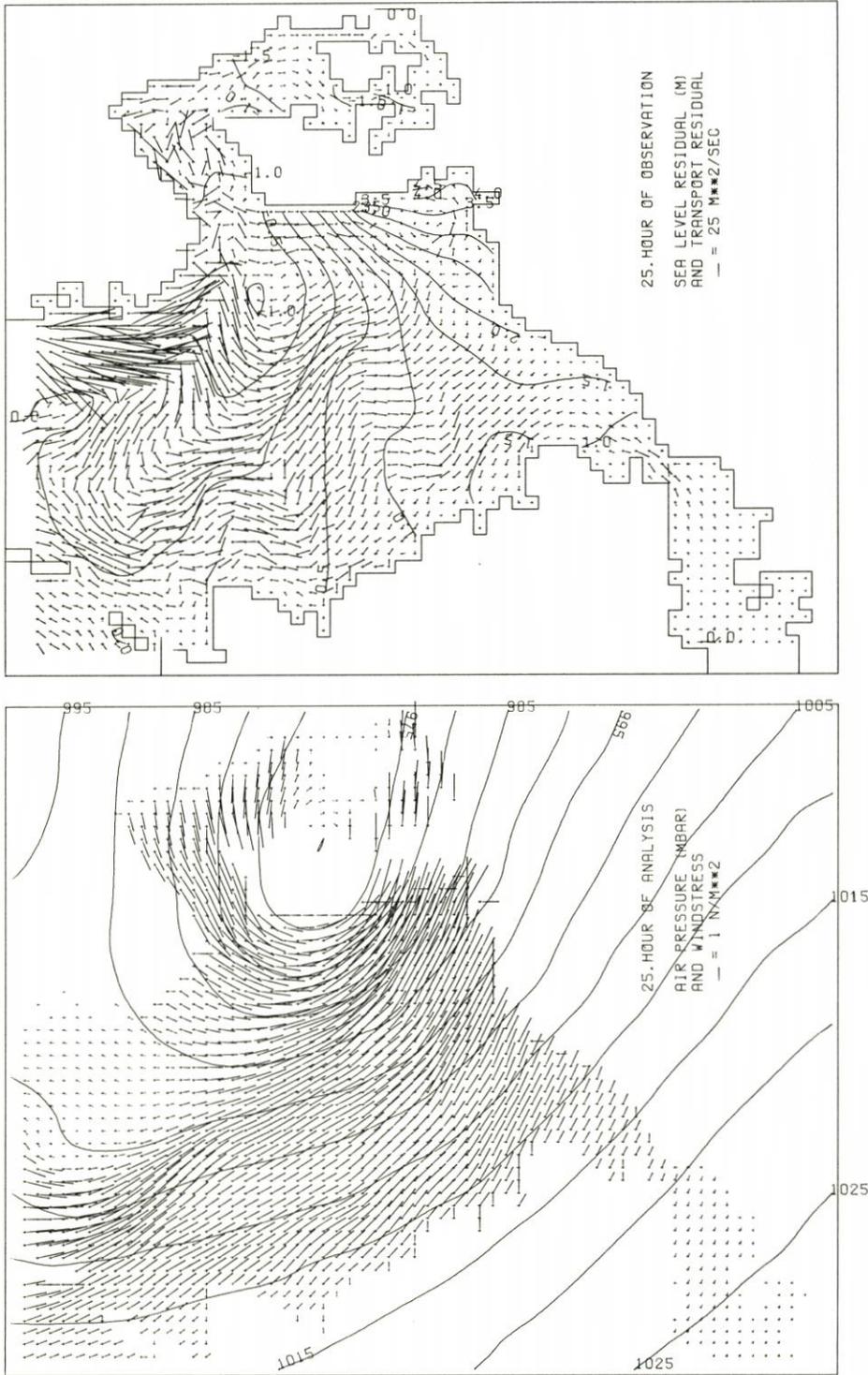


Abb. 5d. Beobachtete meteorologische und ozeanographische Lage, 3. 1. 1976, 12.00 GMT

