

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Plüß, Andreas

Das Nordseemodell der BAW zur Simulation der Tide in der Deutschen Bucht

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101497>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Plüß, Andreas (2003): Das Nordseemodell der BAW zur Simulation der Tide in der Deutschen Bucht. In: Die Küste 67. Heide, Holstein: Boyens. S. 84-127.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Das Nordseemodell der BAW zur Simulation der Tide in der Deutschen Bucht

Von ANDREAS PLÜß

Zusammenfassung

In der Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg – wurde ein hydrodynamisch-numerisches (HN)-Modell zur Simulation der Tide- und Sturmflutverhältnisse in der Nordsee und insbesondere in der Deutschen Bucht erstellt. Dieses Modell dient der BAW sowohl zur Stützung und Optimierung der großräumigen Ästuargesamtmodelle als auch zur direkten Untersuchung der Seeschiffahrtsstraßen, die etwa bis zur 20 m Tiefenlinie reichen und von den hydrodynamischen und morphologischen Prozessen im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht beeinflusst werden.

Der Modellaufbau basiert auf unstrukturierten Dreiecksnetzen zur Auflösung der komplexen Topographie im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht und der Ästuarmündungen sowie der gesamten Nordsee. Damit ist die Interaktion zwischen Küstensaum und Ästuaren gewährleistet und wird nicht durch künstliche Modellränder mit hier punktuell aus Messungen vorzugebenden Randwerten gestört.

Die optimierte Netztopologie des Nordseemodells kann auch durch neue in der BAW eingesetzte Rechenverfahren verwendet werden. Eine gute Nachbildung der komplexen Topographie, bei gleichzeitiger Begrenzung der Rechenpunktmenge und einem großen Rechenzeitschritt, gewährleistet hohe Simulationsgüte bei hoher Performanz. Durch eine große Anzahl von Systemstudien bzw. Anwendungsrechnungen wurde die Praxistauglichkeit des Modells nachgewiesen. Es gewährleistet so eine gute Reproduktion der natürlichen Tide- und Sturmflutdynamik.

Summary

The Coastal Division of the Federal Waterways Engineering and Research Institute in Hamburg has set up a hydrodynamical model to simulate the tidal dynamics in the North Sea and in particular, in the German Bight. This model is used in-house to generate the boundary conditions for estuary modelling and to estimate tidal and storm surge dynamics.

The model set-up is based on an unstructured mesh (triangular grid), which provides a good representation of the complex topography in coastal areas, in the German estuaries, and in the entire North Sea. This guarantees that the interactions between coastal zones and estuaries are accurately simulated without the adverse effect of artificially specified model boundaries.

The optimisation of this grid fulfils the requirements of the newest computational programmes and is generally applicable to several simulation codes. A good topography reproduction along with a restricted number of calculation nodes and the use of long time-steps, provides for a high quality simulation performance. A large number of systematic as well as case studies including natural applications have demonstrated the suitability of this model for reproducing tidal and storm surge dynamics in the coastal zone of the North Sea and in the adjacent German estuaries.

Inhalt

1. Zielsetzung	84
2. Modellaufbau	85
2.1. Modellrand	86
2.2. Topographie	86
2.3. Rechenmodell	93
3. Modellsteuerung	94

3.1	Tideanalyse	96
3.1.1	Fast Fourier Analyse	96
3.1.2	Partialtidenanalyse	97
3.2	Langperiodische Wasserstandsschwankungen	99
3.2.1	Langperiodische Partialtiden	99
3.2.2	Fernwellen	102
3.3	Randsteuerung	104
3.3.1	Wasserstand	104
3.3.2	Wind	104
3.4	Rechenablauf	107
4.	Verifikation	109
4.1	Astronomische Tiden	109
4.2	Tiden mit geringem Windeinfluss	110
4.3	Sturmfluten	118
5.	Anwendungen	123
5.1	Gesamtmodell	123
5.2	Modell mit lokalen Verfeinerungen	123
5.3	Modell zur Berechnung von Randwerten	123
6.	Zusammenfassung / Ausblick	124
6.1	Zusammenfassung	124
6.2	Ausblick	124
7.	Schriftenverzeichnis	126

