

HN-Modellrechnungen und Naturmessungen – ein Vergleich –

Bericht der Projektgruppe HN-Modelle des KFKI¹⁾

Zusammenfassung

Das mathematische Modell der Inneren Deutschen Bucht des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen wurde von September bis November 1981 in einem großräumigen Meßprogramm auf seine Naturähnlichkeit getestet. Der Entwicklung des Modells war eine Normaltide zugrunde gelegt worden. Das Naturmeßprogramm sollte aufzeigen, inwieweit das Modell noch bei stark erniedrigten oder erhöhten Wasserständen einsetzbar ist bzw. in welchen Toleranzbereichen mögliche Fehler vernachlässigbar sind. – Durch einen glücklichen Zufall konnten während der Sturmflut vom 24. November 1981 noch Wasserstandswerte auf dem seeseitigen Rand des Modells gemessen und in die Vergleichsuntersuchungen einbezogen werden.

Die hier mitgeteilten Ergebnisse lassen eine zufriedenstellende Übereinstimmung der gerechneten mit den Naturdaten erkennen. Sie ermutigen dazu, mathematische Modelle stärker als bisher in der Küstenforschung zu verwenden.

Summary

In an extensive measurement program the resemblance to nature of the mathematical model "Inner German Bay" of the Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen was tested from September through November 1981. The model was developed on the basis of a normal tide. The nature measurement program was devised to show the margins of its utilization regarding noticeably heightened or reduced water levels, or within what range of tolerance possible mistakes can be neglected respectively. At the storm tide of November 24, 1981, it was possible by a lucky chance to measure the water levels of the offshore border of the model and to include these values in the comparative measurements.

The here reported findings show a satisfying correspondence of the calculated and the measured data. They encourage to use mathematical models more frequently than hitherto in the coastal research.

Inhalt

1. Einleitung	34
2. Planung und Durchführung	35
2.1 Vorüberlegungen	35
2.2 Planungsphase	35
2.3 Das Meßnetz (Abb. 1)	37
2.4 Vorbereitung und Ablauf der Messungen	38
2.5 Praktische Erfahrungen	39
3. Datenerfassung und Datenaufbereitung	41
3.1 Datenregistrierung	41
3.2 Meteorologische Parameter	41

¹⁾ Mitglieder der Projektgruppe: Dr. LUCK (Obmann), Norderney; Dr. RENGER, 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.

3.3 Wasserstände	41
3.4 Stromgeschwindigkeiten	44
4. Vergleich Natur – Modell	46
4.1 Das HN-Modell INDB	46
4.2 Modellrechnungen	46
4.3 Modellsteuerung	47
4.3.1 Wasserstände an den offenen Rändern	47
4.3.2 Windschub an der Wasseroberfläche	47
4.4 Ergebnisse des Vergleichs	47
4.4.1 Wasserstände	47
4.4.2 Strömungen	50
5. Zusammenfassende Beurteilung	51
6. Schriftenverzeichnis	53

1. Einleitung

Die in den Jahren 1977 bis 1981 hergestellten Hydrodynamisch-Numerischen Modelle (HN-Modelle) des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), die damit verbundenen Absichten und der organisatorische Rahmen der Arbeiten sind bereits mehrfach beschrieben worden (LUCK u. SCHÄFER, 1980; HN-Gruppe, 1983). Der Erarbeitung der Modelle war damals das Tidegeschehen vom 8. und 9. Juli 1976 zugrunde gelegt worden (Normaltide).

Schon zu Beginn der Arbeiten wurde erwogen, die Modelle späterhin durch vergleichende Naturmessungen auf ihre Anwendbarkeit auch bei nicht durchschnittlichen Verhältnissen zu testen bzw. jene Grenze aufzuzeigen, bis zu welcher die Modelle ohne Modifikation noch sinnvoll eingesetzt werden können. Diese Überlegungen nahmen im Laufe der Jahre 1979 sowie 1980 Gestalt an und führten zu dem 1981 abgewickelten Programm DEBEX (Deutsche Bucht Experiment). Über die praktische Ausführung dieses vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) sehr stark geförderten Programmes ist von WIESE (1983) berichtet worden. Seine Betreuung oblag der „Projektgruppe HN-Modelle“ des KFKI, die Federführung der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney.

Das Naturmeßprogramm DEBEX mußte sich an jenen Grenzen orientieren, die vor allem durch den zur Verfügung stehenden Schiffs- und Gerätepark der im KFKI zusammenarbeitenden Verwaltungen gezogen waren. Auch aus diesem Grunde wurden daher nicht alle Modelle, sondern lediglich das Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ in die Untersuchungen einbezogen. Auch die Betreuung der Pegel und Strömungsmeßgeräte mußte in einem Rahmen gehalten werden, der mit dem vorhandenen Personal und ohne Vernachlässigung anderer Aufgaben auszufüllen war. In Abb. 1 ist das schließlich betriebene Meßnetz lagemäßig dargestellt.

Die Vorbereitung und Ausführung von DEBEX (Gerätebeschaffung, Schiffseinsätze, Organisation usw.) konnten von der HN-Projektgruppe allein nicht mehr wahrgenommen werden. Aus diesem Grunde ist für die Koordination, Erarbeitung der Detailprogramme, Beschaffungen u. ä. ein technischer Angestellter eingestellt worden. Die Schiffseinsätze wurden vom Wasser- und Schiffsahrtsamt Cuxhaven organisiert. Bei der Ausführung des Naturmeßprogrammes wirkten mit:

- Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney, (Federführung),
- Strom- und Hafengebäude Hamburg, Referat Hydrologie Unterelbe, Cuxhaven,
- Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide,
- Wasser- und Schiffsahrtsamt Bremerhaven,

- Wasser- und Schiffsamt Cuxhaven,
- Wasser- und Schiffsamt Tönning,
- Wasser- und Schiffsamt Wilhelmshaven,
- Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg,
- Bundesanstalt für Wasserbau – Abteilung Küste, Hamburg,
- Seewetteramt Hamburg.

Mitte September 1981 waren die Geräte – mit Ausnahme einiger Hochseepegel, die erst Ende des Monats angeliefert wurden – aufgebaut und meßbereit. Die zwei folgenden Monate erbrachten unterschiedliche Wetterlagen mit erhöhten und erniedrigten Tiden. Am 24. November 1981 – also nach dem planmäßigen Meßzeitraum – stellte sich eine sehr schwere Sturmflut ein, die an verschiedenen noch auf dem Rand und im Gebiet des Modells liegenden Pegeln gemessen werden konnte. Damit waren – wenn auch lückenhaft – erstmals Sturmflutwasserstände im Zusammenhang mit HN-Modellen gemessen worden.

Die Auswertung der Meßdaten setzte sofort nach Abschluß der Außenarbeiten ein. Gleichzeitig wurden die Modelle mit den nun zur Verfügung stehenden Daten beschickt und im Laufe des Jahres 1982 die Vergleiche Natur/Modell vorgenommen. Die wissenschaftliche Planung, die letztthin erzielten Ergebnisse und deren Bewertung werden nachfolgend mitgeteilt.

2. Planung und Durchführung

2.1 Vorüberlegungen

Es zeigte sich relativ früh, daß die Modelle bei Normaltiden, für die sie zunächst auch ausschließlich geeicht waren, sehr gute bis befriedigende Ergebnisse liefern konnten. An einer Verwendung bei Sturmflutuntersuchungen bestanden erhebliche Zweifel, da die Modelle nicht für solche Abläufe geeicht waren. Die Bedenken richteten sich gegen die verwendeten Reibungsansätze, die Unkenntnis über den Ansatz des Windfeldes über den Modellen und eine unnatürliche Reproduktion des Triftstromes, der nach Größe und Richtung sowie über die Tiefe anderes Verhalten als die mittleren Strömungsverhältnisse zeigt.

Zwar lagen aus dem Modellgebiet bereits viele diesbezügliche Untersuchungen vor, aber sie bezogen sich stets nur auf Teilaspekte und kleinere Regionen. Damit waren sie nicht gut geeignet zum Nachweis der Naturähnlichkeit der KFKI-Modelle. Ein Ausweg wurde allein in einem Meßprogramm gesehen, das gezielt Vergleiche Natur – Modell gestatten sollte, und zwar durch ein möglichst genau definiertes Windfeld mit den dadurch erzeugten Tidekurven und Strömungsganglinien. Bei letzteren wurden insofern Schwierigkeiten erwartet, als im Modell an jedem Ort nur ein Geschwindigkeitsvektor berechnet wird, dieser aber verschieden von einem an demselben Ort in bestimmter Höhe über der Sohle in der Natur gemessenen Vektor sein muß. Zur Überwindung dieser Schwierigkeiten sollten an einigen Stellen Vertikalprofile der Strömungen gemessen werden.

Da es ein Meßprogramm solcher Zielsetzung und solchen Umfangs bis dahin noch nicht gegeben hatte, lag es nahe, es rechtzeitig mit allen Beteiligten und Interessierten zu diskutieren.

2.2 Planungsphase

Von vornherein war klar, daß ein Vergleich Modell – Natur nicht an allen insgesamt 5800 Punkten der drei Regionalmodelle möglich sein würde. Beschränkungen waren durch die

verfügbaren Gerätezahlen, Betreuungs- und Auswertekapazitäten auferlegt, ferner durch die Tatsache, daß die Verhältnisse in der Deutschen Bucht ohnehin über größere Flächen einheitlich sind und daß die topographischen Gegebenheiten in Küstennähe – bedingt durch den Gitterpunktabstand von 1,8 km – zwangsweise im Modell generalisiert worden waren und somit völlige Übereinstimmung mit der Natur hier gar nicht erwartet werden konnte. Das wiederum konnte auch Messungen außerhalb der Modell-Gitterpunkte erlauben.

Mit diesen Überlegungen war ein erstes Meßkonzept entworfen worden. Die vorgegebenen Beschränkungen hatten zur Konzentration aller Aktivitäten auf das Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ (INDB) als Beispiel geführt. Es stellte einen Kompromiß zwischen dem Erwünschten und dem Machbaren dar. Die Diskussionen dieses Meßkonzeptes haben mit den bewirkten Modifikationen dazu beigetragen, auch einen Kompromiß zwischen dem Bedarf des Küsteningenieurwesens und dem der Ozeanographie zu finden in dem gemeinsamen Ziel, Datenmaterial aus der Natur zu erhalten, das nicht nur für das KFKI-Modell, sondern auch für alle weiteren Modelle als Maßstab für die Naturähnlichkeit dienen sollte, handele es sich nun um Ein- oder Mehrschichtenmodelle, Sedimentbewegungs-, Sturmflut- oder Seegangmodelle. Zielsetzung sollte dabei bleiben, beispielhaft das INDB-Modell – insbesondere in den morphologisch stark gegliederten Küstengebieten – hinsichtlich der Übereinstimmung von Wasserständen sowie der Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen mit den Naturdaten zu überprüfen und evtl. zu verbessern. Für eine Normaltide konnte eine solche Übereinstimmung – zumindest hinsichtlich der inneren Logik des Modells – bereits nachgewiesen werden (LUCK u. SCHÄFER, 1980). – Des weiteren waren jene Tidewasserstände zu ermitteln, bei welchen das vorhandene – an einer Normaltide geeichte – Modell ohne Modifikation noch angewendet werden konnte. Der Test sollte auch erstmals die Möglichkeit bieten, ein Modell in dieser Weise mit synchron gemessenen Naturdaten zu vergleichen, da auch die Wasserstände am offenen Rand meßtechnisch erfaßt werden sollten. Bei windbeeinflussten Tiden mit erniedrigten (östliche Winde) oder erhöhten (westliche Winde) Wasserständen sollten die Windwerte in das Modell eingeführt und entsprechende Modellrechnungen vorgenommen werden. Der Einfluß des Windes im Modellgebiet (lokaler Wind) war als Windschub aus stündlichen Windfeldern zu berücksichtigen. Der meteorologische Einfluß von außen auf die hydrodynamischen Vorgänge im Gebiet des Regionalmodells war in den gemessenen Randwerten enthalten.

Es war bekannt, daß zur Simulation der meteorologisch bedingten Bewegungsvorgänge des Wassers ein ausreichend dichtes Meßnetz erforderlich ist. Der Wind ist örtlich in Richtung und Stärke sehr unterschiedlich und kann nur näherungsweise erfaßt werden. Für die Modellrechnungen ist der Wind – zerlegt in seine Komponenten – in jedem Gitterpunkt anzusetzen. Da Landstationen für das Küstenvorfeld nur bedingt repräsentative Daten liefern, im tiefen Wasser kaum Stationen vorhanden sind und zusätzliche nicht aufgebaut werden konnten, mußte das Schwergewicht der Messungen zwangsläufig im Küstenvorfeld liegen.

Die Messungen sollten im Herbst 1981 stattfinden, da während dieser Jahreszeit unterschiedliche Wetterlagen zu erwarten sind sowie die meteorologischen Experimente KONTUR (Konvektion und Turbulenz) und PUKK (Projekt zur Untersuchung des Küstenklimas) ausgeführt werden sollten, deren umfangreiches Datenmaterial für spezielle Untersuchungen dann mit zur Verfügung stehen konnte.

Der Meßzeitraum wurde im Laufe der Planungsphase auf die Zeit vom 15. 9. bis 15. 11. 1981 festgelegt. Da einige Geräte erst später geborgen werden konnten, gelang es erstmals, auch den Ablauf einer sehr schweren Sturmflut (24. Nov. 1981) im Küstenvorfeld zu erfassen (BECKMANN, 1982; WIESE, 1982).

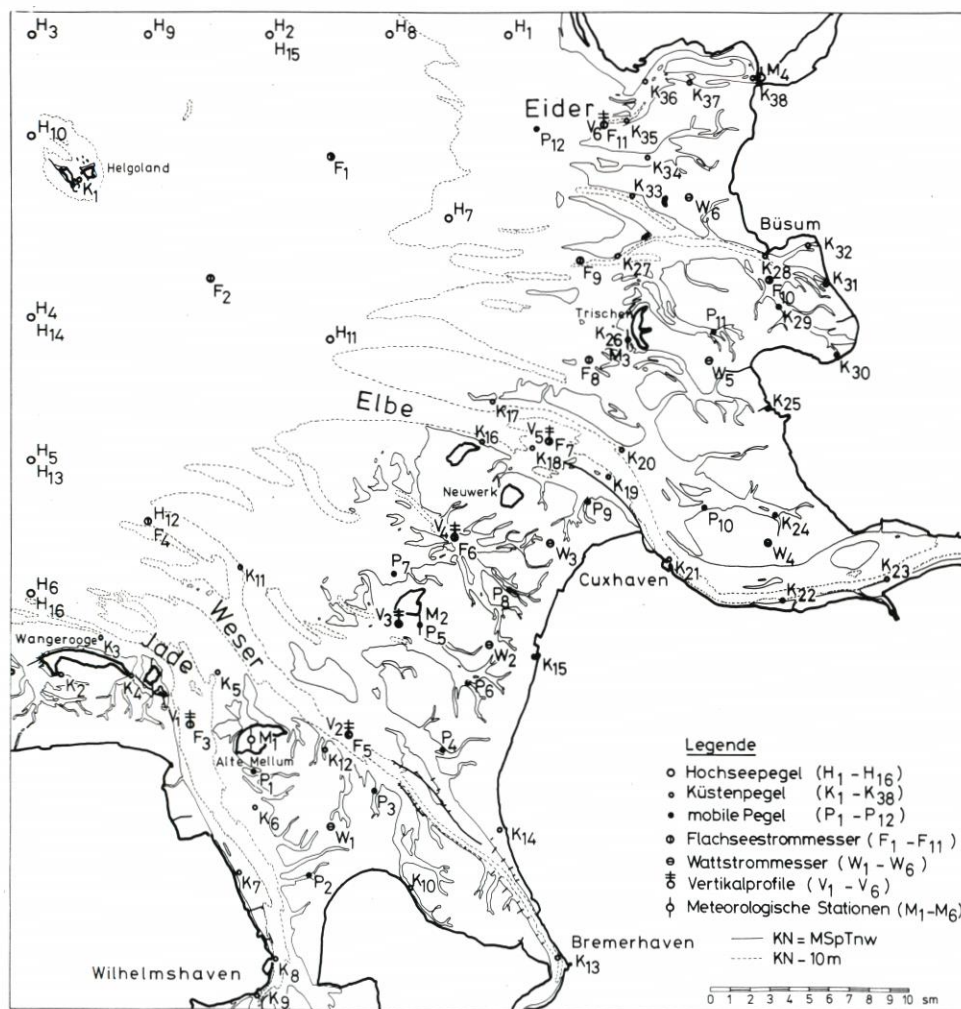


Abb. 1. Meßnetz

2.3 Das Meßnetz (Abb. 1)

Das Meßprogramm war der Funktionsweise des gewählten Modells INDB anzupassen. Ferner war zu bedenken, daß ein Meßnetz zu entwickeln war, das von den beteiligten Dienststellen bewältigt werden konnte.

Von den seeseitigen Rändern des INDB-Modells wurde als Vorgabe zur Steuerung der Modellrechnungen gemessene Wasserstandskurven benötigt. Daher wurden hier insgesamt 13 Hochseepegel ausgelegt. Weitere drei Geräte wurden im Modellgebiet verankert. Die Stationierung erfolgte in Gitterpunkten des Modells, um für die Modellrechnungen möglichst viele gemessene Naturdaten als unmittelbare Eingangswerte zur Verfügung zu haben. Auf der Diagonalen von Wangerooge nach Eiderstedt wurden ebenfalls Hochseepegel ausgelegt. Dadurch sollte ermöglicht werden, das Modell im Bedarfsfall auch von dieser Diagonalen aus

zu steuern, wie es bereits in der Anfangsentwicklung der Modellrechnungen für die Normaltide mit gutem Erfolg ausgeführt wurde (LUCK u. SCHÄFER, 1980).

In Küstennähe und am geschlossenen Rand des zu vergleichenden Modells stehen 38 ständig vorhandene Küstenpegel zur Verfügung. Das Meßnetz wurde durch 12 zusätzlich aufgestellte und eingemessene Schwimmtidepegel verdichtet. Da es sich bei Wasserständen um Parameter mit relativ kleinen örtlichen Unterschieden handelt, waren die Meßpunkte so gewählt, daß eine Interpolation für die Angabe der Wasserstände in den Gitterpunkten des HN-Modells zulässig blieb.

Die stark von der Örtlichkeit bestimmten Tidedrömungen wurden in topographisch sinnvollen, in Natur und Modell gut übereinstimmenden Punkten gemessen, also an Orten, die repräsentativ für ihre weitere Umgebung sind. Im tiefen Wasser vor und in den Ästuaren sowie in den großen Rinnen und auf den Watten wurden insgesamt 17 Strömungsmeßstationen betrieben. Dabei wurden die bewährten Geräte eingesetzt (GÖHREN, 1964; MIESSNER, 1979). An sechs Stationen wurde zusätzlich die Vertikalverteilung der Tidedrömung über jeweils eine Tide mit vier übereinander ausgebrachten Geräten erfaßt, da über den gesamten Testzeitraum nur Punktmessungen ausgeführt werden konnten, die Strömungsgeschwindigkeiten von HN-Modell (über die Tiefe gewichtet) und Natur aber möglichst direkt verglichen werden sollten.

Meteorologische Messungen wurden während DEBEX in verstärktem Maße vorgenommen: Das stationäre Netz des Deutschen Wetterdienstes wurde im Küstenvorfeld um drei Wind- und eine Luftdruckmeßstation erweitert.

2.4 Vorbereitung und Ablauf der Messungen

Da die Meßstationen von den an der Küste ansässigen Dienststellen der Länder Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Hamburg und des Bundes aufgebaut und betreut werden sollten, wurden – soweit möglich – die dort schon vorhandenen Meßgeräte eingesetzt. Zusätzlich wurden zehn neu entwickelte Hochseepegel sowie drei Windmeßgeräte gekauft und betrieben.

Alle Hilfspegel in Küstennähe wurden vor Beginn des Meßzeitraumes genau nach Höhe und Lage eingemessen. Vor dem Abbau wurde die Höhenlage kontrolliert. Eigentümer dieser Pegel sind die an der Küste ansässigen Dienststellen und das KFKI.

In der offenen See wurden die Wasserstandsschwankungen mit Hochseepegeln, die den Druck am Meeresboden messen, registriert. Das Deutsche Hydrographische Institut stellte sechs Pegel der norwegischen Firma Aanderaa zur Verfügung. Diese Geräte (Höhe 510 mm, Durchmesser 128 mm, Gewicht ca. 14 kg) messen in konstant einstellbaren Zeitabständen für kurze Zeit den Druck am Meeresboden und registrieren diesen auf Magnetband. Gesteuert wird das Meßsystem über eine eingebaute Quarzuhr.

Als Geräteträger wurden auf alte Eisenbahnräder geschweißte Eisenkäfige benutzt. Diese wurden über jeweils etwa 100 m lange Grunddrähte mit einem weiteren Eisenbahnrad als Ankerstein für die Markierungstonne mit Radarreflektor und Leuchte verbunden.

Auch die während des Meßprogramms erstmals eingesetzten neuen Hochseepegel der Firma Johne & Reilhofer, die für Wassertiefen von 0 bis 6000 m im Auftrag des BMFT entwickelt worden waren, messen den Gesamtdruck am Meeresboden mit einem Quarz-Druckaufnehmer (WIESE, 1982). Im Gerät (Höhe 710 mm, Durchmesser 220 mm, Gewicht ca. 90 kg) können die Anzahl der Messungen pro Stunde und die Dauer jeder Einzelmessung eingestellt werden. Die Meßwerte werden in Halbleiter-Speichern festgehalten, gesteuert

durch eine Quarzuhr. Die Einsatzdauer hängt von der Integrationszeit bzw. von der Kapazität der Batterien ab und beträgt bis zu 300 Tagen.