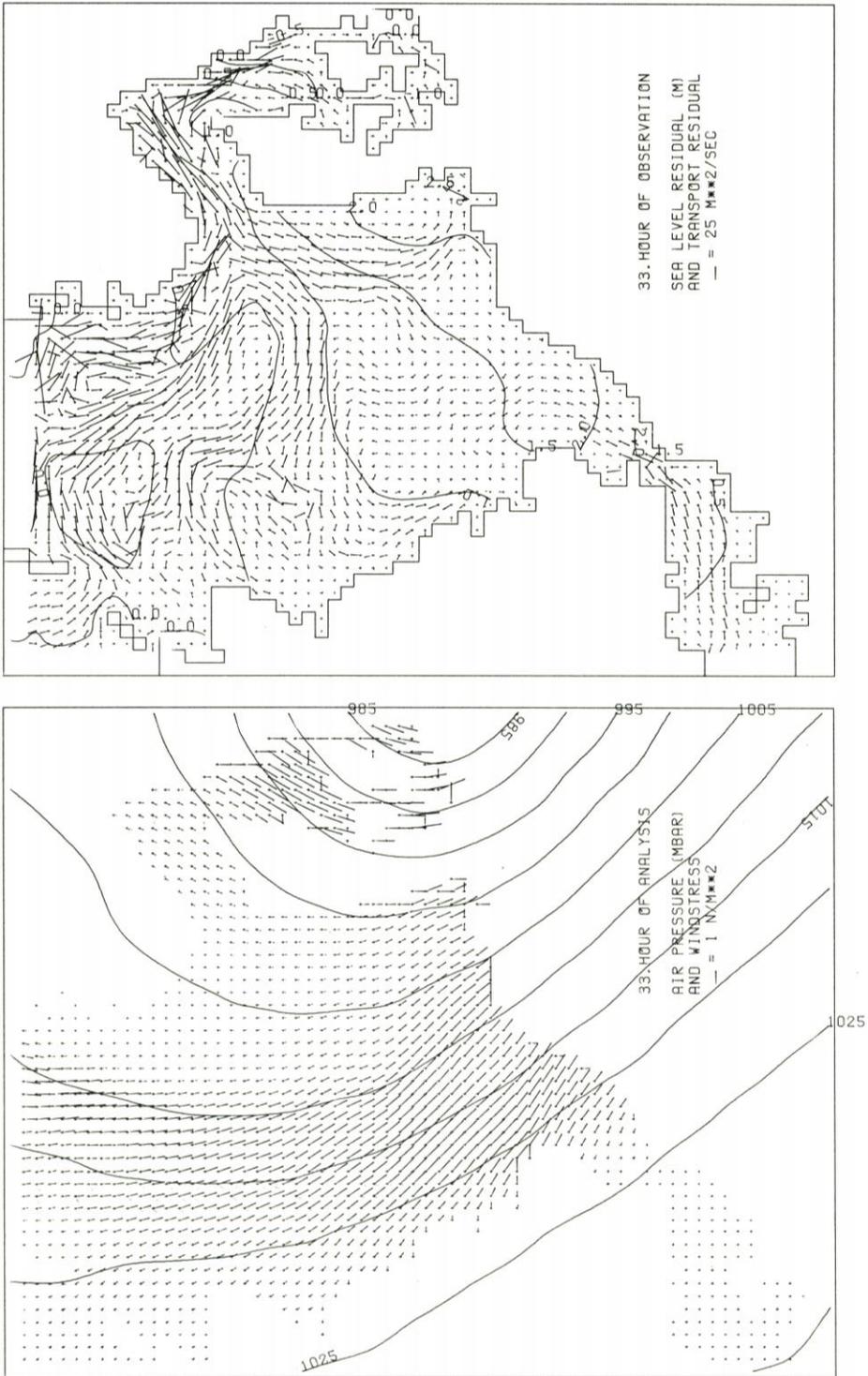


Abb. 5c. Beobachtete meteorologische und ozeanographische Lage, 3. 1. 1976, 20.00 GMT