1. Zielsetzung

Seit Sommer 1998 wurde in der *Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg* (BAW-DH) ein hydrodynamisch-numerisches (HN)-Modell zur Simulation der Tideverhältnisse in der Nordsee und insbesondere in der Deutschen Bucht erstellt. Dieses Modell wurde zunächst für Tide- und Sturmflutsimulationen entwickelt, um die Lage der seeseitigen Berandungen für die großräumigen Ästuargesamtmodelle der BAW-DH zu optimieren und um diese mit den jeweils erforderlichen Randwerten zu versorgen. Darüber hinaus gehend hat sich das Modell auch für Untersuchungen von Fragestellungen bewährt, die mit dem Küstenvorfeld der Deutschen Bucht und mit den äußeren Bereichen der Seeschiffahrtsstraßen verknüpft sind. Insbesondere die hydrodynamischen und morphodynamischen Prozesse der Ästuargebiete, die in direkter Wechselwirkung mit den Vorgängen in der Deutschen Bucht stehen, prägen die Veränderungen kennzeichnender Tideparameter bis in die oberen Bereiche der Ästuarare. Sie haben damit mittelbar auch Einfluss auf Strombaumaßnahmen bzw. übergreifende Strombaukonzeptionen, die der Minimierung von Unterhaltungsaufwendungen in den Seeschiffahrtsstraßen dienen und zur Verbesserung bzw. Stabilisierung des Ökosystems beitragen.

Der Modellaufbau erfolgte in Kooperation mit dem *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie* (BSH). Aus dem BSH-Modell wurden Informationen sowohl über die Tiefenverteilung als auch über die harmonischen Konstanten (Partialtiden) am offenen Modellrand im Norden zwischen Schottland und Norwegen und im Westen zwischen England und der Normandie zur Generierung der Wasserstandsrandwerte berücksichtigt. Zum Betrieb von hochaufgelösten Ästuarmodellen in der BAW-DH ist es wichtig, die tatsächlich eingetretenen Wasserstände im Küstensaum der Deutschen Bucht für vergangene Zustände nachzurechnen (*Hindcastsimulationen*).

Die Notwendigkeiten zum Aufbau und Betrieb des Nordseemodells in der BAW-DH ergeben sich aus folgenden Punkten:

1. Analyse der großräumigen Tide- und Sturmflutdynamik im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht und in den Mündungsgebieten der Ästuar
2. Berechnung und Verifikation synoptischer Zustände
 - mit einem **Gesamtmodell** der Nordsee mit der Deutschen Bucht einschließlich verfeinerter Ästuar und Wattgebiete oder
 - durch den Aufbau und Betrieb **eigenständiger Modellgebiete** (hierarchische Struktur), welche durch zeitvariable Randwerte aus dem Nordseemodell betrieben werden. Hierfür kommen neben den Wasserständen und Salzgehalten auch die Durchflüsse und eventuell spezielle Transportgrößen in Betracht.
3. Simulation des Einflusses der großräumigen Wind- und Luftdruckverhältnisse auf der Nordsee auf die Wasserstände und Strömungen in den deutschen Ästuaren. Hierdurch wird eine Erhöhung der Prognosefähigkeit zur Analyse ausbaubedingter Änderungen erreicht.
4. Simulation der großräumigen und längerfristigen Sedimenttransportverhältnisse in der Nordsee und der Deutschen Bucht als Grundlage zur morphodynamischen Simulation in den Ästuaren bzw. zur Gewinnung von geeigneten Randwerten an den Ästuarmodellrändern.
5. Kombinationen der Tideverhältnisse und der Windverhältnisse (Starkwindlagen bzgl. Tidesituation, Windstau, ...) im Zusammenwirken mit Fernwellen („external surges“ Kap. 3.3) zur Beurteilung vergangener und künftiger Sturmflutverhältnisse (Kap. 3).
6. Berechnung einer synoptischen Tidedynamik für einen bestimmten Zeitpunkt bzw. Zeitraum in der Deutschen Bucht für alle zukünftig erforderlichen Ränder von Regional- bzw. Lokalmodellen.