Für die Verankerung am Meeresboden wurden spezielle Gestelle aus korrosionsbeständigem Material gebaut, in die die Pegel hineingestellt und festgeschraubt wurden. Diese waren über lange Grunddrähte mit einem schweren Ankerstein und über eine Kette mit einer Leuchttonne verbunden.

Dauermeßstationen zur Aufzeichnung von Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen gibt es im Gebiet des INDB-Modells nicht. Die Erfassung dieser Parameter sollte auf den Watten, in den Rinnen und im tiefen Wasser mit selbstregistrierenden Dauermeßgeräten erfolgen. Die Geräte der Firmen Hydrowerkstätten und Aanderaa wurden je nach Örtlichkeit in verschiedenen Geräteträgern montiert, an den Flachwasserstationen und in den Prielen, zum Teil auch auf dem hohen Watt, vom Schiff aus in korbformigen Geräteträgern mit einer Meßhöhe von 0,3 bis 1,0 m über Grund abgesetzt. Auf den Wattstationen wurden neben diesen hauptsächlich dreifähige, leicht an Ort und Stelle zusammensetzbare Träger verwendet. Beide Gerätetypen registrieren in konstant einstellbaren Zeitabständen (hier 10 Minuten) Strömungsrichtung und -geschwindigkeit auf Magnetband bzw. Film über einen Zeitraum von ungefähr sechs Wochen.

Die Vertikalprofilmessungen wurden mit vier übereinander ausgebrachten Aanderaa-Strömungsmessgeräten vorgenommen. Als Meßhöhen wurden für das unterste Gerät Abstände von 1 m zur Sohle und für das oberste Gerät 2 m bis zur Wasseroberfläche festgelegt. (Abb. 2).

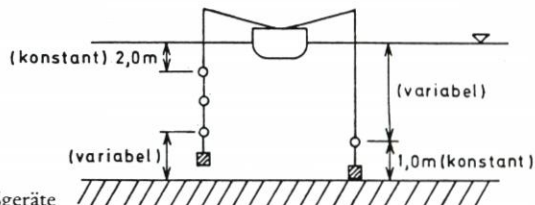


Abb. 2. Vertikalmessung, Anordnung der Meßgeräte

Die beiden anderen Geräte wurden so über die Tiefe verteilt, daß der gegenseitige Abstand aller vier Geräte bei Tidehochwasser etwa gleich war. Um die festgelegte Meßhöhe von 1 m über Grund möglichst gut einzuhalten, mußte entsprechend dem Wasserstand etwa alle zehn Minuten diese Höhe kontrolliert und nachreguliert werden.

Zur Ermittlung des Luftdruckes stehen für die Stationen Norderney, Bremerhaven, Cuxhaven und Helgoland Luftdruckablesungen von Quecksilber-Stationsbarometern bzw. Luftdruckregistrierungen von Aneroid-Barometern zur Verfügung. Auf dem Eidersperrwerk errichtete das Seewetteramt (SWA) eine zusätzliche Station. Durch Mittelwertbildung wurden vom SWA stündlich Luftdruckwerte für das Zentrum des INDB-Modells errechnet. Diese Genauigkeit reichte aus, da die örtlichen Luftdruckunterschiede im Testgebiet klein sind. Zur Gewinnung weiterer Daten wurden die Tonnenleger der WSV und sonstige für DEBEX '81 im Einsatz befindliche Fahrzeuge für die Meßperiode vom SWA mit Aneroid-Barometern ausgerüstet, womit während der Fahrten auf See alle drei Stunden eine Ablesung ausgeführt werden sollte. Das stationäre Netz für Windregistrierungen wurde durch die zusätzlich für DEBEX '81 eingerichteten Stationen Alte Mellum, Knechtsand und Trischen ergänzt (Abb. 1). Sie wurden aus Mitteln des BMFT beschafft.

Die Sensoren der Lichtschranken-Anemometer und der Windrichtungsanzeiger wurden auf mobilen pneumatisch ausfahrbaren 10 m langen Masten montiert. Versorgt wurden die Anlagen mit Batterien.

Die Betreuung der Naturmessungen erfolgte dezentralisiert unter regionaler Verantwortung für übersehbare zusammenhängende Gebiete. Daher wurde das Untersuchungsgebiet in entsprechende Bereiche aufgeteilt. Hiervon unberührt blieb die Betreuung des festen Pegelnetzes, die von den jeweils zuständigen Behörden vorgenommen wurde. Ebenso wurden die meteorologischen Daten für das gesamte Gebiet vom SWA gesondert gesammelt und dann nach der Auswertung unmittelbar an die HN-Gruppe des KFKI weitergegeben.

Der Aufbau der für DEBEX '81 erforderlichen zusätzlichen Geräte, das Einmessen, die Betreuung und der Abbau erfolgten durch die in einem Organisationsplan genannten Dienststellen, die nach eigenem Zeitplan die erforderlichen Arbeiten veranlaßten.

2.5 Praktische Erfahrungen

An den Messungen waren zehn Dienststellen gleichzeitig beteiligt, und etwa 15 Schiffe wurden eingesetzt. So konnten viele Erfahrungen auf dem Gebiet der Organisation gesammelt werden. Absprachen auf dem „kurzen Dienstweg“ waren stets problemlos, und nur die gute Zusammenarbeit aller Beteiligten hat zum Gelingen des Projektes geführt. Man half sich gegenseitig mit Schiffen und Geräten aus und erreichte das gesetzte Ziel trotz knapper gewordener finanzieller Mittel und Einschränkungen im personellen Bereich.

Verschiedene Schwierigkeiten und Ausfälle haben erkennen lassen, daß für derartige Meßprogramme die Stationen doppelt besetzt werden sollten, um bei den später vielleicht festgestellten Abweichungen von Natur und Modell eine Absicherung der Naturmessungen zu ermöglichen. Spätere Interpretationsschwierigkeiten könnten somit auf ein Minimum begrenzt werden. Um Meßfehler möglichst klein zu halten, sollten die Geräte in kurzen Abständen überwacht werden (Überprüfung der Funktionsfähigkeit und Wechseln des Datenträgers). Damit wäre auch eine genaue Registrierung des Naturgeschehens während Sturmperioden – die Geräte können dann nicht betreut werden – gewährleistet.

Um längere durchgehende Zeitreihen der Tidewasserstände im Küstenvorfeld zu erhalten, ist die hier verwendete flache Gründung zum Abstellen der Pegel in Gestellen auf dem Meeresgrund nicht ausreichend. Die Pegel sind während schwerer Stürme mit hohem Seegang zum Teil mehrere Dezimeter abgesackt (ingesandet). Für zukünftige Messungen ist daher eine andere Gründung unumgänglich.

Bei einigen Schwimmerpegeln traten wiederholt Störungen und Ausfälle auf, z. B. durch Reißen des Schwimmerseiles, Stehenbleiben der Uhr, fehlerhafte Schreibfeder, so daß die Auswertung nicht für alle Zeiträume lückenlos erfolgen konnte. Die Fehlzeiten betragen etwa 5 %.

Die Johne & Reilhofer-Hochseepegel haben überwiegend gut funktioniert. Nur ein Pegel ist ganz ausgefallen, drei hatten einige Fehlmessungen, die restlichen sieben Geräte haben einwandfrei gearbeitet. Von den sechs Aanderaa-Hochseepegeln sind zwei verlorengegangen, und zwei haben nicht funktioniert. Der Vergleich der Messungen beider Hochseepegeltypen an einer Position zeigte gute Übereinstimmung.

Die Dauerstrommeßgeräte erfordern durch die vielen sich bewegenden Teile eine intensive Betreuung durch sachverständiges und erfahrenes Personal. Dennoch konnten häufige Störungen nicht ausgeschlossen werden. Es traten sowohl bei den Aanderaa- als auch bei den Hydrowerkstätten-Geräten Fehler in der Richtungs- und Geschwindigkeitsmessung auf. Zwei Geräte gingen ganz verloren, zwei Messungen waren unbrauchbar. Etwa 25 % der Geräte sind ganz oder teilweise ausgefallen.

Auch bei den Windmeßanlagen gab es – bedingt durch den nur einwöchigen Probetrieb

der Anlagen – Störungen, die aber immer sofort wieder behoben werden konnten, so daß die Geräte zufriedenstellend funktioniert haben. In einigen Fällen konnte wegen des schlechten Wetters die geplante zweiwöchige Betreuung der Pegel nicht erfolgen, so daß auf einem Pegelbogen bis zu 50 Tidekurven geschrieben waren. Dies machte eine Digitalisierung unmöglich.

3. Datenerfassung und Datenaufbereitung

3.1 Datenregistrierung

Ein Teil der Naturmeßdaten wurde zur Steuerung des HN-Modells benutzt, der andere Teil wurde zum Vergleich mit den Modellergebnissen herangezogen. Da die Meßgeräte nach verschiedenen Erfassungs- und Speichersystemen arbeiteten, mußten auch die Aufbereitungen nach unterschiedlichen Verfahren vorgenommen werden. Insgesamt waren vier voneinander abweichende Registrierarten eingesetzt. Der Luftdruck, die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung und die Wasserstände an der Küste und an den mobilen Stationen wurden mit Hilfe einer analogen Schreibregistrierung erfaßt. Die Ermittlung der Wasserstände an den seeseitigen Modellrändern erfolgte durch die bewährten Aanderaa-Pegel, die die Meßwerte auf digitalen Magnetbandkassetten speichern, und durch die neuentwickelten BMFT-Pegel, deren Speicher aus Halbleiterelementen bestehen. Aanderaa-Geräte mit Kassettenregistrierung wurden auch zur Messung der Strömung verwendet. Die vierte aufzubereitende Art der Meßwertaufzeichnung war die photographische. Nach dieser Methode arbeiten die Strommesser der Hydrowerkstätten. Die Umsetzung aller Daten auf rechnerkompatible Datenträger erforderte einen erheblichen Aufwand an Auswerte- und Prüfsoftware.

3.2 Meteorologische Parameter

Das HN-Modell benötigt meteorologische Daten in Form von Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Windrichtung zur Steuerung, da die dynamischen Vorgänge in einem Meeresgebiet hierdurch stark beeinflusst werden. Parameter wie Lufttemperatur, Niederschlag und Strahlung werden nicht benötigt.

Für den Zeitraum des Meßprogramms DEBEX stellte das Seewetteramt Hamburg errechnete Zeitreihen des Luftdrucks für vier Punkte und der Komponenten der Windgeschwindigkeit für 20 Punkte in der Inneren Deutschen Bucht zur Verfügung. Grundlage hierfür waren das allgemeine Meßnetz des Deutschen Wetterdienstes und die Daten der zusätzlich aufgestellten Stationen. Die Werte jeder Zeitreihe lagen in stündlichen Abständen auf Magnetband gespeichert vor und konnten so nach geeigneter zeitlicher und räumlicher Interpolation direkt als Steuerwerte für die Modellrechnung verwendet werden.

3.3 Wasserstände

Die kontinuierliche Aufzeichnung der Wasserstände durch die stationären und mobilen Pegel als Kurvenzug erforderte zur rechnerkompatiblen Aufbereitung eine Umsetzung in diskretisierte, digitale Werte. Dies geschah mit Hilfe eines Digitalisierers und eines Elektronenrechners. Beide Geräte wurden von der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz,

Norderney, zur Verfügung gestellt. Die Abspeicherung der Werte der einzelnen Pegelkurven erfolgte in einem Zeitabstand von zehn Minuten mit zusätzlicher Berücksichtigung der Hoch- und Niedrigwasserstände.

Die Daten wurden zunächst auf ein Magnetband gegeben und dann unter Verwendung einer speziellen Umsetzsoftware in den Magnetplattenspeicher des Großrechners Siemens 7.760 der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe eingespeist. Danach erfolgte noch eine

Tabelle 1
Zusammenstellung der Zeiträume der digitalisierten und aufbereiteten Wasserstandsaufzeichnungen der Küstenpegel und mobilen Pegel

	Zeitraum			Bemerkungen
	2.-5. 10.	9.-14. 10.	23.-25. 11.	
Helgoland	14. 9.	13.10 Uhr	– 25. 11.	24.00 Uhr MEZ
Wangerooe N	9. 9.	6.20 Uhr	– 25. 11.	23.20 Uhr MEZ
Bremerhaven	14. 9.	23.00 Uhr	– 25. 11.	24.00 Uhr MEZ
Blauort	11. 9.	13.50 Uhr	– 25. 11.	24.00 Uhr MEZ
Wangerooe W	×	×	×	
Wangerooe O	×	×	×	
Mellumplate	×			Pegelausfall
Voslapp	×	×	×	
Wilhelmshaven 4. E.	×	×	×	
Alte Weser	×	×	×	
Hohe Weg	×	×		Pegelausfall
Scharhörn	×	×	×	
Großer Vogels.	×	×	×	
Cuxhaven	×	×	×	
Otterndorf				Pegelausfall, Pegeluhr stand
Osteriff	×	×	×	
Bullenloch	×		×	Pegelausfall
Friedrichskoog-Hafen	×	×	×	
Trischen-W	×	×	×	
Tertiussand	×		ab 24.11. 14.20 h	Pegelausfall, Schwimbernadelabriß
Büsum	×	×	×	
Steertloch	×	×		Pegelabbau 5. 11.
Speicherkoog N	×	×		Pegelausfall
Wesselburener Loch	×	bis 11.10. 24.00 h		Pegelausfall
Linnenplate	×	×		Pegelabbau 12. 11.
Eidersperrwerk	×	×	×	
Mellumbalje	×	×	×	
Sengwarder	×	×		Pegelausfall, Pegeluhr stand
Südbalje				
Hundebalje	×	×	×	
Wurster Arm	×			Pegelausfall
Robinsbalje	×	×		Pegelausfall ab 4. 11.
Dorumer Tief	×	×		Pegelabbau 16. 11.
Knechtsand	×	×		Pegelabbau 17. 11.
Sahlenburg. Tief	×	×		Pegelabbau 17. 11.
Buchtloch	×	×		Pegelabbau 16. 11.
Außeneider	×			Pegelausfall
Hohe Weg Watt	×		×	Pegelausfall, Abriß des Schwimmerseils

×: Messungen liegen vor

Überprüfung auf Plausibilität und offensichtliche Meß- bzw. Ablese- oder Übertragungsfehler. So konnte es z. B. passieren, daß beim Digitalisieren hinter Kurvenschnittpunkten oder nach dem Pegelbogenende ein falscher Kurvenast abgefahren wurde. Auch der einheitliche Zeitbezug, bedingt durch den Wechsel von Sommer- auf Winterzeit Ende September, erforderte besondere Aufmerksamkeit.

Trotz des hohen Zeitaufwandes wurden die Pegelkurven von Helgoland, Wangeroog-Nord, Blauort und Bremerhaven für die gesamte DEBEX-Meßperiode digitalisiert, um eine Absicherung der Hochseepegelmessungen zu gewährleisten. Eine Zusammenstellung und Angaben über Zeitpunkt, Dauer und festgestellte Ursachen von Ausfällen der übrigen Pegelregistrierungen finden sich in Tab. 1. Von den vier geborgenen Aanderaa-Hochseepegeln enthielten nur zwei Kassetten verwertbare Aufzeichnungen (Tab. 2). Diese Geräte wurden

Tabelle 2
Zeiträume der Auslegung der Hochseepegel

H1	Gerät nicht gefunden	
H2	Registrierung unbrauchbar	
H3	14. 9. 81-28. 12. 81	
H4	Registrierung unbrauchbar	
H5	8. 9. 81-23. 12. 81	
H6	Gerät nicht gefunden	
H7	Registrierung unbrauchbar	
H8	22. 9. 81-19. 11. 81	
H9	22. 9. 81-19. 11. 81	
H10	22. 9. 81-19. 11. 81	
H11		} nicht ausgewertet
H12		
H13	29. 9. 81- 2. 12. 81	
H14	23. 9. 81- 2. 12. 81	
H15	22. 9. 81- 2. 12. 81	} Niedrigwasser teilweise verzerrt
H16	24. 9. 81- 2. 12. 81	

erst so spät gefunden, daß die Meßwerte nur teilweise als Steuerdaten für die Modellrechnung verwendet werden konnten. So wurden die Werte des Pegels H3 nur zur Simulation der sehr schweren Sturmflut vom 24. November 1981 herangezogen. Die Position des Pegels H5 war auch mit dem BMFT-Pegel H13 besetzt, so daß ein Vergleich der Registrierungen beider eingesetzter Systeme möglich war. Abb. 3 zeigt diese Gegenüberstellung für den Zeitraum vom 11. 10. bis 13. 10. 1981.

Die Umrechnung der von den Aanderaa-Pegeln gemessenen Druckdaten in Wasserstandsdaten übernahm das DHI. Die dabei erzeugten Zeitreihen mit einem Meßwertabstand von zehn Minuten wurden auf Magnetband gespeichert und zur Weiterverarbeitung an die BAW in Karlsruhe gegeben. Diese Aufbereitung bestand noch in der Berücksichtigung des zeitlich veränderlichen Luftdrucks und in der Beseitigung von offensichtlichen Meßfehlern.

Der Bearbeitungsweg für die Daten aus den BMFT-Pegeln verlief etwas anders. Nach dem Bergen der Geräte wurden die gesammelten Daten in der BAW-AK in Hamburg mit Hilfe einer PEDS-Einheit und einem angeschlossenen Tischrechner (HP 85) aus den Halbleiterspeichern ausgelesen und auf Minikassetten überspielt. Dabei konnte schon eine grobe Sichtung vorgenommen werden. Diese ergab, daß die Meßwerte des Pegels H7 gar nicht und die von H11, H15 und H16 nur teilweise auszuwerten und zu interpretieren waren. Eine Ursache der fehlerhaften Registrierung ließ sich bisher noch nicht ermitteln. Die fertige

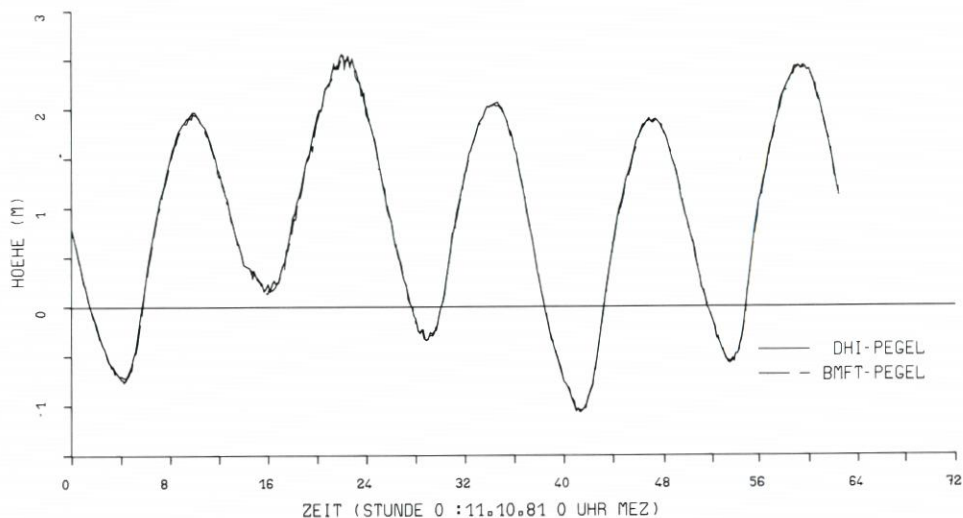


Abb. 3. Vergleich DHI - BMFT-Pegel

beschriebenen Kassetten wurden dann in den Plattenspeicher des BAW-Großrechners in Karlsruhe eingelesen. Bei einer graphischen Darstellung des gesamten Meßzeitraumes wurde erkennbar, daß sich das Bezugsniveau der einzelnen Geräte wegen meteorologischer und hydrologisch-morphologischer Einflüsse durchaus unterschiedlich verändern konnte, worauf noch eingegangen wird.

3.4 Stromgeschwindigkeiten

Die beiden Meßgerätetypen für die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit unterscheiden sich nicht nur in der Bauart; sie haben auch verschiedene Registriertechniken, die entsprechend andere Auswertemethoden erfordern.

Die Aanderaa-Strommesser speichern neben dem Betrag und der Richtung der Geschwindigkeiten auch die Temperatur sowie die elektrische Leitfähigkeit in einer Magnetbandkassette. Beim WSA Cuxhaven ist ein Programm vorhanden, mit dem die Daten dieser Kassette gesichtet und aufbereitet werden können (MIESSNER, 1979). Diese Arbeit wurde mit Hilfe eines speziell programmierten Tischrechners und einer angeschlossenen Ploteinheit bewältigt.

Nach der Übertragung der Meßwerte von den Kassetten auf den Plattenspeicher des BAW-Großrechners war aus technischen Gründen ein zusätzlicher Arbeitsgang erforderlich. Für das Zeichenprogramm, über das der graphische Vergleich zwischen Naturmessung und Modellrechnung erstellt wurde, mußten die Daten als in Form und Inhalt einheitliche Zeitreihen vorliegen. Daher wurden die Daten der gewählten Zeiträume an einem Sichtgerät zunächst einer Kontrolle und dann einer „manuellen“ Anpassung unterzogen, so daß ein glatter Kurvenverlauf in allen Meßgrößen entstand. Dieser Eingriff bezog sich durchschnittlich auf jeden zehnten Meßwert.