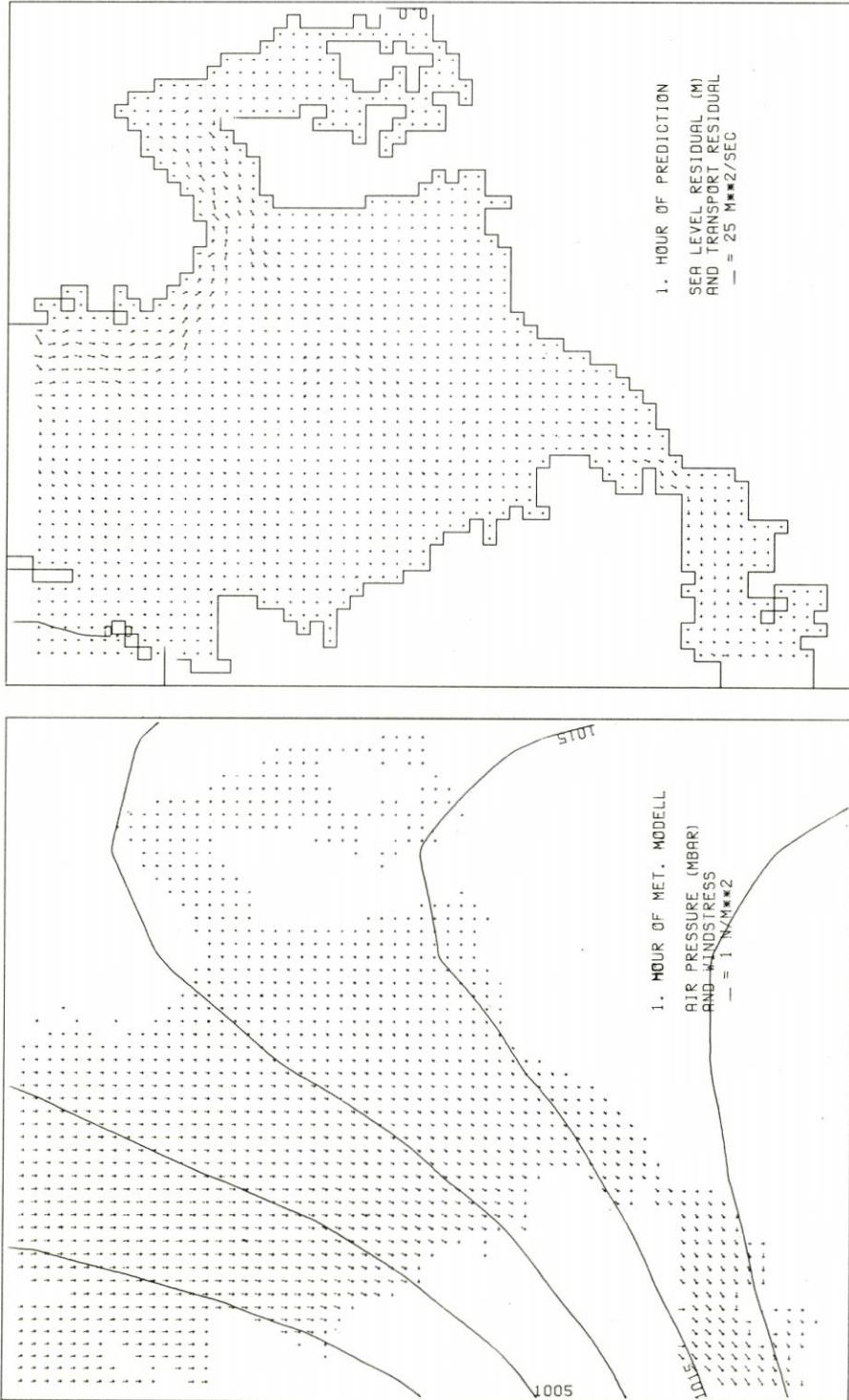


Abb. 6a. Berechnete meteorologische und ozeanographische Lage, 2. 1. 1976, 12.00 GMT