2. Modell a u f b a u

Der Aufbau eines hydrodynamisch-numerischen (HN)-Modells der Nordsee und der Deutschen Bucht einschließlich der deutschen Ästuar erfordert

1. eine große räumliche Modellausdehnung (gesamtes Seegebiet der Nordsee),
2. im Küsten-/Ästuarbereich eine relativ hohe Auflösung der Topographie und hier gleichzeitig
3. eine große Anzahl von Rechenpunkten.

Diese Anforderungen verlangen eine große Flexibilität bzw. Variabilität des Rechenetzes, weshalb hier nur unstrukturierte Netztopologien in Form von Dreiecken eingesetzt wurden. Dabei wurde besonderes Gewicht auf die Güte der Dreieckskonfiguration gelegt (CHENG, CASULLI u. LANG, 2002; PLÜß, 1994; LIPPERT, MILBRADT u. SELLERHOFF, 2002; PLÜß et al., 1997).

Durch die Verwendung unstrukturierter Gitter lassen sich die Größe und Anordnung der Dreiecke den jeweiligen Gegebenheiten von

1. Wattplatten,
2. starken Tiefengradienten an Wattrinnen,
3. speziellen Strukturlinien (z. B. Fahrwasserkanten) und
4. Festland- bzw. Inselrändern

in Abhängigkeit vom jeweiligen Untersuchungsgebiet anpassen.

Im Gegensatz zur unstrukturierten Modellbildung stehen HN-Modelle mit strukturierter Elementform (Rechtecke bzw. Quadrate), bei denen die Elementabmessungen nicht oder nur durch eine aufwändige Staffelung den lokalen topographischen und hydrodynamischen Gegebenheiten angepasst werden können (KLEINE, 1994). Neben der Reproduktion

der Tiefenstruktur im Gitternetz des HN-Modells werden hier die zeitabhängigen Zustandsgrößen der Tidedynamik (Wasserstand, Strömung, Salzgehalt, ...) berechnet und gespeichert. Beim Einlaufen der Tidewelle (KELVIN-WELLE, 1868) in den flachen Küstensaum wird diese durch Reibung verformt und es entstehen Seichtwassertiden.

Insofern ist im Küsten-/Ästuarbereich z. B. aus hydrodynamischen Gesichtspunkten eine deutliche Erhöhung der Punktmenge erforderlich, was nur bei der Verwendung unstrukturierter Elemente in einem Gesamtmodell praktikabel ist.

2.1 Modellrand

Die Abmessungen und Berandung des Nordseemodells basiert im Tiefwasserbereich im Wesentlichen auf den Daten aus dem Vorhersagemodell des BSH. Das Modellgebiet erstreckt sich

- im Norden:
von Wick ($\lambda = 3^{\circ} 5' W$, $\varphi = 58^{\circ} 27' N$) auf einer Linie bis südöstlich von Fair Island ($\lambda = 0^{\circ} 45' W$, $\varphi = 59^{\circ} 15' N$) und von dort entlang des Breitengrades ($\varphi = 59^{\circ}$) bis nach Norwegen
- im Westen:
entlang einer Linie etwa Plymouth/Ile de Batz, entlang $\lambda = 4^{\circ} 5' W$
- im Osten:
in der Ostsee etwa entlang des 13. Längengrades (Ost) in der Mecklenburger Bucht
- in den Ästuaren:
 - Ems bis Papenburg,
 - Weser bis zur großen Weserbrücke und
 - Elbe bis Geesthacht.