Die auf einem photographischen Film festgehaltenen Meßwerte der Hydrowerkstätten-Strommesser wurden bei der BAW-AK aufbereitet. Die automatische Ablesung der Filme, die durch den verwendeten Code bedingte Diskretisierung der Meßwerte und deren Genauigkeit

sind von SIEFERT et al. (1980) beschrieben worden. Die Korrektur der Ablesefehler, die ihre Ursache in einer unzureichenden oder ungleichmäßigen Filmbelichtung hatten, konnte aufgrund eines Erstausdrucks vorgenommen werden. Die so bearbeiteten Werte wurden dann, nach benötigten Zeiträumen getrennt, in gesonderte Dateien überschrieben, wo sie für den Vergleich mit den Modellrechnungen zur Verfügung standen.

In Tab. 3 sind alle Zeiträume der Strömungsmessungen zusammengestellt, die für den Vergleich mit den Modellergebnissen aufbereitet worden sind.

Tabelle 3
Ausgewertete und verglichene Zeiträume der Geschwindigkeitsmesser

	2.-5. 10.	9.-14. 10.	23.-25. 11.
F1	×	×	×
F2	×	×	×
F3	unbrauchbare Aufzeichnung		
F4	Messung unbrauchbar		Gerät verloren
F5	×	×	Gerät eingezogen
F6	nur B	nur B	Gerät eingezogen
F7	×	×	Gerät eingezogen
F8	×	unbrauchbar	nur R
F9	×	×	Gerät eingezogen
F10	unbrauchbare Aufzeichnung		Gerät verloren
F11	×	×	Gerät eingezogen
W1	×	×	nur R
W2	×	×	Gerät abgebaut
W3	×	×	Gerät abgebaut
W4	×	×	×
W5	×	Gerät nicht aufgebaut	
W6	×	Gerät nicht aufgebaut	

B: Betrag der Strömung

R: Richtung der Strömung

Die Vertikalprofilmessungen wurden alle mit je vier Aanderaa-Geräten vorgenommen. Der Ablauf der einzelnen Auswerteschritte vollzog sich in der bereits beschriebenen Reihenfolge. Die Messungen erfolgten an verschiedenen Terminen und umfaßten etwa eine Tide. Nur an Station V3 lagen die Geräte über drei Tiden mit einer Unterbrechung von ungefähr 1,5 Stunden aus (Tab. 4).

Tabelle 4
Zeiträume der Vertikalprofilmessungen mit je 4 Aanderaa-Geräten

V1	15. 10.	7.00-20.00 Uhr	alle Aufzeichnungen fehlerhaft
V2	29. 09.	7.40-20.40 Uhr	
V3	28./30. 09.	18.00/ 8.00 Uhr	keine Messung am Boden
V4	15./16. 10.	18.40/10.10 Uhr	keine Messung an der Oberfläche
V5	29. 09.	7.00-22.00 Uhr	
V6	19. 10.	10.10-16.40 Uhr	keine Messung in 1/3 Höhe

4. Vergleich Natur - Modell

4.1 Das HN-Modell INDB

Das zweidimensionale numerische Modell für die Innere Deutsche Bucht basiert auf den hydrodynamischen Differentialgleichungen, die mit einem expliziten Differenzenverfahren (HANSEN, 1956) gelöst werden. Dieses Modell gehört zu dem KFKI-Modellsystem für die Küsten der Deutschen Bucht, das bereits beschrieben worden ist (HN-Gruppe, 1983). Der Ortsschritt beträgt etwa eine Seemeile (= 1852 m) und der Zeitschritt 50 Sekunden.

Das Trockenfallen und Überfluten der Wattflächen wird im Modell durch bewegliche Ränder simuliert, die sich mit der Verlagerung der Wasserlinie ändern. Ein Wassertransport von einem Gitterpunkt zum anderen wird hierbei nur zugelassen, wenn der Wasserspiegel oberhalb des Wattniveaus liegt. Bei tiefer liegendem Wasserspiegel bildet die jeweilige Wasserlinie einen geschlossenen Rand, über den hinweg kein Wassertransport erfolgen kann (BECKMANN, 1981).

4.2 Modellrechnungen

Aus den während des Meßzeitraumes von DEBEX '81 registrierten rund 100 Tiden wurden Zeiträume ausgewählt, in denen die verschiedenen Typen der Tiden ausgeprägt auftraten und für die dann eine Modellrechnung mit anschließendem Naturvergleich vorgenommen wurde. Den Rechnungen für die Vergleichszeiträume wurden jeweils zwei Einschwingtiden vorgeschaltet.

Gezeitenverhältnisse mit geringem meteorologischen Einfluß herrschten am 2./3. Oktober 1981. Der Wind wehte am 2. 10. von Mittag bis Mitternacht mit 1 Bft aus Südost, später mit 3 Bft, ab 3. 10. morgens aus Süd 4 bis 5 Bft.

Erniedrigte Tiden traten in der Deutschen Bucht bei Winden aus östlichen Richtungen auf. Am 3. 10. 1981 trat das zweite Niedrigwasser am Pegel Cuxhaven rund 50 cm niedriger als vorhergesagt (Gezeitentafel) ein. Anschließend, am 4. 10. 1981, drehte der Wind plötzlich von Süd mit 5 Bft auf West mit 6 bis 7 Bft, wodurch sich der Tidenfall in Cuxhaven auf 1,86 m verringerte (vorhergesagt: 2,80 m).

Die drei Typen, Normaltide, erniedrigte Tide und Tide bei starker Winddrehung, sind im Vergleichszeitraum vom 2. 10. 1981 bis 5. 10. 1981, 14.00 MEZ, enthalten.

Für den Typ erhöhte Tiden bzw. leichte Sturmfluten wurde der Vergleichszeitraum vom 9. 10. 1981, 13.00 MEZ, bis 14. 10. 1981, 24.00 MEZ, ausgewählt. Für diesen Zeitraum wurde auch eine Modellrechnung ohne Berücksichtigung des Windschubes an der Wasseroberfläche ausgeführt, um die Wirkung des lokalen Windes zu untersuchen.

Durch wetterbedingte Verzögerungen beim Einholen der Meßgeräte lagen während der Sturmflut am 24. November 1981 noch einige Hochseepiegel auf dem Rand des INDB-Modells aus, so daß erstmals die Möglichkeit bestand, eine Sturmflut mit Werten des offenen Randes modellmäßig zu behandeln. Diese schwere Sturmflut erreichte am Pegel Hamburg-St. Pauli mit NN + 5,81 m den zweithöchsten je gemessenen Wasserstand. Die Berechnung der Sturmflut vom 24. November 1981 erfolgte für die Zeit vom 23. 11. 1981, 16.00 MEZ, bis 25. 11. 1981, 24.00 MEZ.

4.3 Modellsteuerung

4.3.1 Wasserstände an den offenen Rändern

Auf den offenen Rändern des Modells (Seeränder, Flußmündungen) werden Wasserstände vorgegeben (Abb. 1). Die mit den Hochseepegeln erfaßten Daten sind Druckwerte am Meeresboden. Durch Berücksichtigung der Dichte der Wassersäule und des zeitlich veränderlichen Luftdruckes an der Wasseroberfläche werden die Druckkurven in Wasserstandskurven umgerechnet. Die Umrechnung erfolgte unter der Annahme einer mittleren Dichte von 1023 kg/m^3 und der Verwendung von stündlichen Luftdruckwerten, die vom Seewetteramt Hamburg anhand von Messungen berechnet wurden.

Die aus den Druckaufzeichnungen der Hochseepegel errechneten Wasserstandswerte mußten für die Modellsteuerung noch auf ein einheitliches Referenzniveau bezogen werden, das mit Hilfe der Aufzeichnungen der drei Küstenpegel Wangerooge, Helgoland und Blauort bestimmt wurde, deren Höhenlage bekannt ist. Der Höhenanschluß der übrigen Hochseepegel erfolgte durch Mittelwertbildung der Wasserstände gleicher Tideabschnitte und der Annahme einer linearen Verteilung des mittleren Windstaus zwischen Wangerooge-Nord und Helgoland sowie zwischen Helgoland und Blauort. Der mittlere Windstau ist hier definiert als Differenz des mittleren Wasserstandes über einen bestimmten Zeitabschnitt und der entsprechenden Höhenlage des mittleren Wasserstandes der Normaltide. Die auf dem Westrand des INDB-Modells zwischen Wangerooge-Nord und Helgoland „eingepaßten“ Hochsee-Pegelmessungen H10, H13 und H14 sind in Abb. 4 für eine Tide am 2. Oktober 1981 dargestellt. An den Flußmündungen der Weser und Elbe wurden die gemessenen Wasserstände der Pegel Bremerhaven und Osterriff vorgegeben.

4.3.2 Windschub an der Wasseroberfläche

Vom Seewetteramt Hamburg zur Verfügung gestellte Zeitreihen der stündlichen Windkomponenten in 20 Punkten der Inneren Deutschen Bucht (Abb. 5) bildeten die Basis für die Berechnung des Windschubes an der Meeresoberfläche für jeden wasserführenden Punkt. Diese stündlichen Windfelder wurden auf der Grundlage des allgemeinen Meßnetzes des Deutschen Wetterdienstes erstellt, das während des Meßzeitraumes von DEBEX '81 durch zusätzliche meteorologische Meßstationen verdichtet wurde.

4.4 Ergebnisse des Vergleichs

Für den Vergleich der Modellergebnisse mit Naturmessungen wurden die Wasserstände durch 16 Hochseepegel, 38 Küstenpegel und 12 mobile Pegel registriert. Die Strömungen wurden durch 11 Flachsee-Strommesser, 6 Wattstrommesser und durch 6 Vertikalprofilmessungen erfaßt (Abb. 1). Eine Zusammenstellung der verwendbaren Aufzeichnungszeiträume an den Meßstationen ist in den Tabellen 1 bis 4 enthalten.

4.4.1 Wasserstände

Die gemessenen und errechneten Wasserstände für die Vergleichszeiträume sind für ausgewählte Pegel in Ganglinienform in den Abbildungen 6 bis 18 und 21 bis 30 dargestellt.

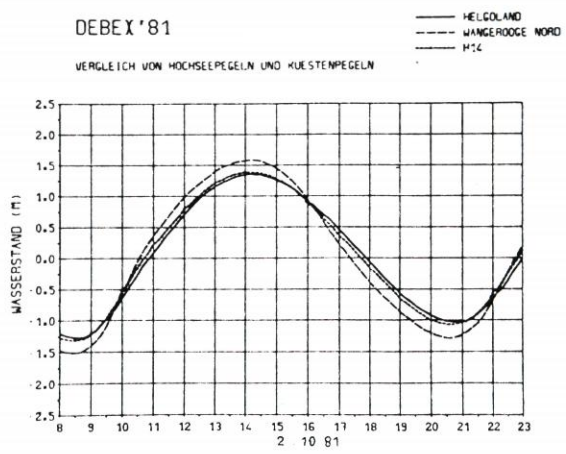
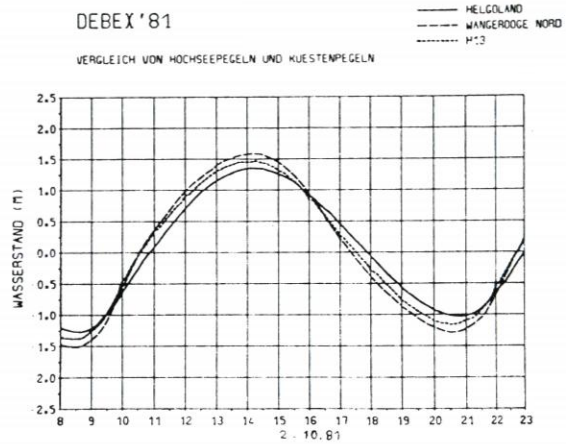
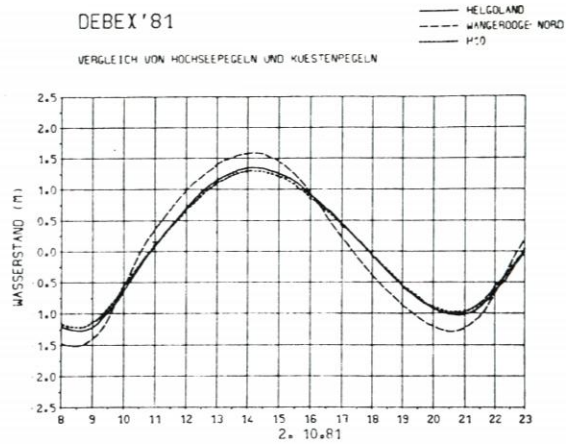


Abb. 4. „Eingepaßte“ Hochseepegelmessungen am Westrand des Modells

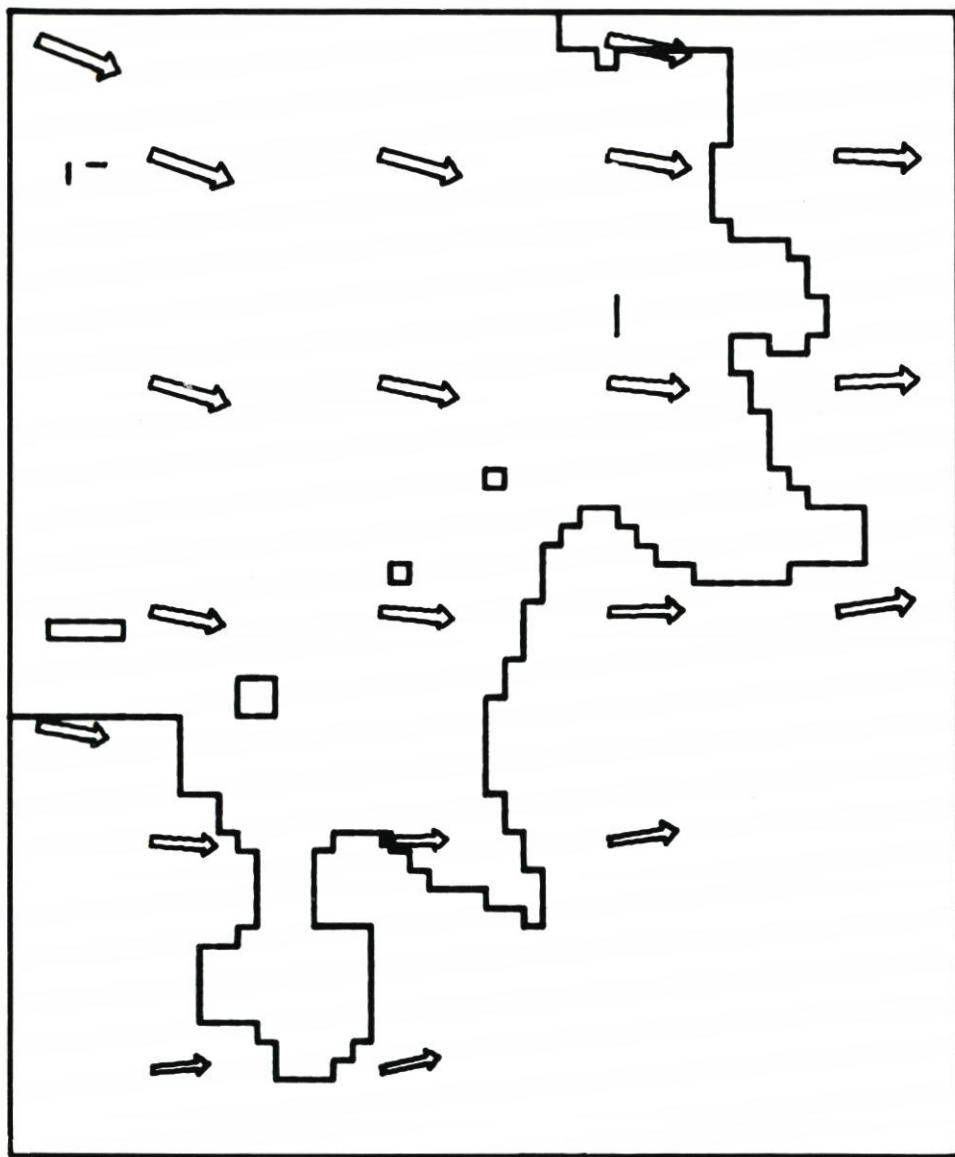


Abb. 5. Windverteilung in der Inneren Deutschen Bucht am 24. 11. 1981, 14.00 (nach SWA)

Für den Zeitraum vom 2. 10. bis 5. 10. 1981, der die Typen Normaltide, erniedrigte Tide und Tide bei starker Winddrehung enthält, läßt sich eine im allgemeinen gute Übereinstimmung der Scheitelwerte in Höhe und Zeit feststellen (Abb. 6 bis 10). Nur bei den Pegeln vor der Dithmarscher Küste und bei den Pegeln an schmalen Rinnen sind größere Abweichungen in den Eintrittszeiten der Niedrigwasser erkennbar. Dies dürfte an dem besonders bei tieferen Wasserständen sich bemerkbar machenden erschöpften Auflösungsvermögen des Modellgitters für die vorhandenen Bodenstrukturen liegen. Durch Verfeinerung des Gitters in solchen

Gebieten, wie es für die Lokalm Modelle vorgesehen ist, können diese Differenzen sicherlich verringert werden.

Bei erhöhten Wasserständen, die im Vergleichszeitraum vom 9. 10. bis 14. 10. 1981 auftraten (Abb. 11 bis 18), gewinnt die richtige Erfassung der Windwirkung an der Wasseroberfläche für die Reproduktionsgüte der Bewegungsvorgänge an Bedeutung. Andererseits können an das Auflösungsvermögen des Modellgitters geringere Anforderungen gestellt werden. Dies ist beim Vergleich der Abbildungen 9 und 17 bei den Eintrittszeiten der erhöhten Niedrigwasser erkennbar.

Die Wirkung des lokalen Windes sei durch zwei Modellrechnungen anhand der Pegel Wilhelmshaven 1. Einfahrt (K9) und Eidersperrwerk Außenpegel (K38) aufgezeigt (Abb. 19 u. 20). Die Rechnung für den Zeitraum vom 9. 10. bis 14. 10. 1981 wurde zum einen mit und zum anderen ohne Berücksichtigung des Windschubes an der Wasseroberfläche ausgeführt. In den Abbildungen 11 bis 18 sind die Ergebnisse mit den Messungen verglichen. Es zeigt sich z. B., daß durch Berücksichtigung des lokalen Windes am Pegel Wilhelmshaven 4. Einfahrt (K8) das zweite Hochwasser verspätet und etwas erniedrigt eintritt, während am Pegel Eidersperrwerk Außenpegel (K38) das zweite Hochwasser um mehr als 50 cm erhöht wird. Diese Untersuchung läßt erkennen, welche große Bedeutung dem meteorologischen Input für die Modellrechnung von Sturmfluten zukommt.

Der Vergleich der gemessenen und berechneten Wasserstände der Sturmflut vom 24. November 1981 (Abb. 21 bis 30) stellt überzeugend die hohe Leistungsfähigkeit des HN-Modells für Sturmflutuntersuchungen dar. Insbesondere wird die Möglichkeit erschlossen, durch Variation der meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen fundierte Aussagen über die räumliche Verteilung der Wasserstandsänderungen zu erhalten und durch Kombination ungünstiger Ereignisse die örtliche Verteilung hoher Wasserstände herauszuarbeiten.

4.4.2 Strömungen

In den Abbildungen 31 bis 46 sind die Ganglinien der gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten an einigen Stationen für die Vergleichszeiträume gegenübergestellt. Da beim Vergleich der Strömungen zu berücksichtigen ist, daß die gemessenen Geschwindigkeiten Punktmessungen, die berechneten aber die mittleren Geschwindigkeiten in einer Wassersäule mit der Grundfläche einer Masche des Rechengitters sind, sind für einige Meßstationen, an denen auch Vertikalprofile gemessen wurden, die gewonnenen Strömungsganglinien in vier Tiefenhorizonten mit dargestellt. Es ist allerdings zu beachten, daß die Vertikalprofilmessungen, die etwa eine Tideperiode erfassen, nicht innerhalb der Vergleichszeiträume liegen.

Der Strömungsvergleich für eine Normaltide, eine erniedrigte Tide und eine Tide bei starker Winddrehung ist in den Abbildungen 31 bis 36 für den Zeitraum vom 2. 10. bis 5. 10. 1981 vorgenommen. Im tiefen Wasser (Stationen F1 und F2) stimmen die gemessenen und errechneten Geschwindigkeiten und Richtungen gut überein. Abweichungen sind darin begründet, daß die Strömung in Bodennähe gemessen wurde, wo durch Bodenreibung im allgemeinen geringere als über die Vertikale gemittelte Geschwindigkeiten auftreten. Besonders bemerkenswert ist die Übereinstimmung im Verhältnis des Flutstroms zum Ebbstrom. Das Auflösungsvermögen des Modells für die topographischen und hydrodynamischen Verhältnisse ist offensichtlich auch für hohe Ansprüche voll ausreichend. In den tiefen Rinnen der Weser und Elbe (Stationen F5 und F7) wird die Strömung stark durch die Bodenstrukturen geprägt, wodurch höhere Anforderungen an das Auflösungsvermögen des Modells gestellt

werden. Da bei der Diskretisierung der Tiefen der Verlauf der Rinnen im Modellraster berücksichtigt werden muß, können örtliche Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Strömungsrichtungen auftreten, wie dies bei der Station F5 der Fall ist. Es können die in Bodennähe gemessenen Geschwindigkeiten größer sein, als die über die Maschenweite (Gitterabstand) gemittelten. Mit Einbeziehung der in den Abbildungen 33 und 34 dargestellten Vertikalprofilmessungen an den Stationen F5 (V2) und F7 (V5) kann auch hier in den tiefen Rinnen gute Übereinstimmung festgestellt werden. An den Strömungsmeßstationen auf dem Watt (W1 und W3) fällt der Vergleich zufriedenstellend aus. Die gegenüber der Rechnung kürzere Überflutungszeit bei der Messung ist durch die Gerätehöhe über dem Wattboden bedingt.