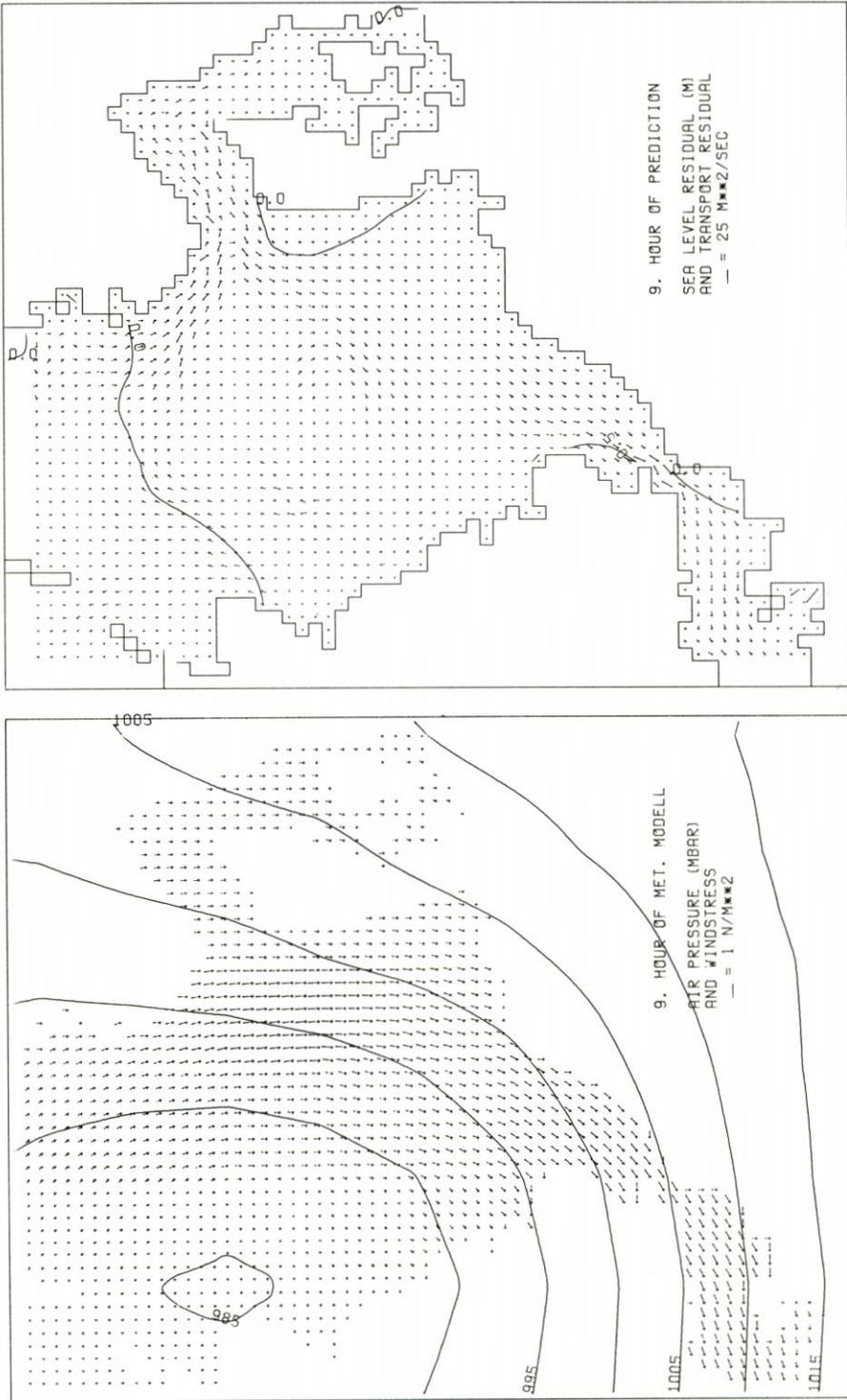


Abb. 6b. Berechnete meteorologische und ozeanographische Lage, 2. 