Der seeseitige Rand entspricht somit dem Modell von SÜNDERMANN (1974) und BACKHAUS (1980) bzw. dem operationellen Vorhersagemodell des BSH (MÜLLER-NAVARRA u. MITTELSTAEDT, 1987).

Die Berandung der Inseln und der Küstenlinie im Bereich der Deutschen Bucht wurden unter Zuhilfenahme der Übersichtskarte der KUEDAT (BAW, SEITZ u. ZEH, 1996) in das Modell eingearbeitet. Hier werden konsistent die Rand- und Messdaten auf den Gitterstreifen 3 (Gauss-Krüger/Bessel Ellipsoid) umgerechnet und zusammenhängend dargestellt.

Auf der Abb. 1 ist die Tiefenverteilung für die Nordsee einschließlich der Deutschen Bucht und der Ästuarare dokumentiert und gibt einen Überblick über die Ausdehnung des gesamten Modellgebietes.

2.2 Topographie

Die Topographie des Nordseemodells basiert im Tiefwasserbereich auf den Modelltiefen aus dem Vorhersagemodell des BSH. Zur Nachbildung der komplexen hydrodynamischen Vorgänge im Küstenbereich wurden die in der BAW-DH vorhandenen Gesamtästuarmodelle herangezogen.

Hierbei wurden die Tiefenstrukturen der Ästuarare in vergrößerter, aber näherungsweise volumentreuer Nachbildung in das Nordseemodell übernommen.