Die Strömungen bei erhöhten Tiden, wie sie für den Zeitraum vom 9. 10. bis 14. 10. 81 an den Stationen F1, F2, F5, F7, W1 und W3 berechnet bzw. gemessen wurden, sind in den Abbildungen 37 bis 42 dargestellt. Sie zeigen, daß das Modell die Strömungsverhältnisse in der Natur in ihrem charakteristischen Verlauf durchaus zufriedenstellend wiedergeben kann.

Während der schweren Sturmflut am 24. November 1981 lagen nur noch wenige Geräte in ihren Positionen und lieferten brauchbare Aufzeichnungen. Die Abbildungen 43 bis 46 zeigen die Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Strömungen für die Zeit vom 23. 11. bis 25. 11. 1981 an den Stationen F1, F2, F8 und W4.

In den Abbildungen 47 bis 51 wird ein Überblick der berechneten Strömungsverteilung in der Inneren Deutschen Bucht für verschiedene Tidephasen während einer Normaltide (2. 10. 81) gegeben. Um 13.00 Uhr (Abb. 47) herrscht in der gesamten Inneren Deutschen Bucht Flutstrom. Drei Stunden später, um 16.00 Uhr (Abb. 48), hat der Ebbstrom im seewärtigen Bereich und in der Jade eingesetzt, während in der Weser bei Bremerhaven und im Elbeästuar das Wasser noch aufläuft. Es strömt von der Jade über den Rücken des Hohen Weges in die Weser. Um 19.00 Uhr (Abb. 49) herrscht überall Ebbstrom. Um 21.00 Uhr (Abb. 50), zur Zeit des Niedrigwassers, sind große Wattflächen trockengefallen. Um 22.00 Uhr (Abb. 51) setzt dann erneut vom Westrand her der Flutstrom ein.

5. Zusammenfassende Beurteilung

Die im vorherigen Abschnitt für eine Reihe von Vergleichen dargestellte gute Übereinstimmung von Naturmessung und HN-Rechnung berechtigt zu der Aussage, daß das hier entwickelte HN-Modell zur Berechnung von Wasserständen und Strömungsgeschwindigkeiten auch bei einer Sturmflut gut geeignet ist. Die HN-Rechnung führt zu Lösungen, die sich von den gemessenen Ganglinien der Wasserstände und der Strömungsgeschwindigkeiten nur wenig unterscheiden. Dies gilt insbesondere für die Wasserstände. Die Abweichungen von gemessenen und gerechneten Ganglinien können verschiedene Ursachen haben, die von Fall zu Fall gesondert zu ergründen sind.

In der Nähe der Einsteuerung und im tiefen Wasser werden für die Zeit vom 2. 10. bis 5. 10. 1981 – Normaltide, erniedrigte Tide und Tide mit Winddrehung – sowie für die leichte Sturmflut vom 9. 10. bis 14. 10. 1981 für Wasserstand und Strömung sehr gute Ergebnisse erzielt. Auch die Sturmflut vom 24. 10. 1981 zeigt für die Wasserstände sehr gute Ergebnisse im tiefen Wasser. Diese gute Übereinstimmung auch in der Nähe des Wattgebietes läßt auf gute Ergebnisse in den Wattflächen schließen.

Es ist somit festzustellen, daß im tiefen Wasser und an den Einsteuerrändern das Modell naturähnlich ist. – Im Wattgebiet zeigt der Vergleich der Wasserstände für die Normaltide als auch für die leichte sowie die schwere Sturmflut erstaunliche Ergebnisse: Es ist teilweise kein

Unterschied zwischen gemessener und berechneter Kurve festzustellen. Die Ganglinien der Strömungsbeträge zeigen im Wattgebiet befriedigende Übereinstimmungen. Es zeigt sich z. B., daß die berechneten Ganglinien der Strömungsgeschwindigkeiten im allgemeinen etwas höher liegen als die gemessenen. Das ist auch richtig, da die Meßgeräte die Strömungsgeschwindigkeit am Boden messen, während das HN-Modell eine über die Tiefe gemittelte Geschwindigkeit liefert, die im allgemeinen höher ist als der Naturmeßwert. Der Vergleich der Richtungen führt zu weniger guten Ergebnissen, weil sie – je nach Lage des Meßgerätes – von Natur aus ziemlich instabil sind. Wird die Ganglinie der in der Natur gemessenen Richtungen geglättet, so stimmt diese dann gut mit der errechneten überein. Bei der Sturmflut konnte nur der Wattstrommesser W4 zum Vergleich herangezogen werden.

Selbst im Wattengebiet, wo das Modell nur eine geringe Auflösung hat, zeigt sich bei Normaltide und bei der leichten Sturmflut eine gute Übereinstimmung der Wasserstände und eine befriedigende der Strömungen. Hier bewährt sich die genaue und überlegte Darstellung der Morphologie im HN-Modell.

Inbesondere die Stromkarten zeigen auf, daß das Modell zumindest bezüglich der inneren Logik naturähnlich ist. Quantitativ läßt sich zu den Stromkarten wenig sagen, da nicht in allen oder mindestens annähernd allen Gitterpunkten des Modells die Strömung gemessen werden konnte.

Insgesamt ist festzustellen, daß es gelungen ist, für eine Normaltide, erniedrigte Tide sowie eine leichte Sturmflut die Wasserstände und Strömungen mit guter bis sehr guter Genauigkeit durch ein HN-Modell zu berechnen. Die guten Ergebnisse lassen vermuten, daß sich auch mit den beiden anderen Regionalmodellen – Ostfriesisches Wattenmeer und Nordfriesland sowie dem Basismodell Deutsche Bucht – ähnlich gute Ergebnisse erzielen lassen. Damit steht ein Modellsystem für die Deutsche Bucht zur Verfügung, mit dem z. B. Vorhaben von Wasserbauverwaltungen behandelt werden können.

Durch das Meßprogramm DEBEX steht erstmalig ein großes Kollektiv von Wasserstands- und Strömungsdaten für eine Normaltide, leichte Sturmflut und – mit Einschränkungen – auch für eine schwere Sturmflut in einem größeren Gebiet innerhalb der Deutschen Bucht zur Verfügung. Diese wertvolle Ansammlung von Daten kann für verschiedene Zwecke weiterverarbeitet werden. Die auf dem Rand des Gebietes liegenden Hochseepegel H1 bis H16 könnten z. B. weiterhin zur Steuerung für eine konkrete Anwendung sowie zur Weiterentwicklung des HN-Modells benutzt werden.

Für Aufgaben innerhalb der Wattengebiete sind allerdings gegenüber den Regionalmodellen feiner strukturierte Lokalmodelle erforderlich. Zur Steuerung, Überprüfung und Entwicklung solcher Lokalmodelle können die von den mobilen Pegeln P1 bis P12 und den Wattstrommessern W1 bis W16 gelieferten Daten, als auch diejenigen in den verschiedenen Dienststellen der Wasserbauverwaltungen des Bundes und der Länder mitverwandt werden.

Im Programm DEBEX '81 konnte nachgewiesen werden, daß die hydrodynamischen Vorgänge mit HN-Modellen gut erfaßt werden können. Diese Feststellung ermutigt dazu, bei Bauvorhaben im Seegebiet, aber auch für grundsätzliche Untersuchungen im Zusammenhang etwa mit der Tidephysik, der Ausbreitung von Schadstoffen sowie zur Ergänzung übergeordneter morphologischer Vorgänge, sich stärker als bisher dieses Verfahrens zu bedienen. Die Güte der KFKI-Modellfamilie sollte Veranlassung geben, sie – dem wissenschaftlichen Fortschritt folgend und mit Berücksichtigung möglicher Änderung der Randbedingungen – auf dem jeweils gültigen Stand zu halten. Die im Zusammenhang mit der Entwicklung der Modelle und mit DEBEX gewonnenen Erfahrungen, die im einzelnen darzustellen den Rahmen dieser Arbeit gesprengt haben würde, werden auch bei anderen Modellen befruchtend wirken können. Wenn auch die Modelle bisher für konkrete Aufgaben möglicher

Anwender noch nicht genutzt worden sind, so haben sie schon jetzt neue Einblicke in die Naturvorgänge der Deutschen Bucht erbracht.

6. Schriftenverzeichnis

- BECKMANN, M.: Numerical Modelling of Shallow Water Areas. Mitt. d. Institut f. Meereskunde d. Universität Hamburg, 26, 1981.
- BECKMANN, M.: HN-Modellrechnungen zum Naturmeßprogramm DEBEX '81. INTERMARITEC, Hamburg, 1982.
- GÖHREN, H.: Ein neues Dauerstromgerät für den Einsatz im Flachwasserbereich. Kurzbericht, Die Wasserwirtschaft, H. 8, 1964.
- HANSEN, W.: Theorie zur Errechnung des Wasserstandes und der Strömungen in Randmeeren nebst Anwendungen. Tellus. Vol. 8, 3, 1956.
- HN-Gruppe: Die numerischen Küstenmodelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die Deutsche Bucht. – Abschlußbericht der Projektgruppe HN-Modelle des KFKI. Die Küste, H. 38, 1983.
- LUCK, G. u. SCHÄFER, P.: Hydrodynamisch-numerische Modelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI). Die Küste, H. 35, 1980.
- MIESSNER, F.: Fortschritte beim Messen und Auswerten gewässerkundlicher Daten. Kurzbericht, DGM, H. 1, 1979.
- ROHDE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI. Die Küste, H. 34, 1979.
- ROHDE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI 1979 und 1981. Die Küste, H. 37, 1982.
- SIEFERT, W., FAHSE, H., MIESSNER, F., RICHTER, H.-H., TAUBERT, A. u. WIELAND, P.: Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins. Die Küste, H. 35, 1980.
- WIESE, H.-W.: Messungen der Wasserstände in der Deutschen Bucht während DEBEX '81 – Erste Ergebnisse mit neuen Hochseepegeln. INTERMARITEC, Hamburg, 1982.
- WIESE, H.-W.: DEBEX '81 – Ein Meßprogramm zur Überprüfung der Naturähnlichkeit des HN-Modells „Innere Deutsche Bucht“ des KFKI. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1981, Bd. XXXIII, 1983.

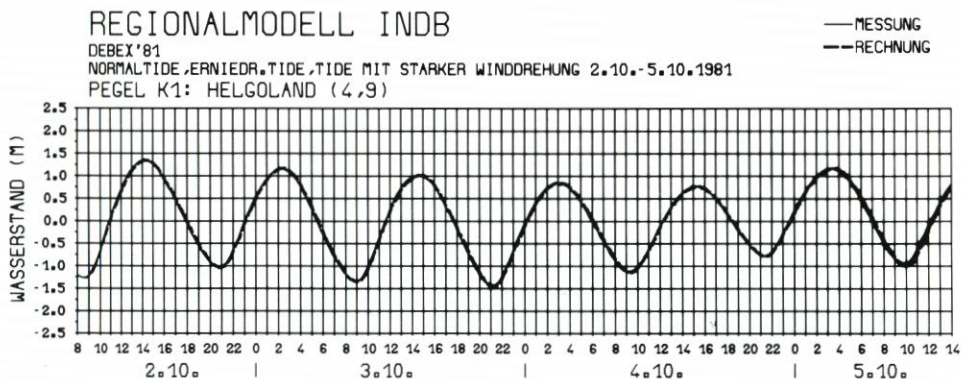


Abb. 6. Pegel Helgoland (K1)

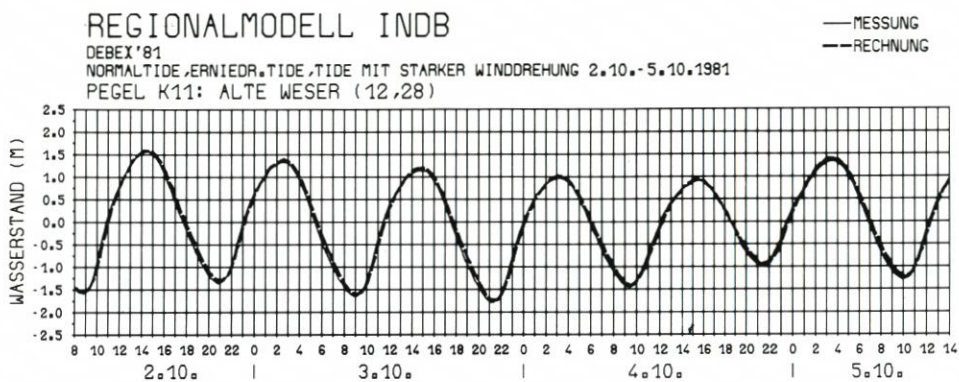


Abb. 7. Pegel Alte Weser (K11)

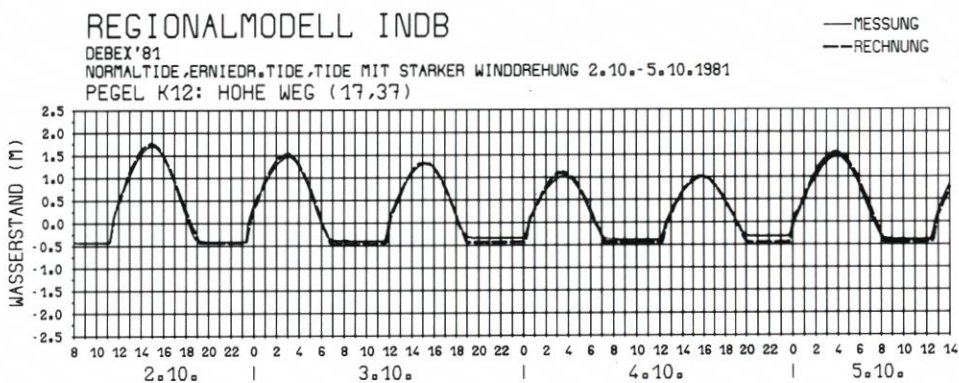


Abb. 8. Pegel Hohe Weg (K12)

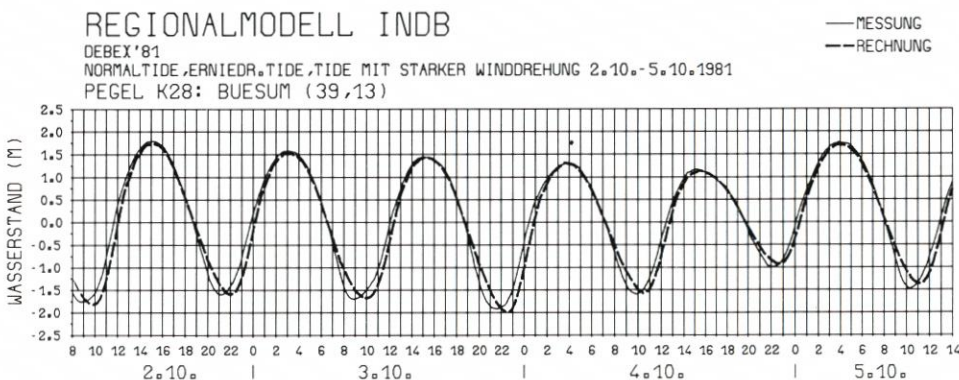


Abb. 9. Pegel Büsum (K28)

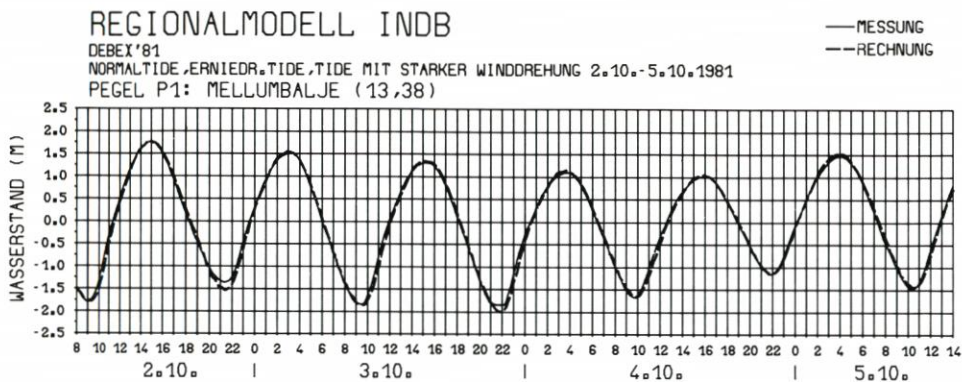


Abb. 10. Pegel Mellumbalje (P1)

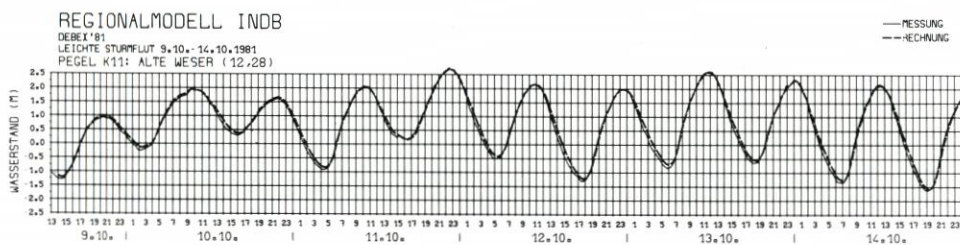


Abb. 11. Pegel Alte Weser (K11)

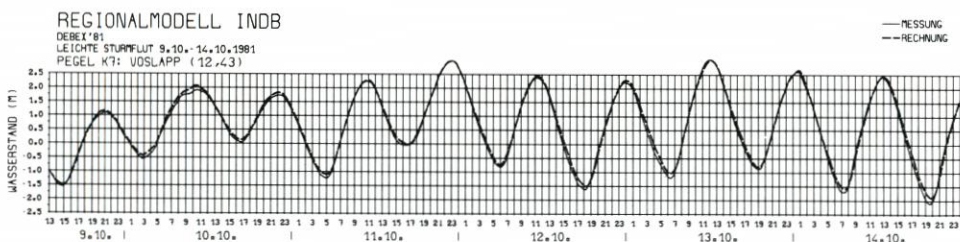


Abb. 12. Pegel Voslapp (K7)

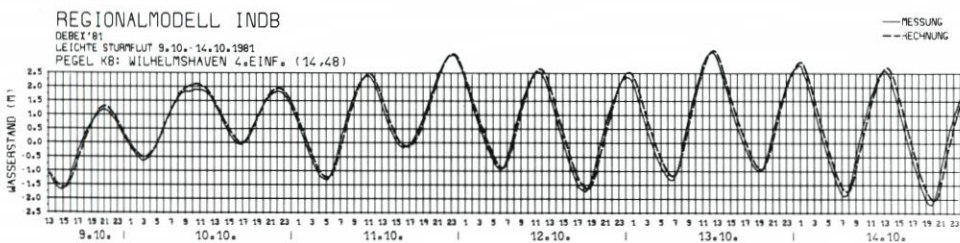


Abb. 13. Pegel Wilhelmshaven 4. Einfahrt (K8)

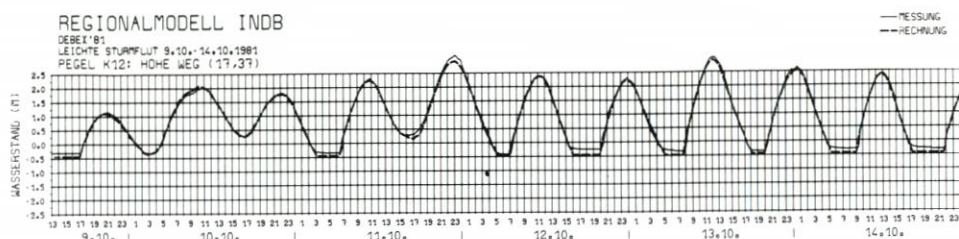


Abb. 14. Pegel Hohe Weg (K12)

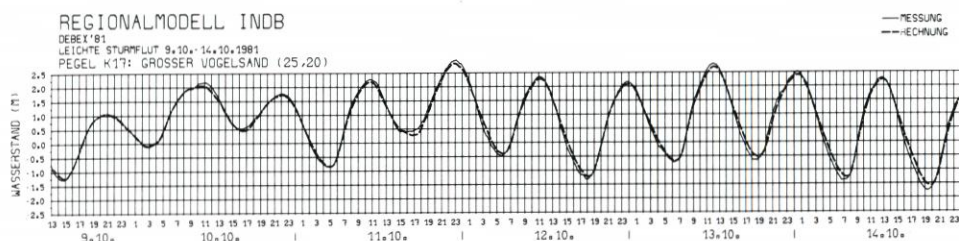


Abb. 15. Pegel Gr. Vogelsand (K17)

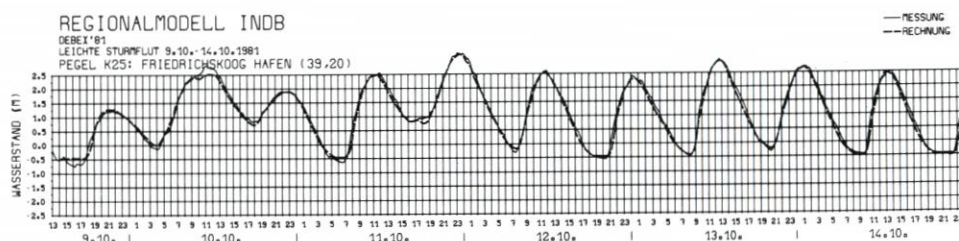


Abb. 16. Pegel Friedrichskoog Hafen (K25)