1. 1976, 20.00 GMT

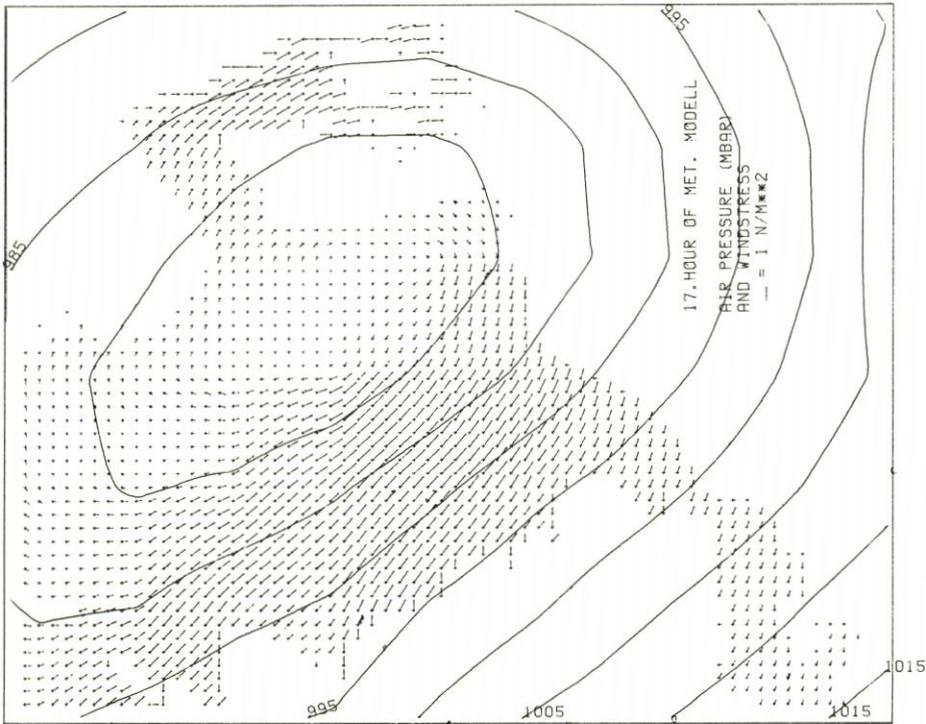
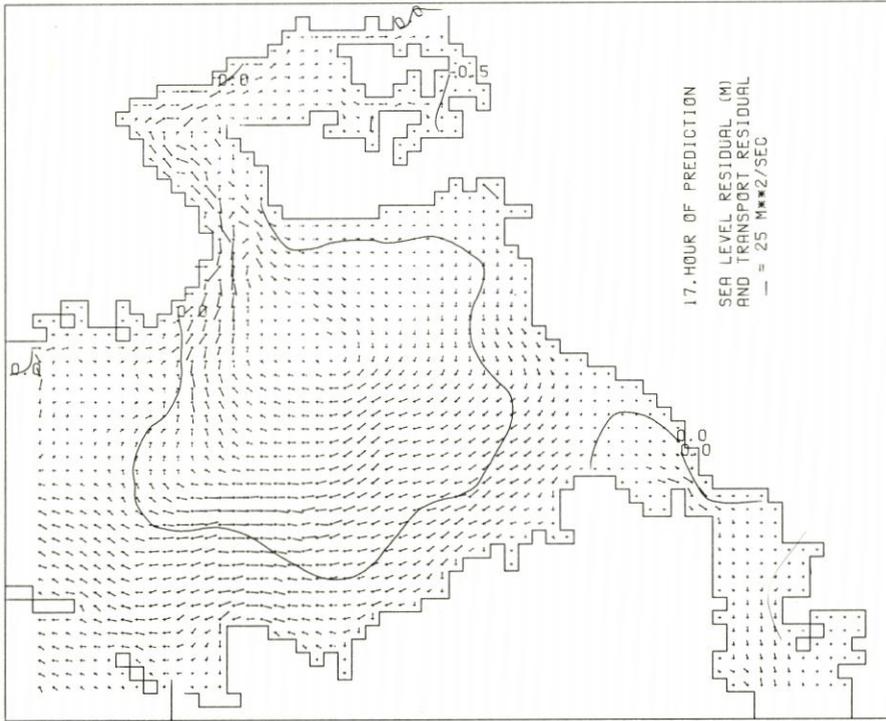