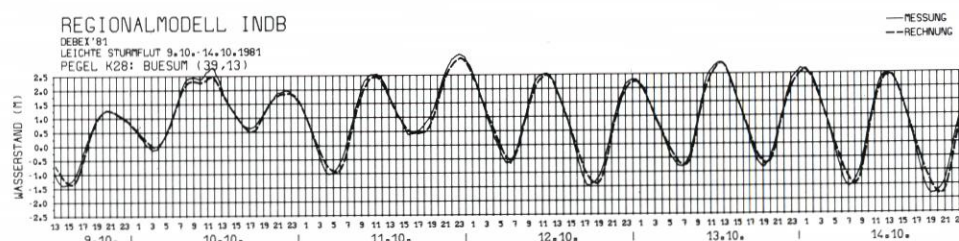


Abb. 17. Pegel Büsum (K28)

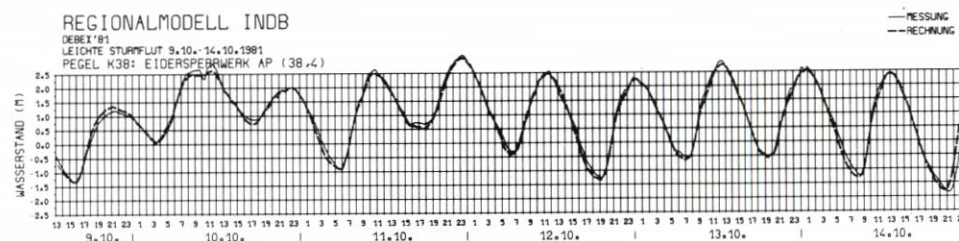


Abb. 18. Pegel Eidersperrwerk AP (K38)

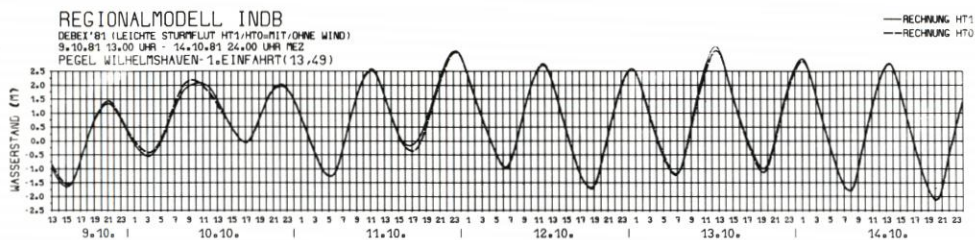


Abb. 19. Pegel Wilhelmshaven 1. Einfahrt (K9)

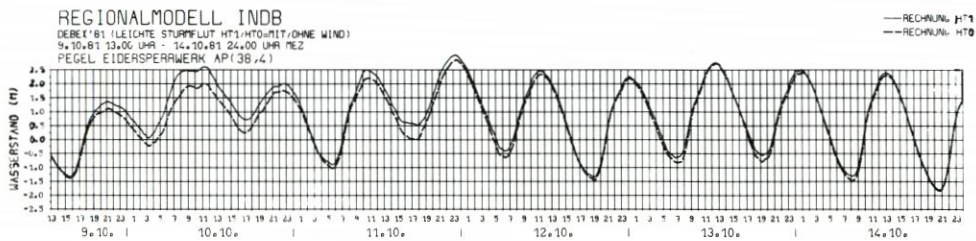


Abb. 20. Pegel Eidersperrwerk AP (K38)

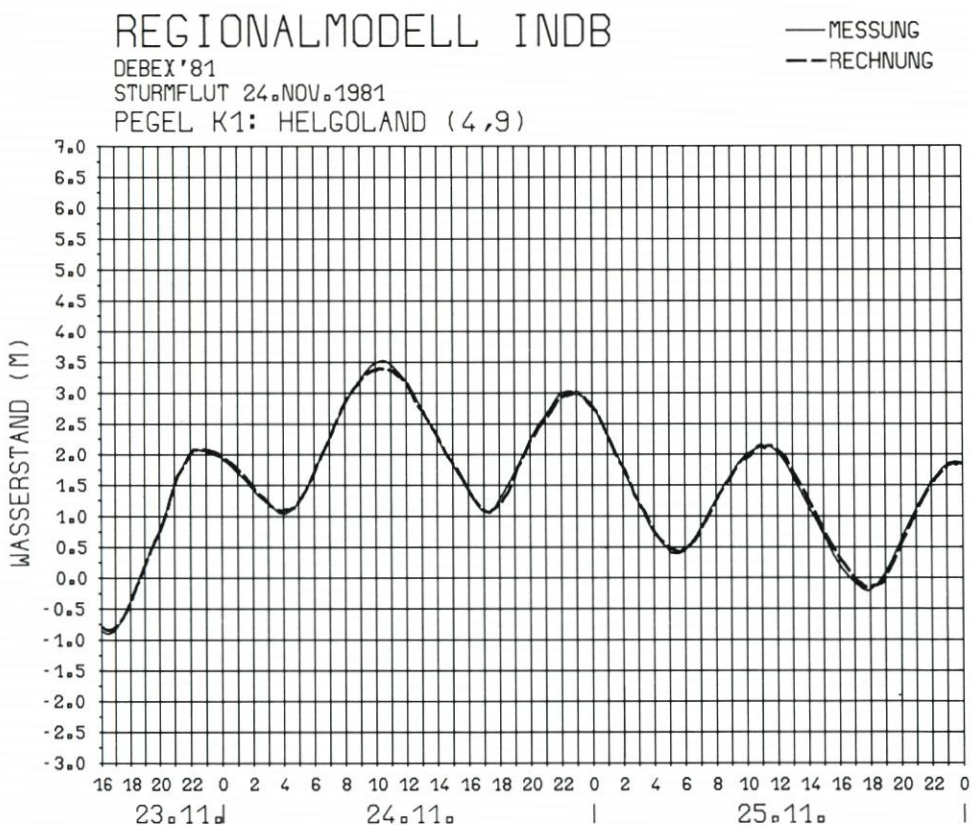


Abb. 21. Pegel Helgoland (K1)

REGIONALMODELL INDB

DEBEX '81

STURMFLUT 24. NOV. 1981

PEGEL K33: BLAUORT (32,10)

— MESSUNG

- - - RECHNUNG

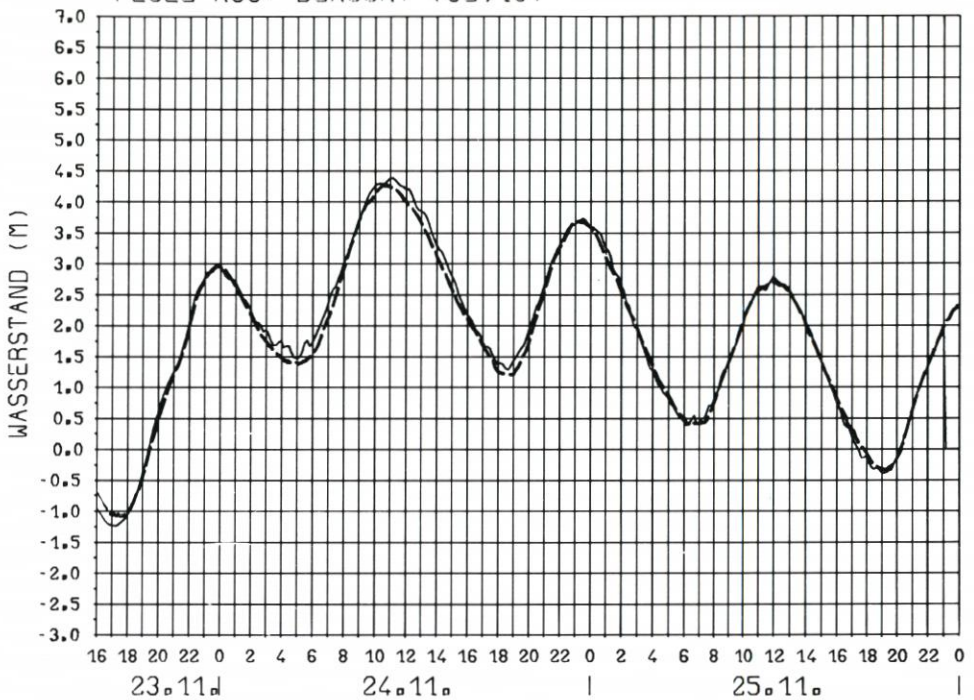


Abb. 22. Pegel Blauort (K33)

REGIONALMODELL INDB

DEBEX '81

STURMFLUT 24. NOV. 1981

PEGEL K11: ALTE WESER (12,28)

— MESSUNG
- - - RECHNUNG

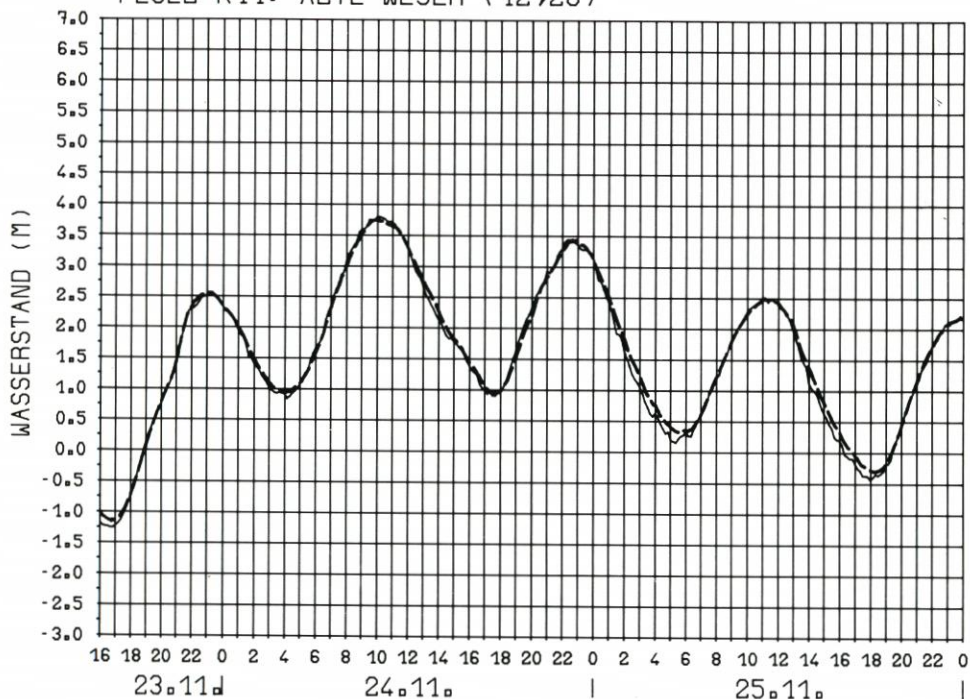


Abb. 23. Pegel Alte Weser (K11)

REGIONALMODELL INDB

DEBEX '81

STURMFLUT 24. NOV. 1981

PEGEL K17: GROSSER VOGELSAND (25,20)

— MESSUNG

- - - RECHNUNG

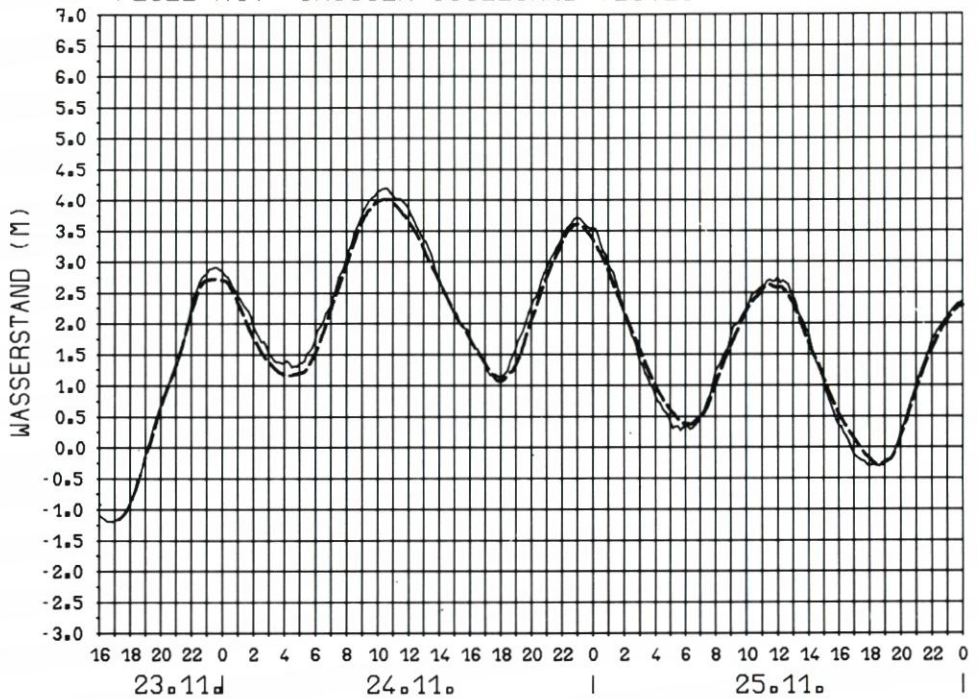


Abb. 24. Pegel Gr. Vogelsand (K17)

REGIONALMODELL INDB

DEBEX'81

STURMFLUT 24. NOV. 1981

PEGEL K21: CUXHAVEN (34,28)

— MESSUNG
-- RECHNUNG

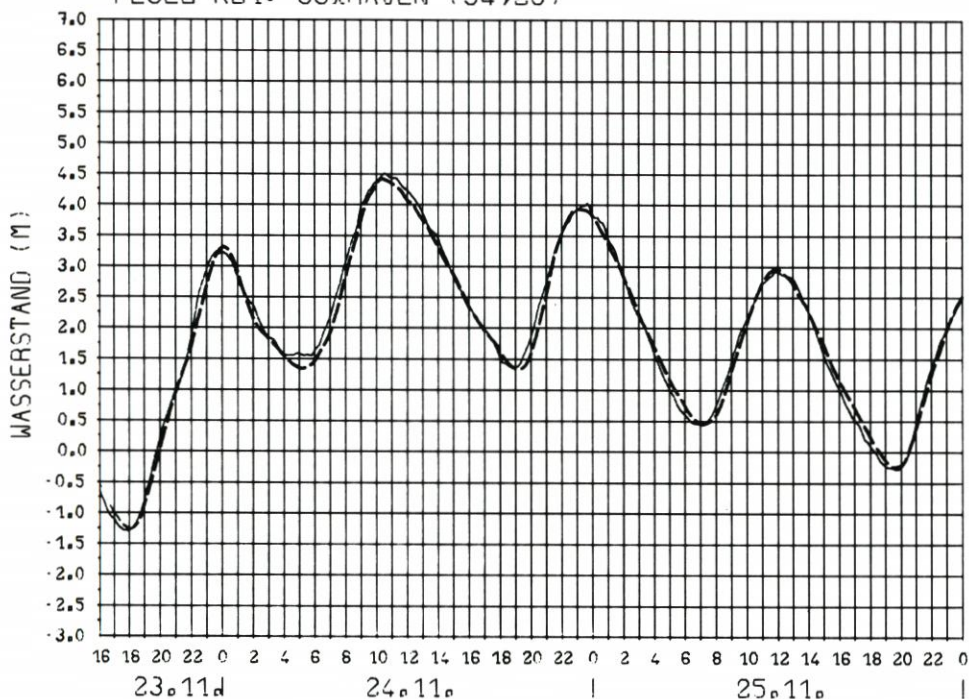


Abb. 25. Pegel Cuxhaven (K21)

REGIONALMODELL INDB

DEBEX '81

STURMFLOT 24. NOV. 1981

PEGEL K25: FRIEDRICHSKOOG HAFEN (39,20)

— MESSUNG

- - - RECHNUNG

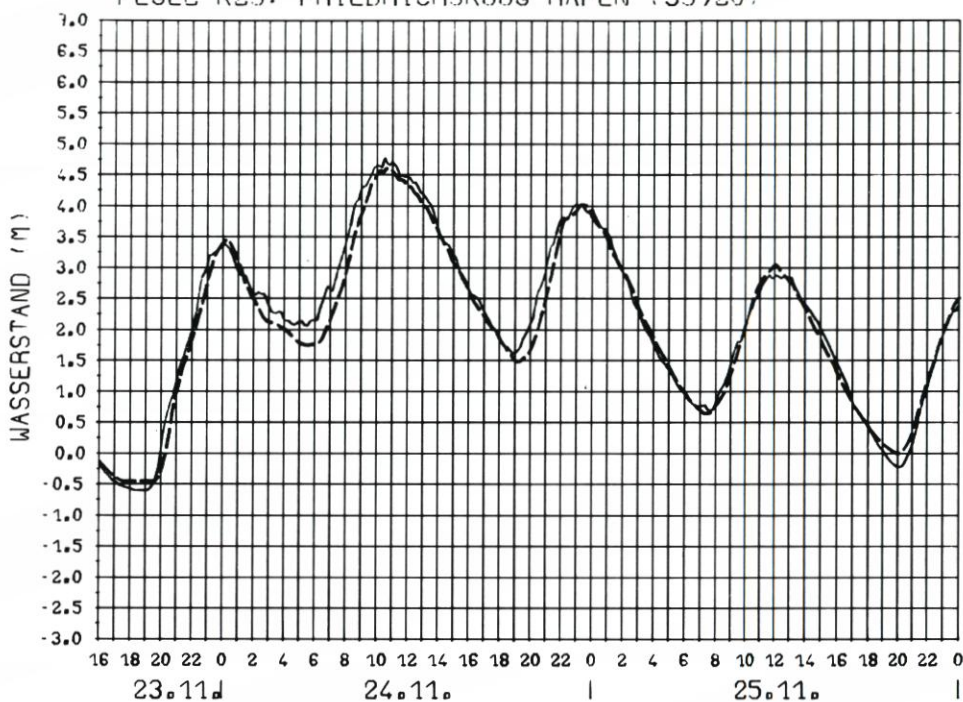


Abb. 26. Pegel Friedrichskoog Hafen (K25)

REGIONALMODELL INDB

DEBEX '81

STURMFLUT 24. NOV. 1981

PEGEL K3: WANGEROOGE NORD (5,32)

— MESSUNG

- - - RECHNUNG

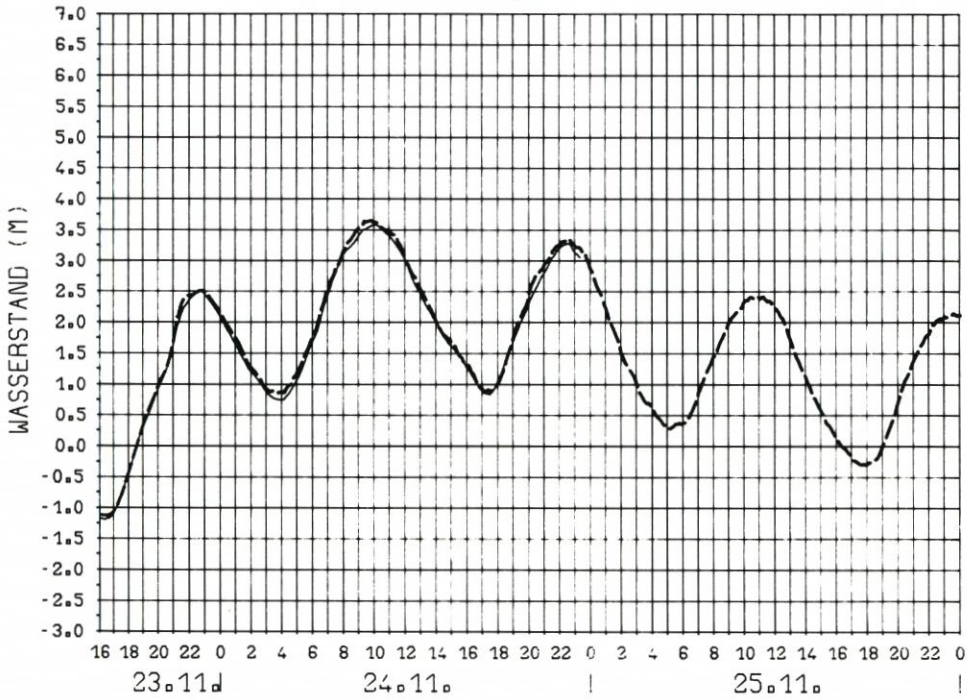


Abb. 27. Pegel Wangerooge Nord (K3)

REGIONALMODELL INDB

DEBEX '81

STURMFLUT 24. NOV. 1981

PEGEL K8: WILHELMSHAVEN 4. EINF. (14,48)

— MESSUNG

- - - RECHNUNG

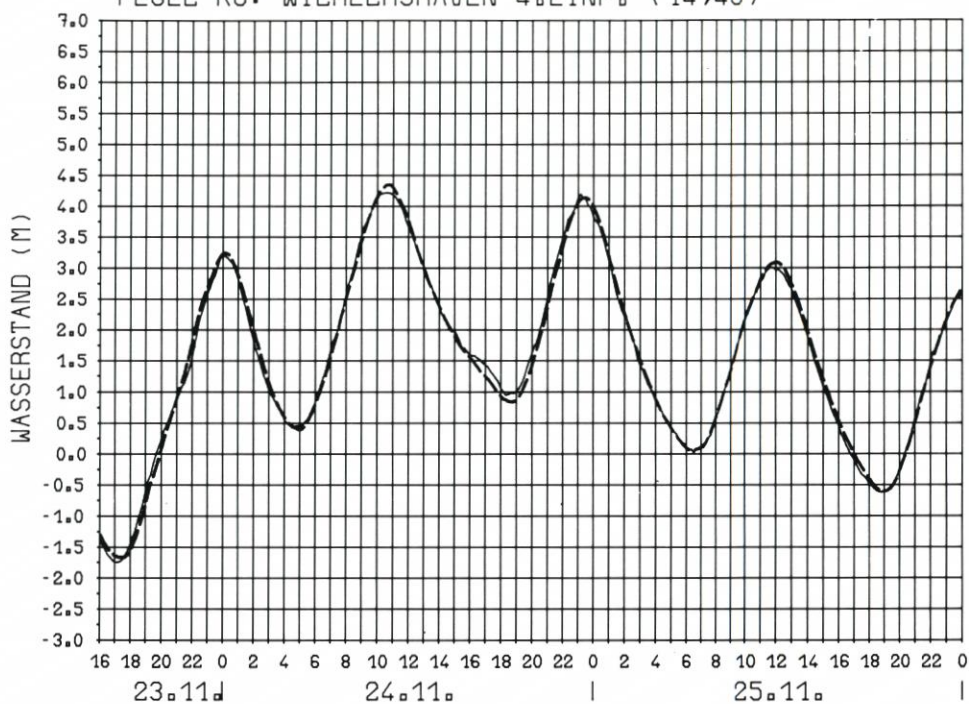


Abb. 28. Pegel Wilhelmshaven 4. Einfahrt (K8)

REGIONALMODELL INDB

DEBEX '81

STURMFLUT 24. NOV. 1981

PEGEL K38: EIDERSPERRWERK AP (38,4)

— MESSUNG
 - - - RECHNUNG

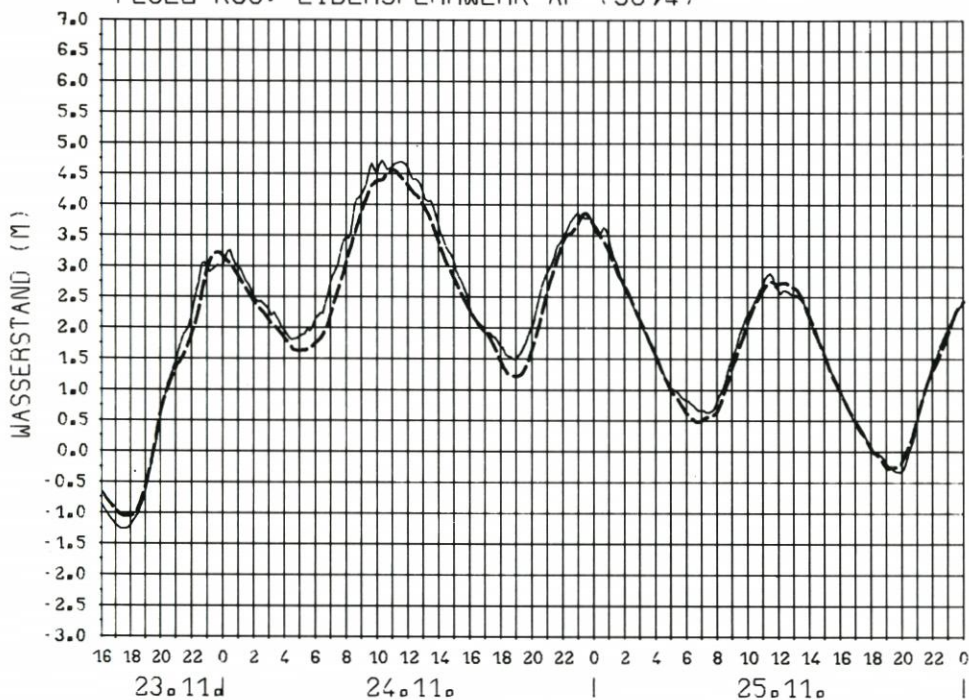
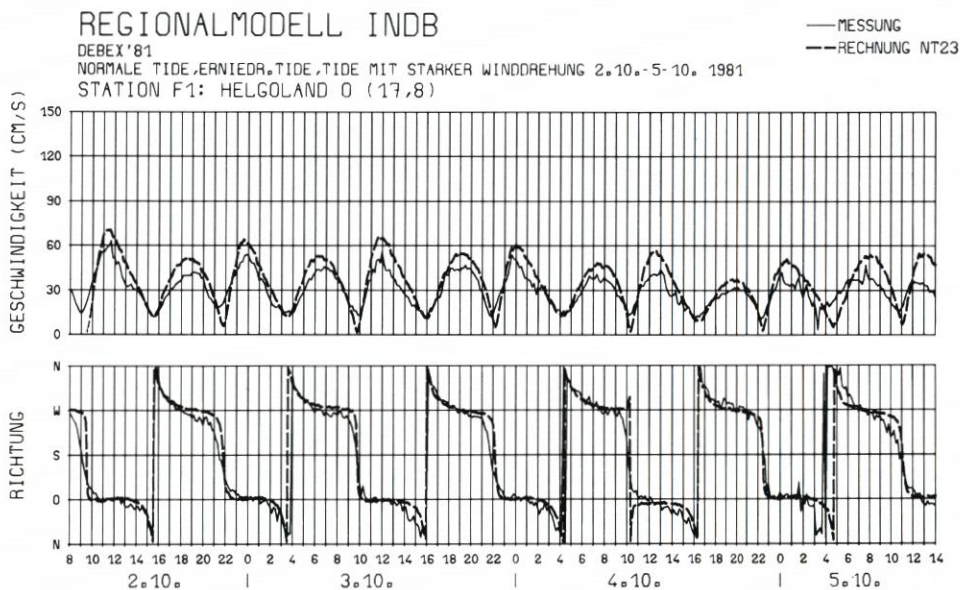
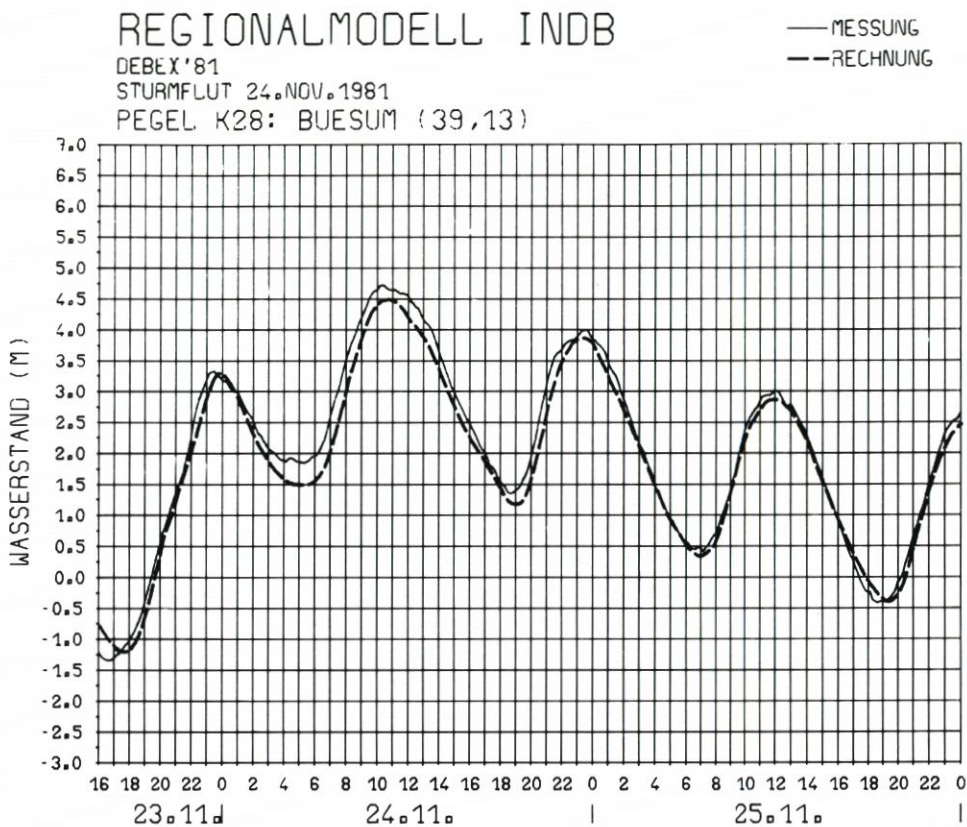


Abb. 29. Pegel Eidersperrwerk AP (K38)



REGIONALMODELL INDB

DEBEX'81

NORMALE TIDE,ERNIEDR.TIDE,TIDE MIT STARKER WINDDREHUNG 2.10.-5.10. 1981

STATION F2: HELGOLAND SO (11,14)

— MESSUNG
- - RECHNUNG NT23

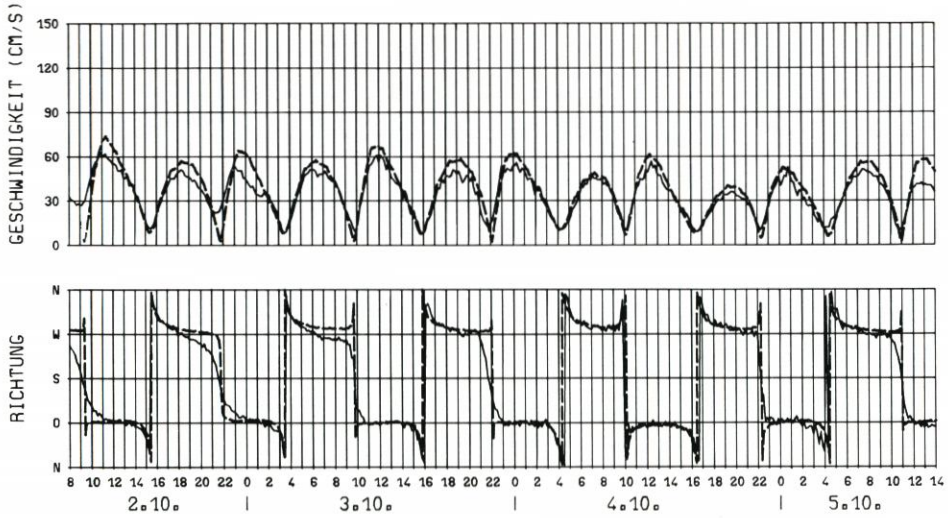
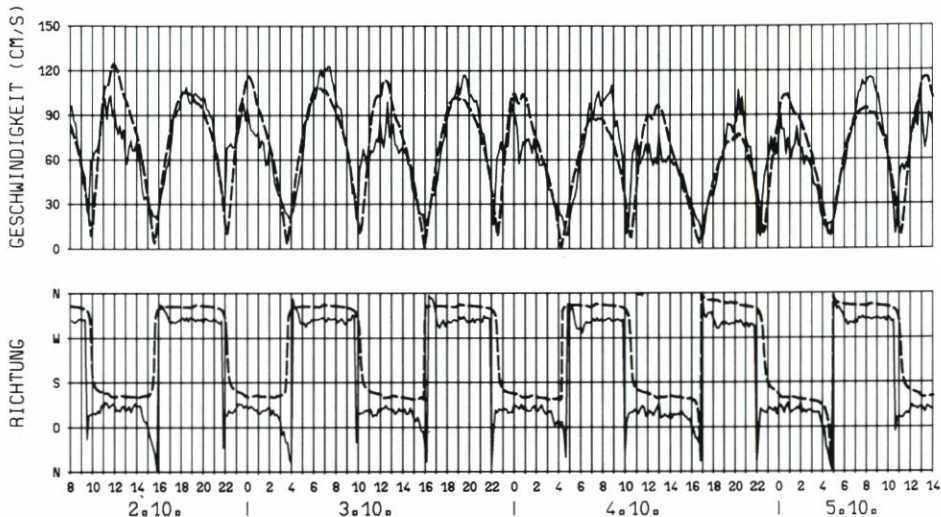


Abb. 32. Station F2

REGIONALMODELL INDB

DEBEX'81
 NORMALE TIDE, ERNIEDR. TIDE, TIDE MIT STARKER WINDDREHUNG 2.10.-5.10. 1981
 STATION F5: WESER/TONNE 26 (18,37)

— MESSUNG
 - - - RECHNUNG NT23



REGMOD₀ INDB

DEBEX'81 VERTIKALPROFIL

STATION V2: WESER/TN 26 (18,37)

— WSP- 2.2 M
 - - - WSP- 4.9 M
 ····· WSP- 7.6 M
 — BD + 2.8 M

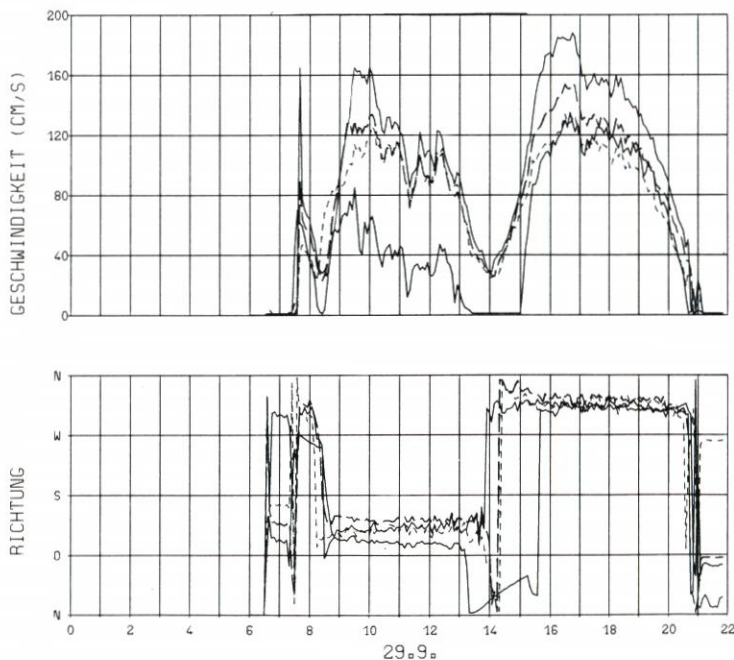
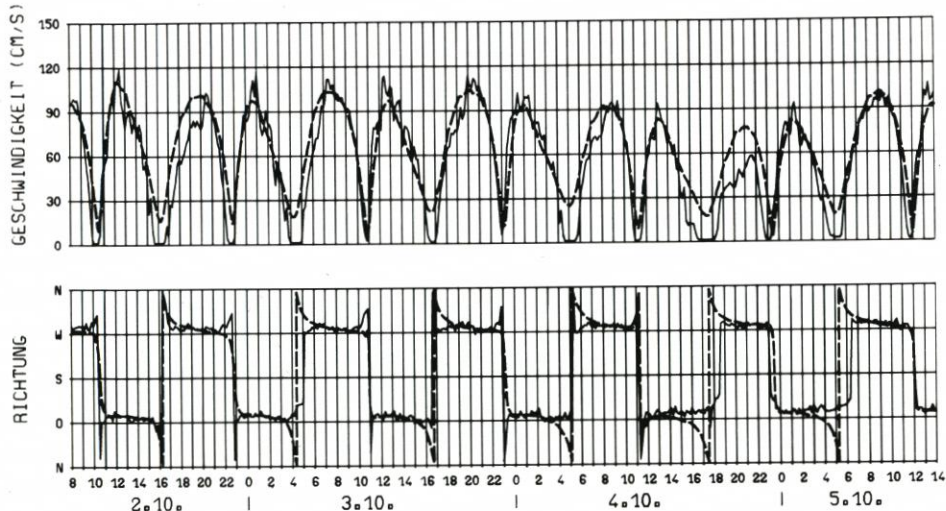


Abb. 33. Station F5 und Vertikalprofil V2

REGIONALMODELL INDB

DEBEX'81
 NORMALE TIDE, ERNIEDR. TIDE, TIDE MIT STARKER WINDDREHUNG 2.10. - 5.10. 1981
 STATION F7: ELBE/TONNE 17 (28,22)

— MESSUNG
 - - - RECHNUNG NT23



REGMOD. INDB

DEBEX'81 VERTIKALPROFIL

STATION V5: ELBE/TN 17 (28,22)

— WSP- 1.5 M
 - - - WSP- 5.5 M
 - - - WSP- 10.5 M
 — BD + 1.0 M

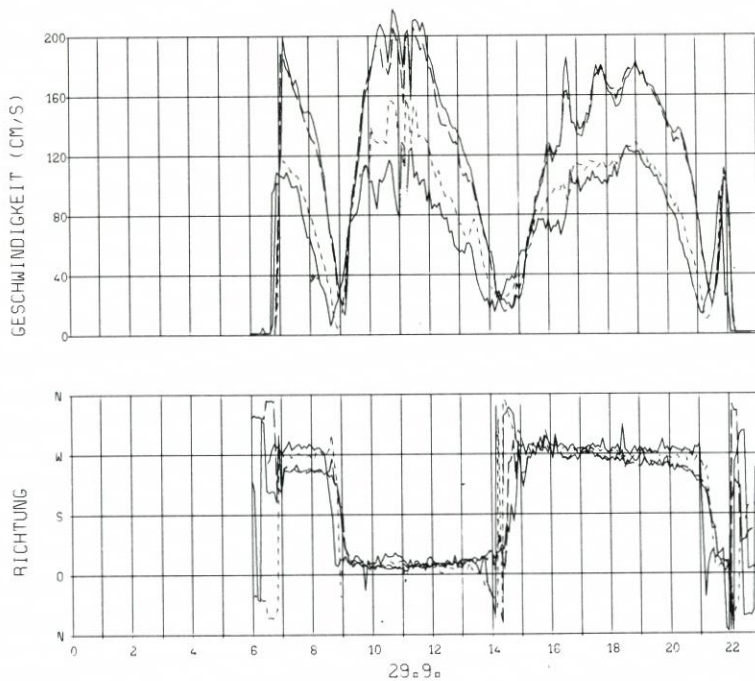


Abb. 34. Station F7 und Vertikalprofil V5

REGIONALMODELL INDB

DEBEX'81
 NORMALE TIDE,ERNIEDR.TIDE,TIDE MIT STARKER WINDDREHUNG 2.10.-5.10. 1981
 STATION W1: HOHE WEG (18,41)

— MESSUNG
 --- RECHNUNG NT23

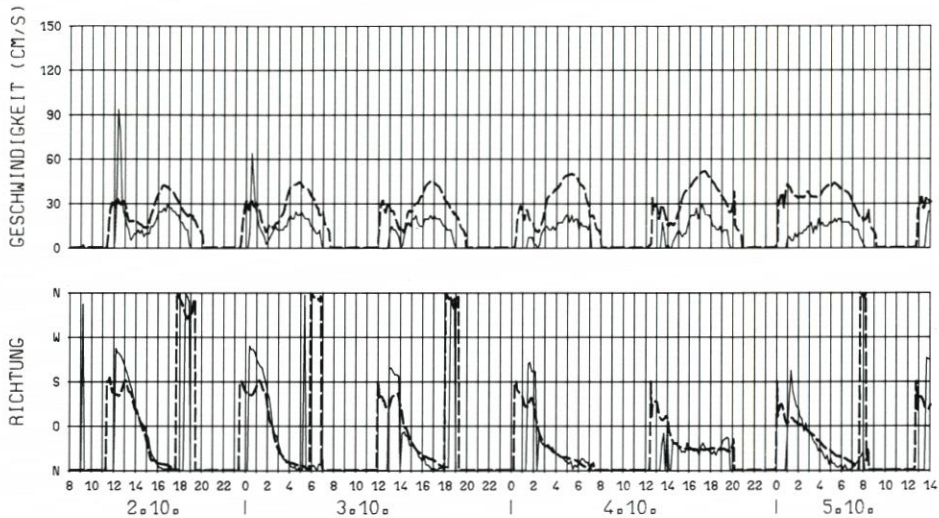


Abb. 35. Station W1

REGIONALMODELL INDB

DEBEX'81
 NORMALE TIDE,ERNIEDR.TIDE,TIDE MIT STARKER WINDDREHUNG 2.10.-5.10. 1981
 STATION W3: SAHLENBURGER WATT (28,27)

— MESSUNG
 --- RECHNUNG NT23

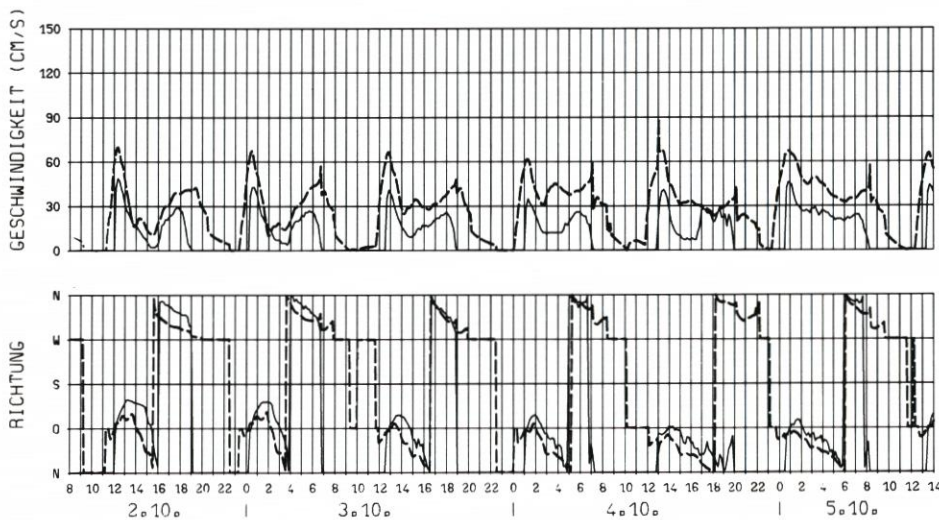


Abb. 36. Station W3

REGIONALMODELL INDB
DEBE 1'81
LEICHTE STURMFLOUT 9.10.-14.10. 1981
STATION F1: HELGOLAND O (17,8)

— MESSUNG
--- RECHNUNG HT1

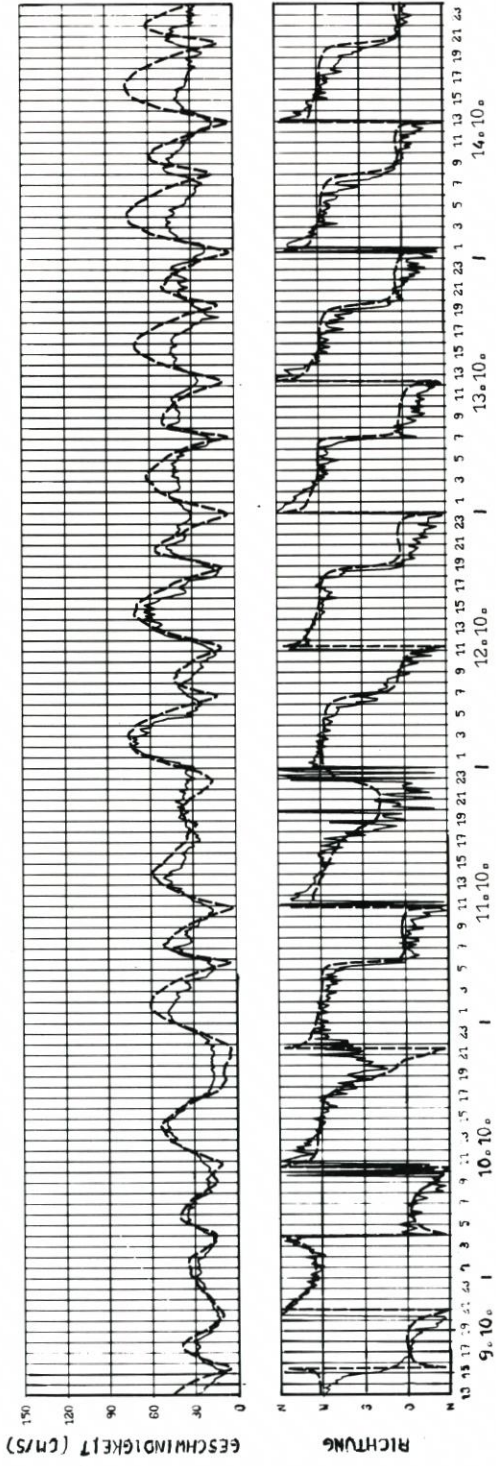


Abb. 37. Station F1

REGIONALMODELL INDB

DEBEX'81
LEICHTE STURMFLOUT 9.10.-14.10. 1981
STATION F2: HELGOLAND SO (11.,14.)