Abb. 6c. Berechnete meteorologische und ozeanographische Lage, 3. 1. 1976, 04.00 GMT

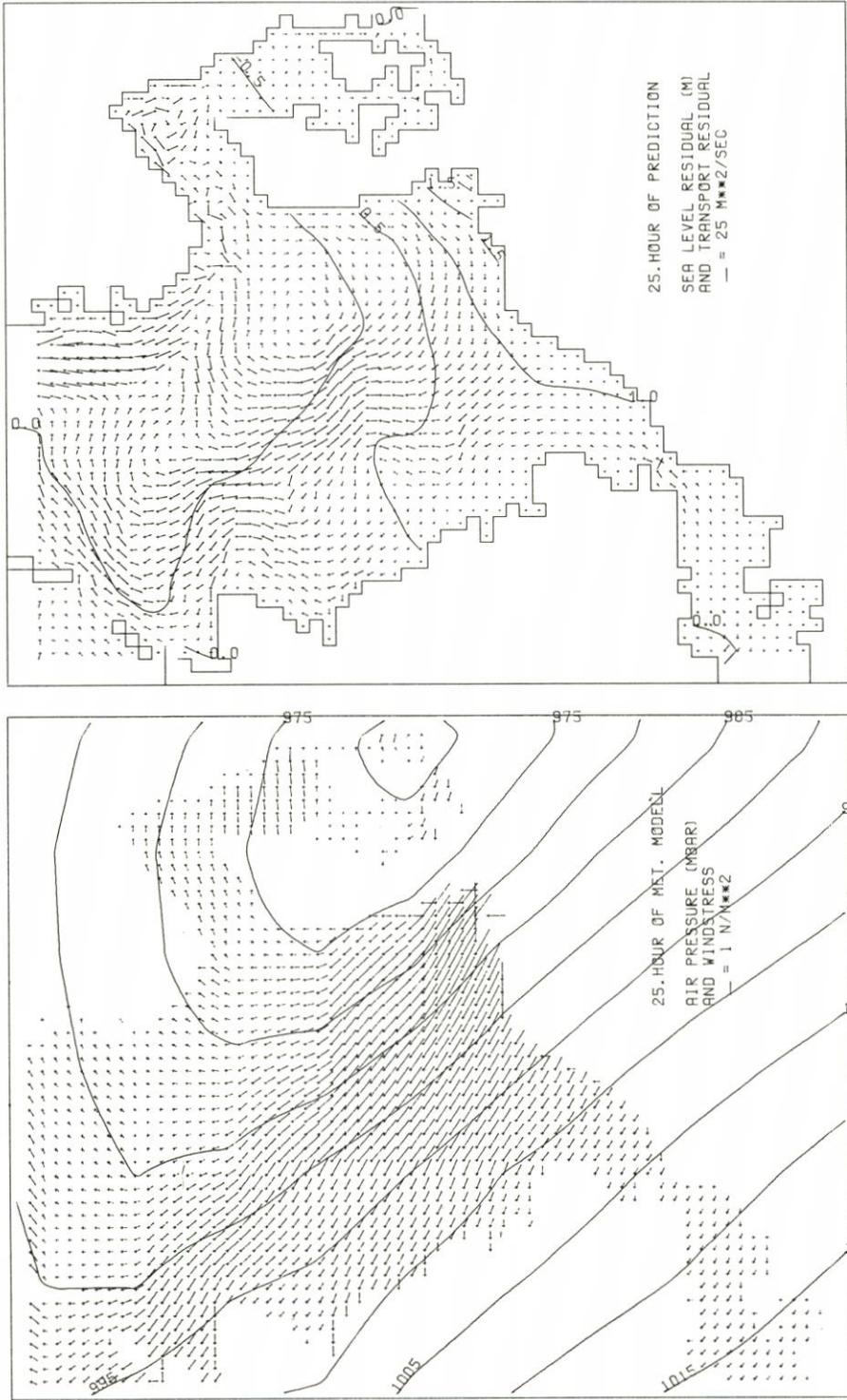


Abb. 6d. Berechnete meteorologische und ozeanographische Lage, 3. 1. 1976, 12.00 GMT

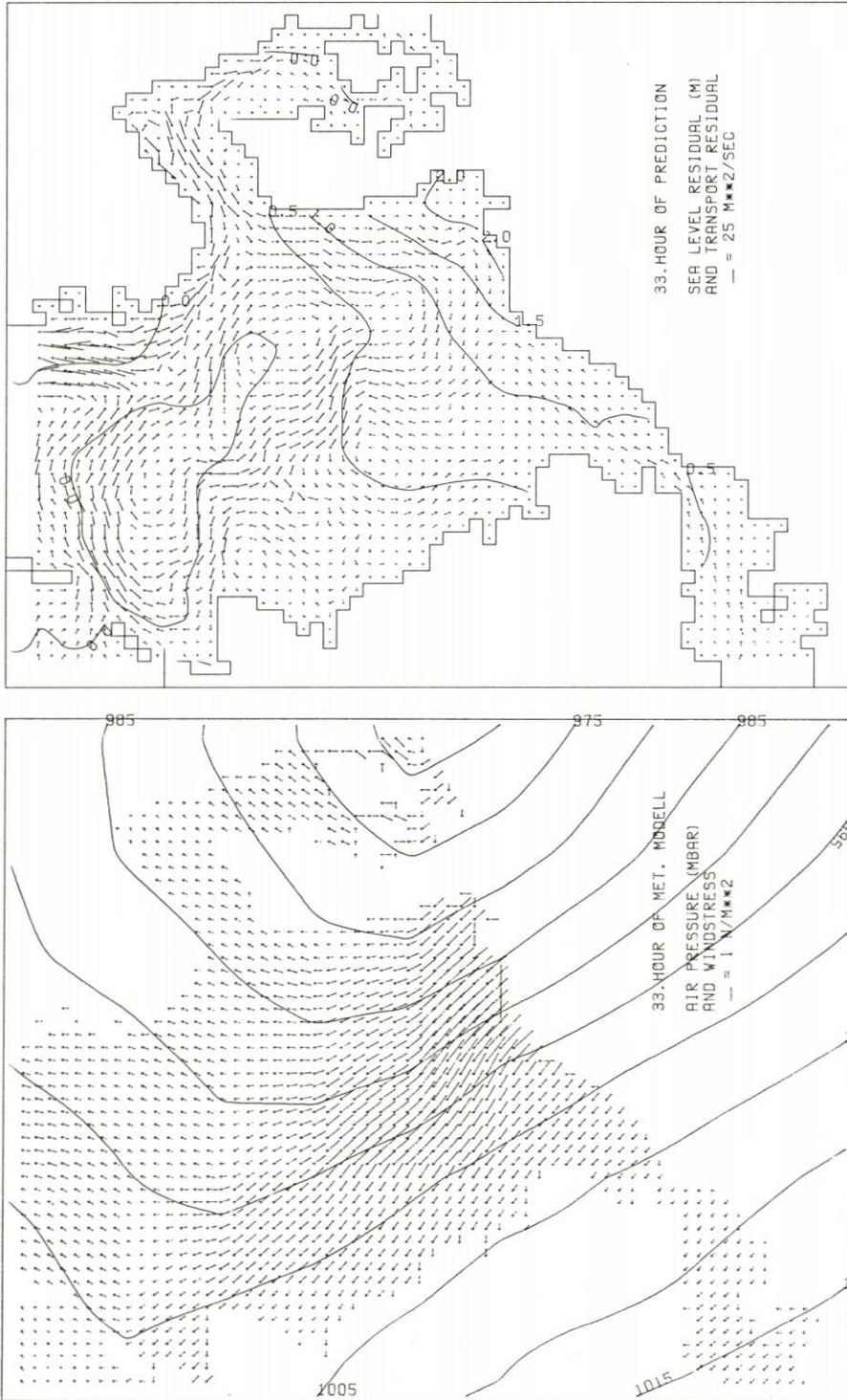


Abb. 6e. Berechnete meteorologische und ozeanographische Lage, 3. 1. 1976, 20.00 GMT

Sowohl die beobachtete (Abb. 5a–e) als auch die berechnete (Abb. 6a–e) meteorologische und ozeanographische Situation werden in Flächendarstellungen angegeben. In den Meeresabbildungen sind die Residuenwasserstände durch Isolinien wiedergegeben. Die Information ist durch die Transportresiduen, das sind Sturmfluttransporte minus Gezeitentransporte in der Dimension von Geschwindigkeit mal Tiefe, vervollständigt. Die Darstellung der Transporte wurde einer Angabe der Stromgeschwindigkeiten vorgezogen, da so die Verbindung zum treibenden Windschubfeld deutlicher ist. Die Beträge der Transporte sind proportional zu den Impulsbeiträgen; die Proportionalitätskonstante ist der Betrag von Einheitsfläche mal der Wasserdichte. In den meteorologischen Darstellungen sind die Isobaren gezeichnet und der Windschub an der Seeoberfläche durch Pfeile eingetragen. Diese zeigen die Richtung an, und die Länge gibt den Betrag in der Dimension von Kraft pro Fläche an. Alle Werte wurden durch eine lineare Interpolation vom meteorologischen auf das ozeanographische Gitter übertragen; auf die Schwäche dieses Verfahrens wird noch eingegangen.

2.6 Analyse der Ergebnisse mit Beobachtungsdaten

Als für diesen Fall deutliches Ergebnis ist herauszustellen, daß durch das Windfeld um den Tiefkern eine großräumige divergente Residuumszirkulation angeregt wurde. An allen Küsten erhöhten sich die Wasserstände, und die ausgeprägte Niveausenkung im Zentrum wies maximale negative Werte von über einem Meter auf (Abb. 5d); dies, obwohl der Luftdruck einer Niveausenkung entgegenwirkt. Im vorliegenden Fall bildete sich der Wirbel bereits beim Übertritt des Tiefkerns von Schottland zur Nordsee (Abb. 5b) und folgte diesem bis zu seiner Endlage südwestlich von Südnorwegen, d. h. zeitlich etwa neun Stunden. Es ist zu bemerken, daß Wasser von der norwegischen Küste zugeführt und in die Zirkulation einbezogen wurde (Abb. 5d). Die später einsetzenden Winde aus Nordwest trieben die Wassermassen in die Deutsche Bucht; nun bildete sich die bekannte Schräglage der Wasseroberfläche mit höchsten Wasserständen vor der deutschen und dänischen Küste aus (Abb. 5d). Etwa zwölf Stunden nach Erreichen der Extremwerte setzte in den Nordseeausgängen der Ausstrom ein (Abb. 5e). Die Residuumsrandwerte haben während des betrachteten Zeitraums allein im Englischen Kanal nennenswerte Beträge von etwa minus einem viertel Meter.

2.7 Ergebnisse mit den meteorologischen Vorhersagedaten

Der Vergleich der Luftdruckfelder läßt erkennen, daß das Atmosphärenmodell (Abb. 6) die Situation (Abb. 5) zunächst unterschätzt (Abb. 5b, Abb. 6b) und erst gegen Ende etwa korrekte Gradienten aufweist (Abb. 5e, Abb. 6e). Die Zughahn des Tiefkerns wird richtig reproduziert. Die Nordseemodellrechnung gibt deshalb die Ausbildung der Residuumszirkulation zu spät und zu gering wieder (Abb. 6c). Die Residuen bleiben zu niedrig; der charakteristische Verlauf wird jedoch im wesentlichen erfaßt (Abb. 4a–l). Testrechnungen ergaben, daß sich die Residuen für Stationen außerhalb der Deutschen Bucht mit einem Korrekturfaktor von 1,5 für den Luftdruckgradienten an die tatsächlichen Residuen recht genau anpassen lassen. Die größeren Fehler der Pegel in der Deutschen Bucht liegen in der Niedrigwasserzeit.