— MESSUNG
--- RECHNUNG HT1

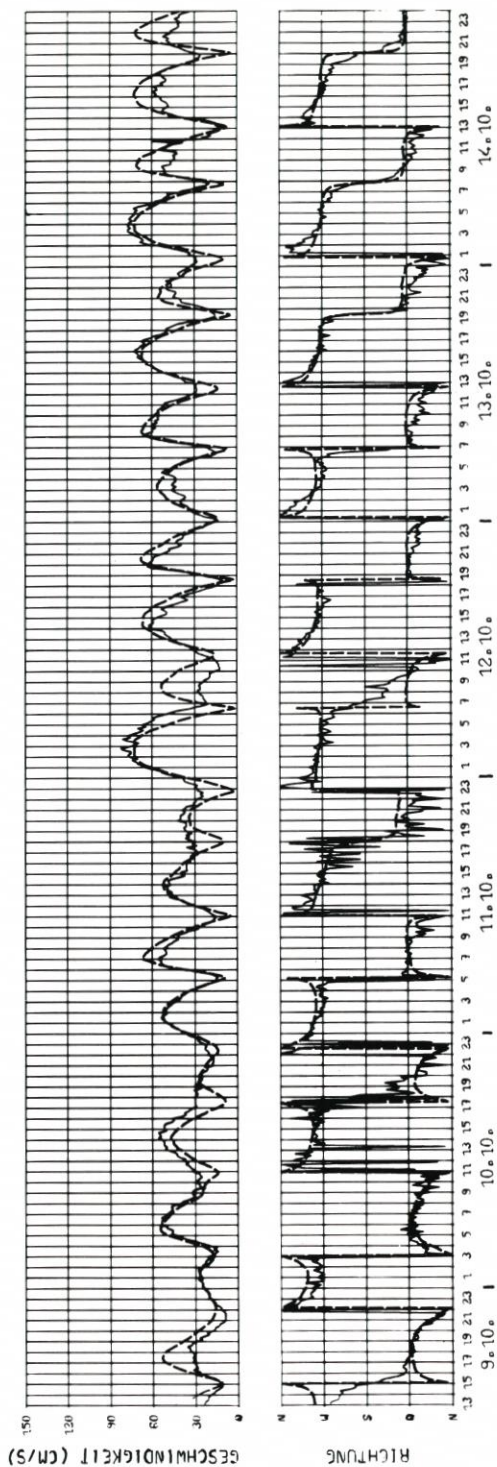


Abb. 38. Station F2

REGIONALMODELL INDB

DEBEX'81
LEICHTE STURMFILUT 9.10., 14.10., 1981
STATION F5: WESER/TONNE 26 (18,37)

— MESSUNG
--- RECHNUNG HT1

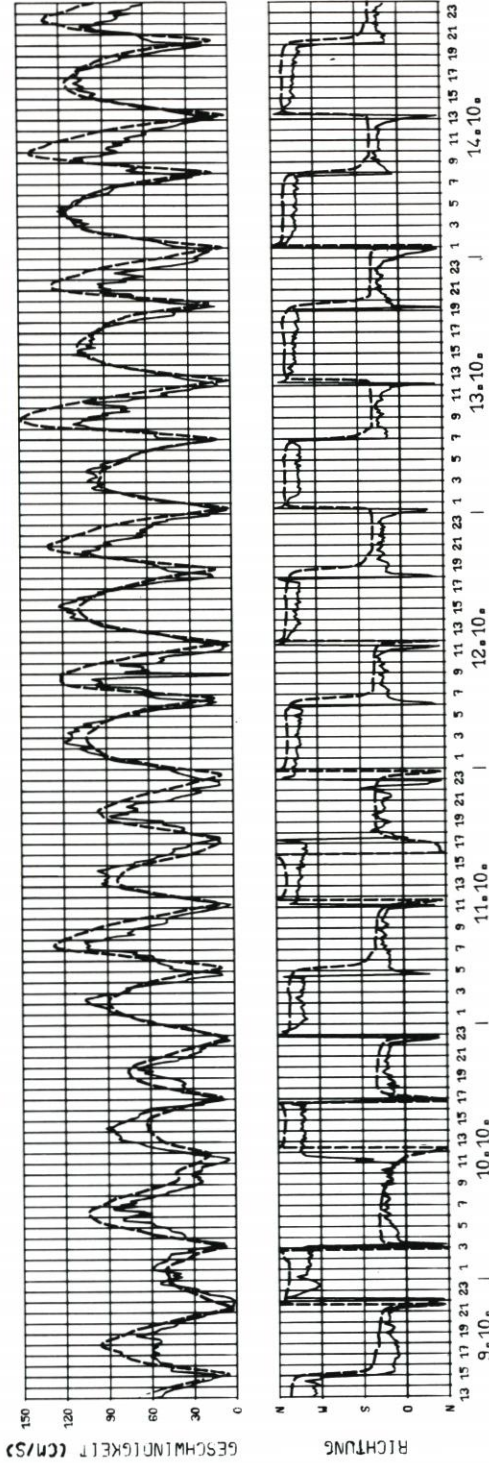


Abb. 39. Station F5

REGIONALMODELL INDB
DEBEX'81
LEICHTE STURMFUHT 9.10.-14.10. 1981
STATION F7: ELBE/TONNE 17 (28,22)

—MESSUNG
---RECHNUNG HT'1

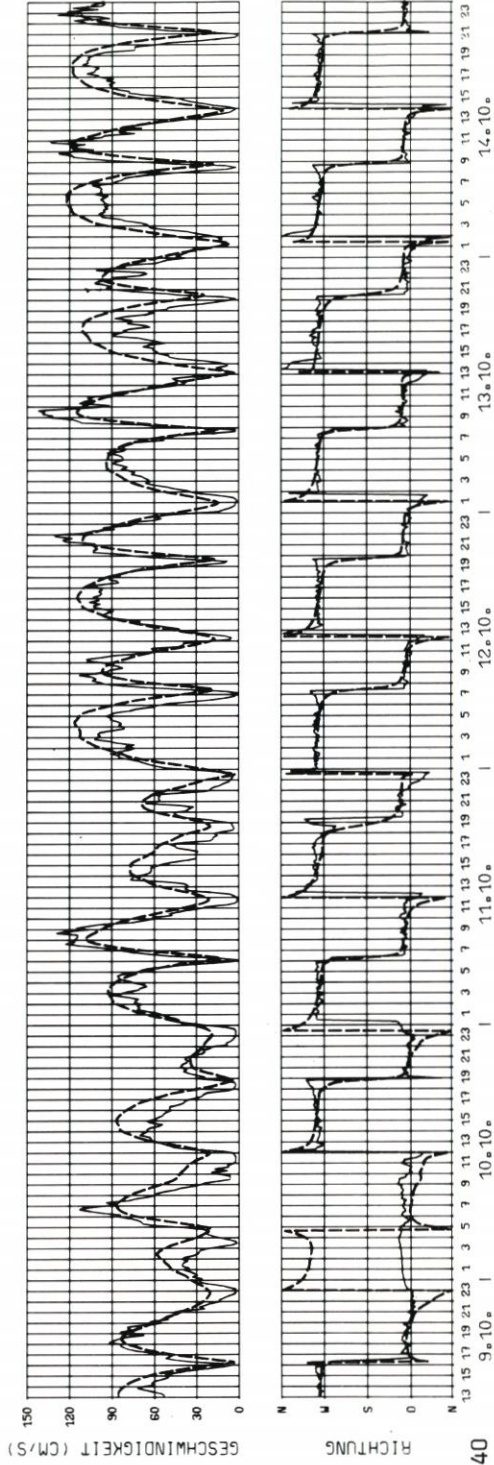


Abb. 40. Station F7

REGIONALMODELL INDB
DEBEI '81
LEICHTE STURMFLOT 9.10.-14.10. 1981
STATION W1: HOHE WEG (18,41)

— MESSUNG
-- RECHNUNG HT1

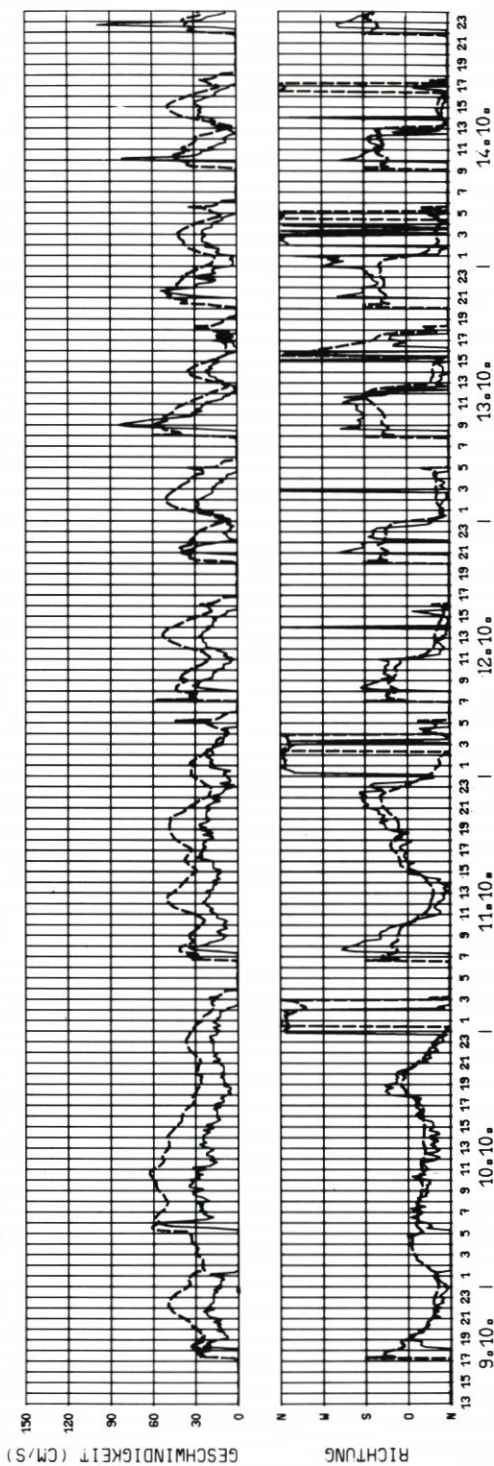


Abb. 41. Station W1

REGIONALMODELL INDB

DEBERT'81
LEICHTE STURMFUT 9.10.-14.10. 1981
STATION W3: SAHLENBURGER WATT (28,27)

— MESSUNG
--- RECHNUNG HT1

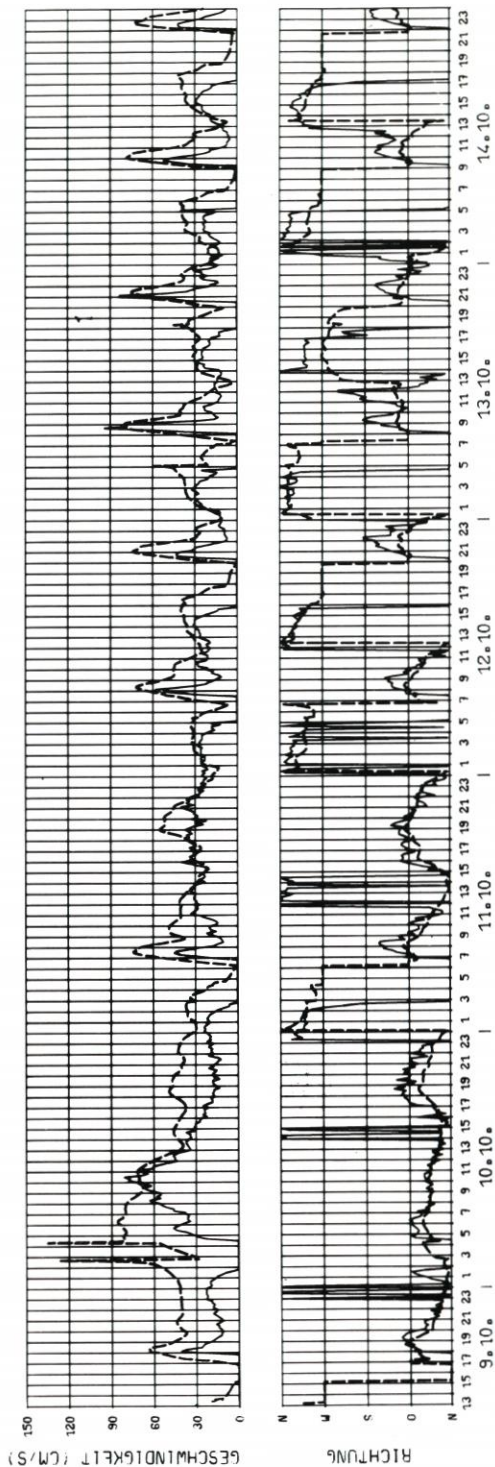


Abb. 42. Station W3

REGIONALMODELL INDB

DEBEX '81

STURMFLUT 24. NOV. 1981

STATION F1: HELGOLAND 0 (17,8)

— MESSUNG
- RECHNUNG ST2

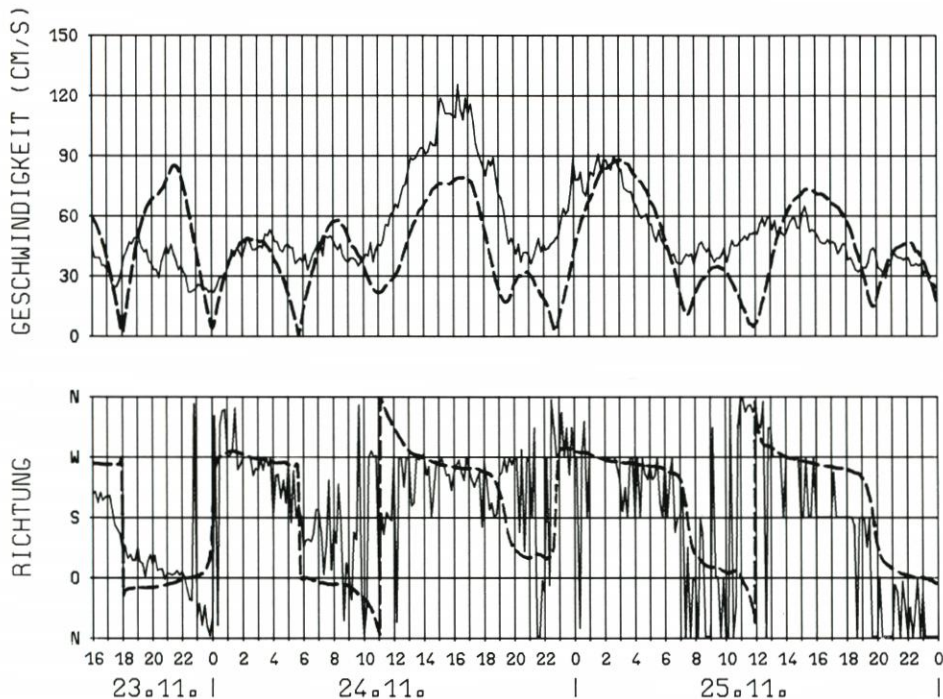


Abb. 43. Station F1

REGIONALMODELL INDB

DEBEX '81

STURMFLUT 24. NOV. 1981

STATION F2: HELGOLAND SO (11,14)

— MESSUNG

- - - RECHNUNG ST2

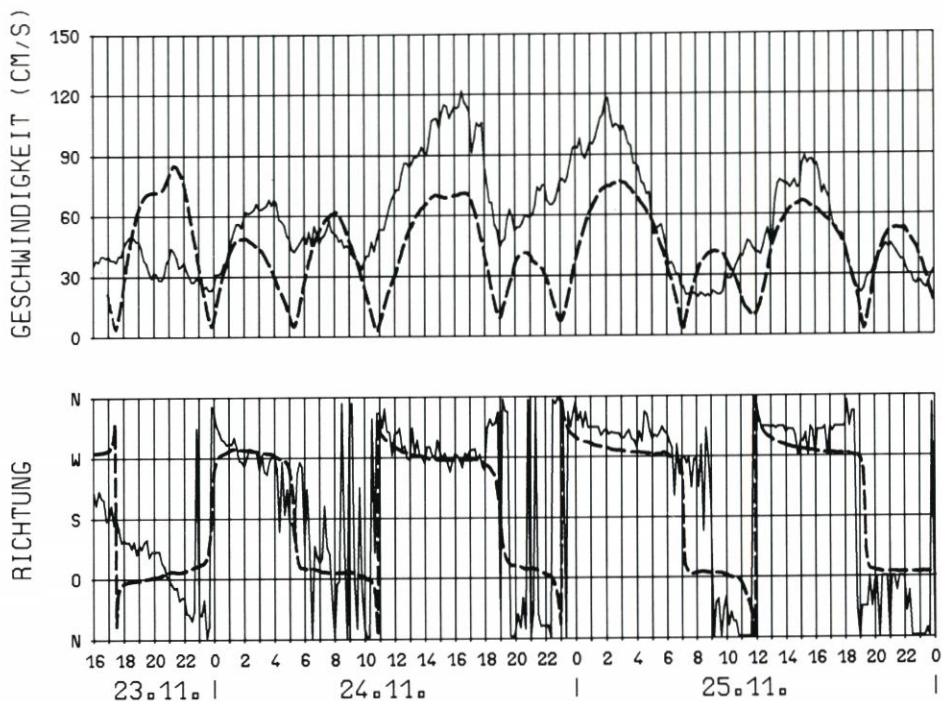


Abb. 44. Station F2

REGIONALMODELL INDB

DEBEX '81

STURMFLUT 24. NOV. 1981

STATION F8: BUSCHSAND (30,18)

— MESSUNG
- - - RECHNUNG ST2

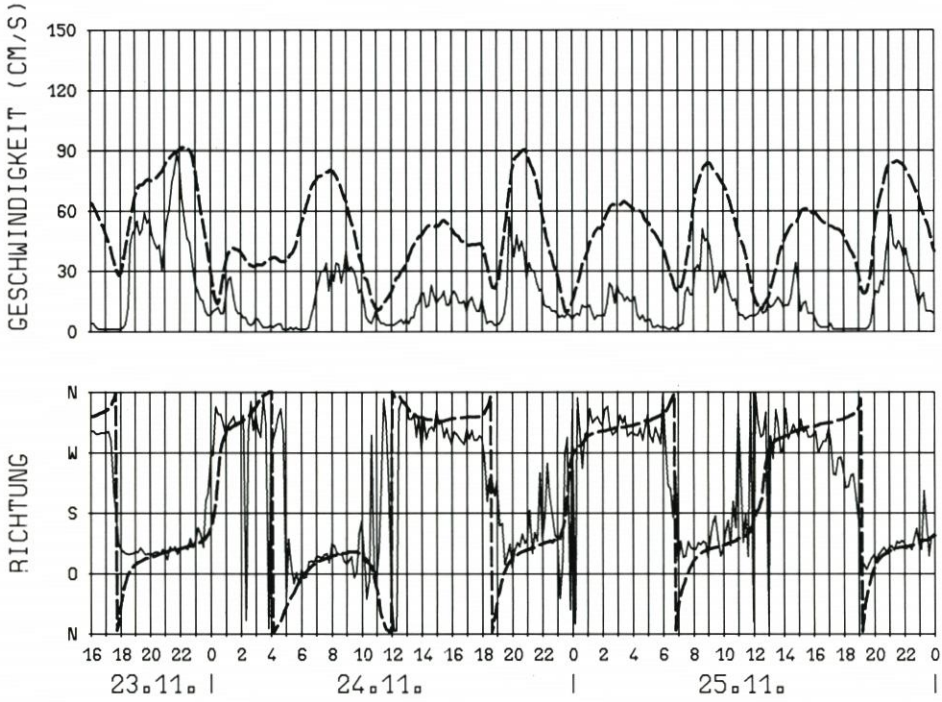


Abb. 45. Station F8

REGIONALMODELL INDB

DEBEX '81

STURMFLUT 24. NOV. 1981

STATION W4: MEDEMSAND (39,27)