Der Auflösung des Druckfeldes ist durch den Gitterpunktstand im meteorologischen Modell eine Grenze gesetzt. Durch die lineare Interpolation auf das ozeanographische Netz werden die Gradienten verwischt; bei einer solchen kleinräumigen Ausbildung des Tiefkerns

ist eine zweidimensionale Interpolation höherer Ordnung notwendig. Dies ist für folgende Rechnungen vorgesehen.

Als entscheidende Fehlerquelle für die anfänglich zu schwache Reproduktion des Druckfeldes sind die Startdaten des Atmosphärenmodells zu sehen. Sie entstammen einer Analyse der gesamten Hemisphäre. Davon unabhängig wurde für den Nordseeraum eine besondere Analyse erstellt und hier als Beobachtungsmaterial verwendet. Die ersten Darstellungen des Luftdruckfeldes des Modells (Abb. 6a) und der Analyse (Abb. 5a) sollten identisch sein, unterscheiden sich aber eindeutig. So zeigen die Analysedaten einen stärkeren Luftdruckgradienten mit einem Wind, der bereits zu Beginn der Nordseemodellrechnung einen Driftstrom verursacht. Diese Strömung begünstigt im weiteren Verlauf die Ausbildung der Residuumszirkulation. Es hat den deutlichen Anschein, als seien die besonderen Analysedaten für den Nordseeraum realistischer als die für das Atmosphärenmodell zugrunde gelegten Daten aus der Hemisphärenanalyse.

2.8 S c h l u ß b e m e r k u n g

Der Vergleich der Rechnungen mit meteorologischen Vorhersagedaten zum einen und mit Beobachtungsdaten zum anderen zeigt Abweichungen, deren Größen eine Beschränkung auf das verwendete einfache Modell zuläßt. Die hier angegebenen Ergebnisse sind Arbeitsergebnisse in Rohfassung. Die Beispielsrechnung mit Beobachtungsdaten zeigt eine hinreichende Wiedergabe der Pegelwerte. Damit ermöglichen die berechneten und nicht beobachtbaren Wassertransporte und Abweichungen der Meeresoberfläche von ihrer mittleren Lage eine Analyse der dynamischen Entwicklung der Sturmflut. Die charakteristischen Merkmale der Entwicklung werden durch die Rechnung mit Vorhersagedaten erfaßt. Damit sind die Grunderwartungen an das Vorhersagesystem zunächst befriedigt.

Eine weitere Rechnung der gleichen Situation unter Berücksichtigung der bisher erkannten Verbesserungsmöglichkeiten ist vorbereitet.

Mit einer Reihe von Rechnungen verschiedener Wettersituationen wird das System auf seine allgemeine Tauglichkeit getestet werden. Vergleiche mit unterschiedlichen Windschubansätzen werden begleitend gerechnet. Ein Nebenziel wird die Analyse typischer Sturmflutdynamiken sein, die nur mit numerischen Modellen und deren vollständiger Information über Strömungen und Wasserstände möglich ist. Typisierungen sollen die wesentlichen Merkmale sturmflutzeugender Wetterlagen herausarbeiten. Dem Praktiker kann schon so eine Hilfe zur Früherkennung von Gefahrenlagen angeboten werden.

3. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- DUUN-CHRISTENSEN, J. T.: Investigations on the practical use of a hydrodynamic numeric method for calculation of sea level variations in the North Sea, the Skagerrak and the Kattegat. DHZ, 24, H. 5, 1971.
- FISCHER, G.: Results of a 36-hour storm surge prediction of the North Sea for 3 January 1976 on the basis of numerical models. DHZ, 32, H. 3, 1979.
- FLATHER, R. A. and DAVIES, A. M.: On the specification of meteorological forcing in numerical models for North Sea storm surge prediction, with application to the surge of 2 to 4 January 1976, DHZ, Ergänzungsh., A, 15, 1978.
- HASSE, L.: On the surface to geostrophic wind relationship at sea and the stability dependence of the resistance law. Beitr. Phys. Atm., 47, 1974.
- KRUHL, H.: Die Sturmflut-Wetterlagen im Januar 1976. Die Küste, H. 30, 1977.
- TOMCZAK, G.: Über die Genauigkeit der Sturmflutvorhersage für die deutsche Nordseeküste. DHZ, 13, H. 1, 1960.