— MESSUNG

- - - RECHNUNG ST2

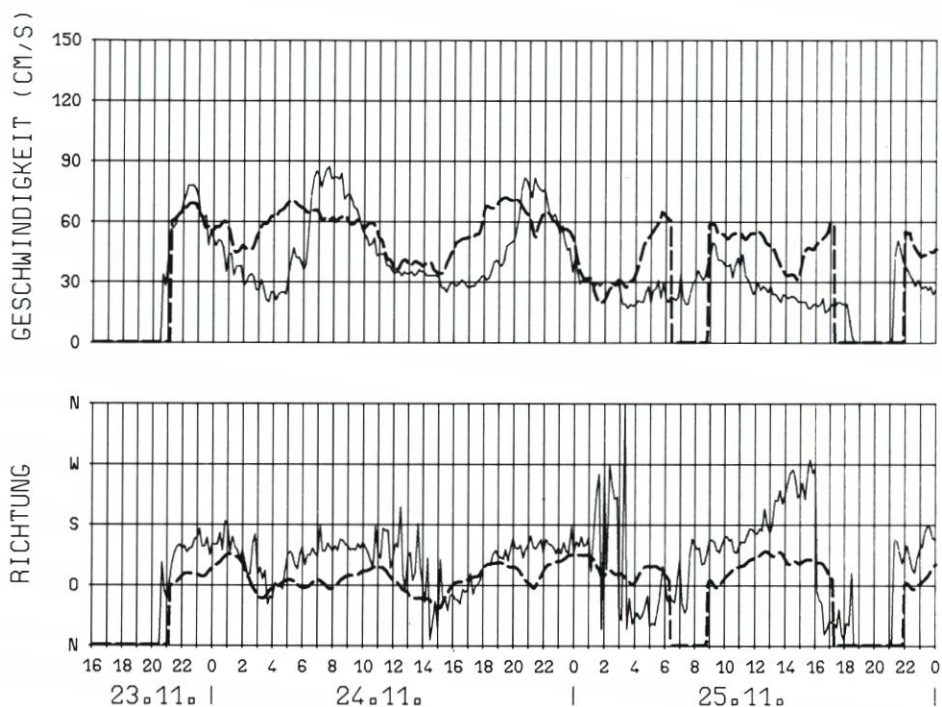


Abb. 46. Station W4

REGIONALMODELL INDB

DEBEX'81 RECHNUNG: NORMALTIDE

GESCHWINDIGKEITSVERTEILUNG AM: 02.10.1981 - 13.00 MEZ

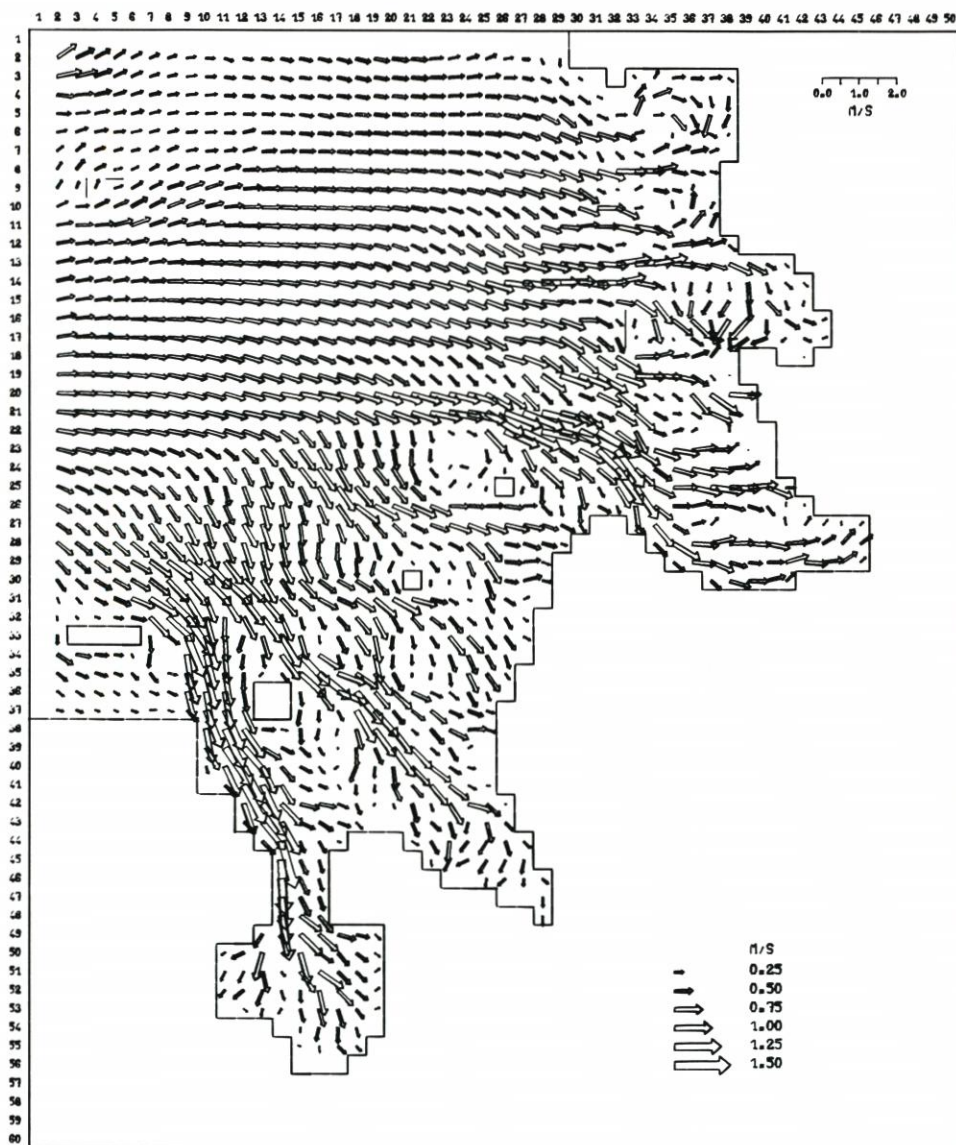


Abb. 47. Stromkarte 2. 10. 81, 13.00

REGIONALMODELL INDB
DEBEX'81 RECHNUNG: NORMALTIDE

GESCHWINDIGKEITSVERTEILUNG AM: 02.10.1981 - 16.00 MEZ

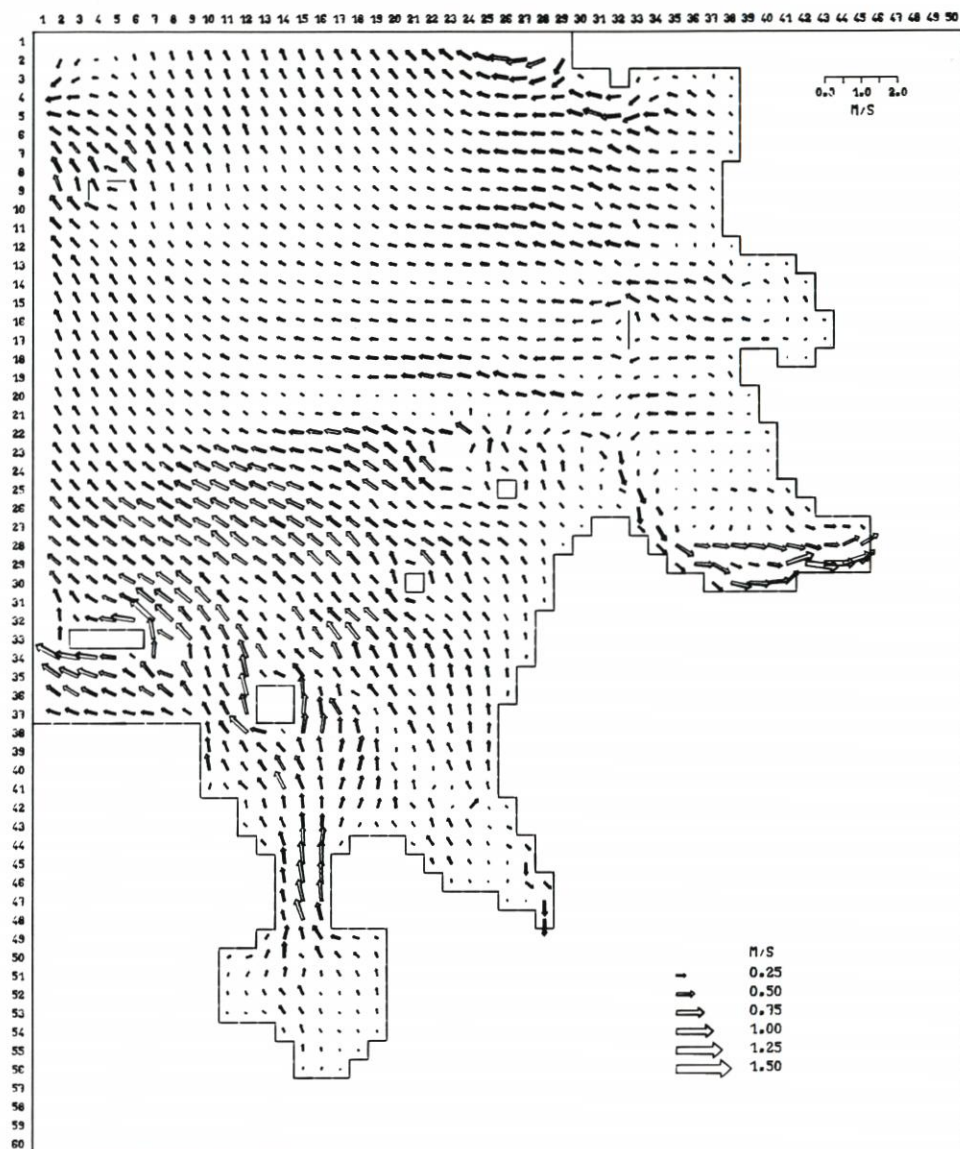


Abb. 48. Stromkarte 2. 10. 81, 16.00

REGIONALMODELL INDB

DEBEX'81 RECHNUNG: NORMALTIDE

GESCHWINDIGKEITSVERTEILUNG AM: 02.10.1981 - 19.00 MEZ

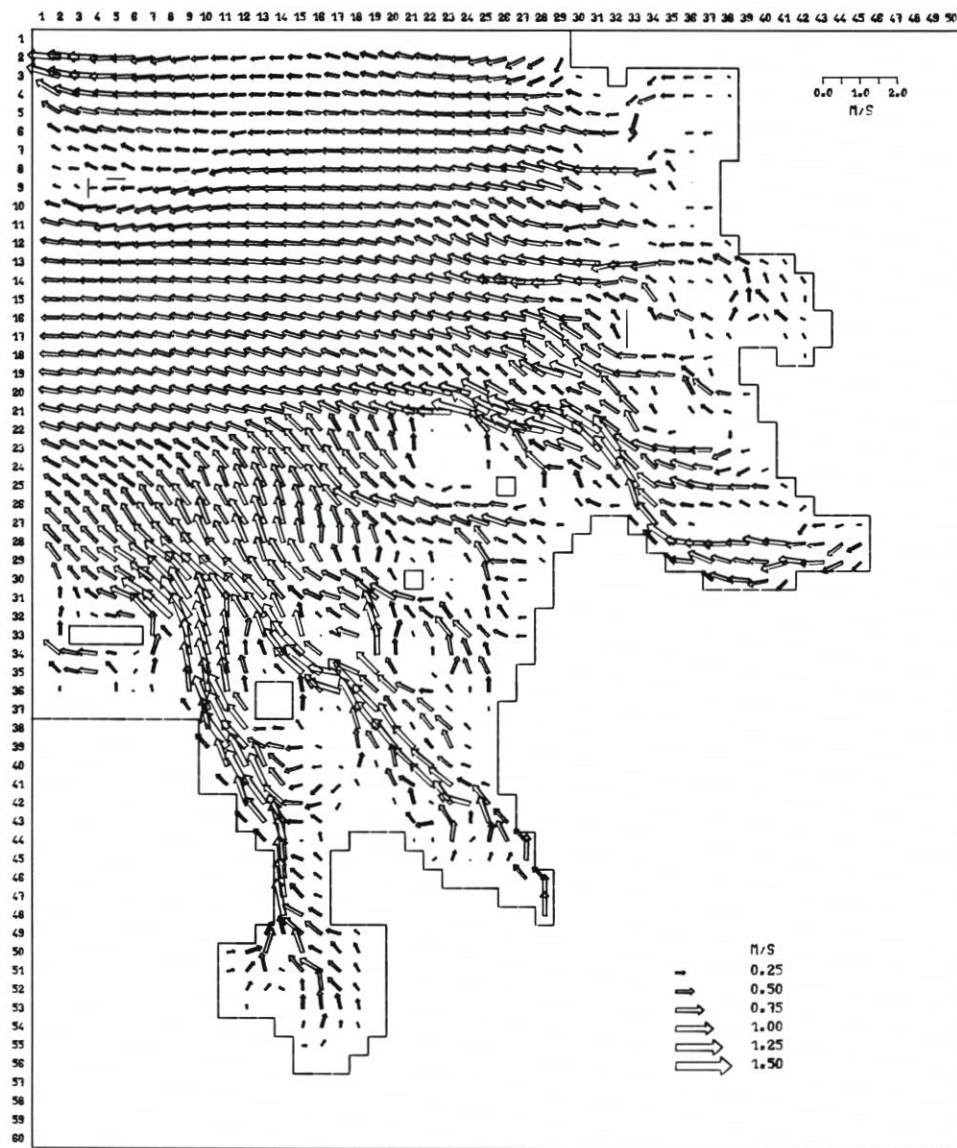


Abb. 49. Stromkarte 2. 10. 81, 19.00

REGIONALMODELL INDB
DEBEX '81 RECHNUNG: NORMALTIDE

GESCHWINDIGKEITSVERTEILUNG AM: 02.10.1981 - 21.00 MEZ

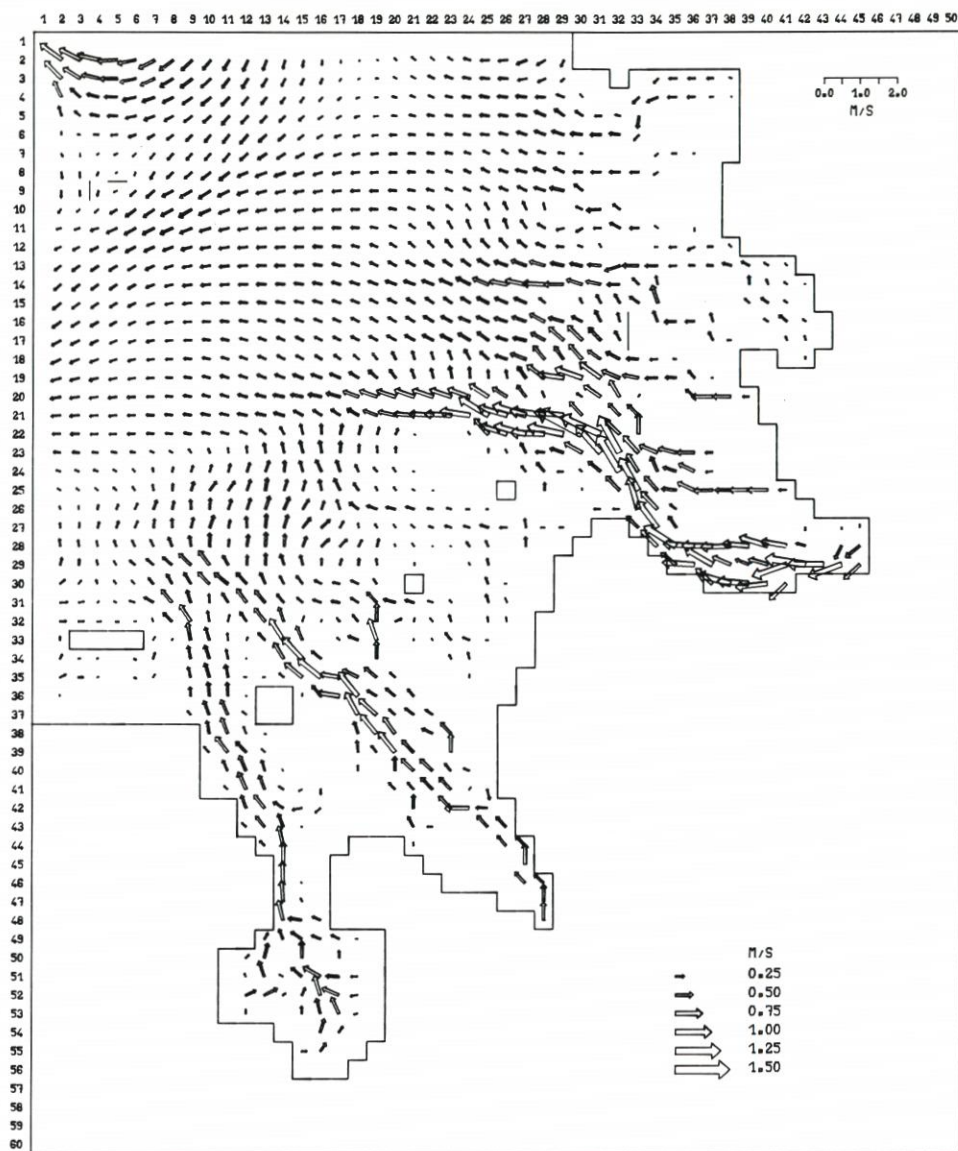


Abb. 50. Stromkarte 2. 10. 81, 21.00

REGIONALMODELL INDB

DEBEX '81 RECHNUNG: NORMALTIDE

GESCHWINDIGKEITSVERTEILUNG AM: 02.10.1981 - 22.00 MEZ

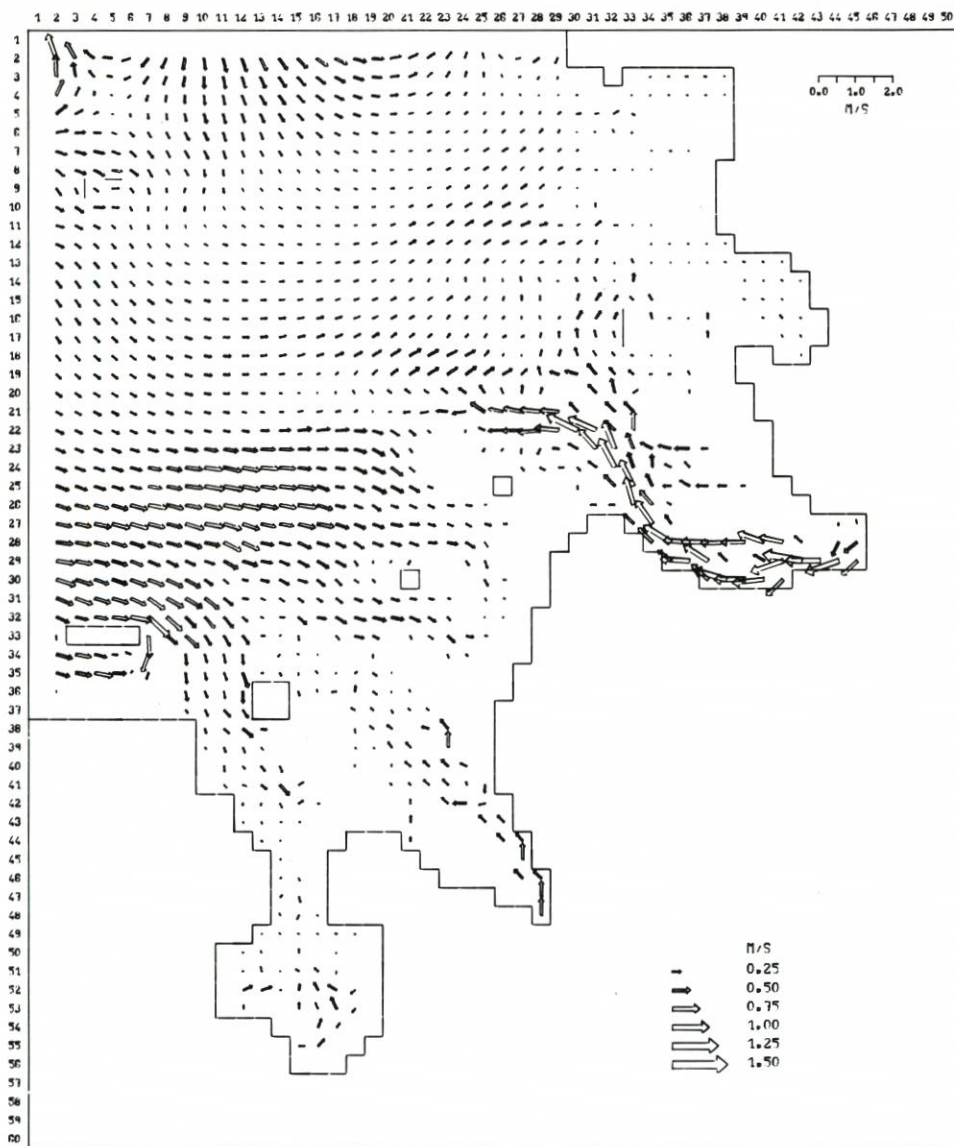


Abb. 51. Stromkarte 2. 10. 81, 22.00