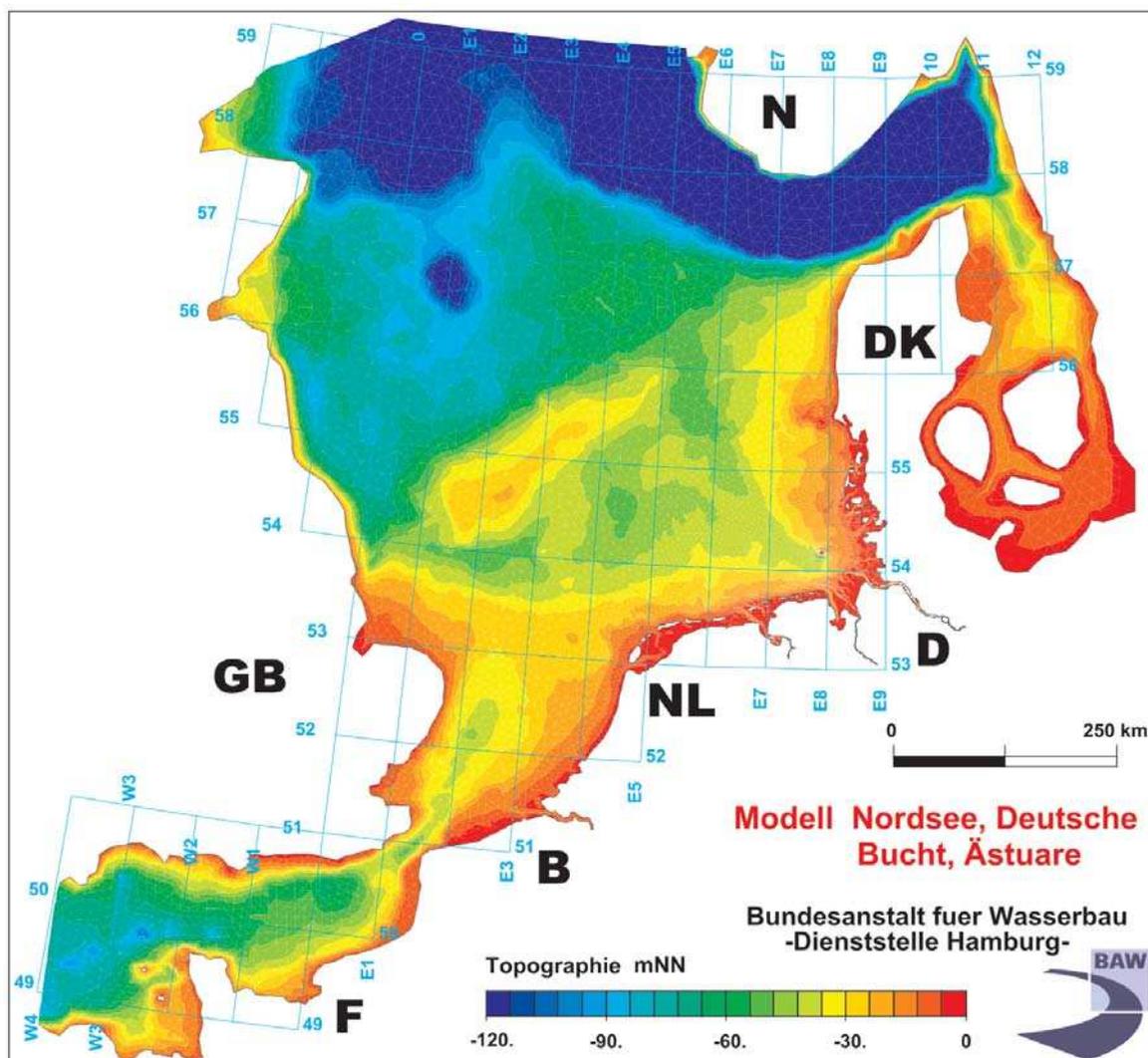


Abb. 1: Tiefenisflächen in der Nordsee, der Deutschen Bucht einschließlich der schematisierten deutschen Ästuar

Folgende Gebiete wurden lokal verfeinert:

1. Zwischen dem Kanal von Dover und dem Westrand (Normandie/Wales) wurden die Daten aus dem Kanalmodell von 1987 (Testdatensatz LE PROVOST u. VERBOOM, 1985) benutzt (vgl. hierzu auch WERNER u. LYNCH, 1988; WALTERS, 1987; GRAY u. DROLET, 1987).
2. Das holländische Küstenvorfeld, einschließlich der Inseln, wurde durch Digitalisierung von Seekarten verfeinert.
3. Das Seegebiet um Helgoland sowie die Berandungen der beiden Inselteile wurden durch Daten aus dem Helgolandmodell der BAW-DH überarbeitet und z. T. stark verfeinert.
4. Die Außenems landwärts Borkum bis in die Unterems stromauf der Ledamündung bis Papenburg sowie der gesamte Dollart wurden auf der Grundlage des Emsästuarmodells der BAW-DH mit hoher Punktdichte in das Nordseemodell eingearbeitet.
5. Der Bereich zwischen Juist und Spiekeroog wurde anhand von digitalisierten Seekarten verfeinert.
6. Die Jade, einschließlich Außenjade/Wangerooge, Innenjade, Jedefahrwasser und Jadebusen, wurde durch vorhandene Modelltiefen der BAW-DH in das Nordseemodell eingearbeitet.

7. Im Weserästuar wurden folgende Bereiche auf der Grundlage des Jade-Wesermodells neu aufbereitet: Außenweser einschließlich HoheWegWatt und Eversand sowie die Unterweser bis zur großen Weserbrücke.
8. Das Wattgebiet zwischen Knechtsand und Till bis Neuwerk/Scharhörn wurde anhand von Peildaten des BSH neu überarbeitet.
9. Die gesamte Tideelbe von Bake A/Z bis Geesthacht wurde durch die vorhandene Modelltopographie des Elbmodells der BAW-DH volumentreu in das Nordseemodell übernommen. Hierbei wurden jedoch nicht alle Hafengebiete bzw. Nebenarme berücksichtigt.
10. Nördlich der Elbmündung (Meldorfer Bucht) bis Eiderstedt wurden Tiefenwerte aus digitalisierten Seekarten zur Modellverfeinerung herangezogen.
11. Durch das Amt für ländliche Räume (ALR) in Husum wurde der BAW-DH für das gesamte Nordfriesische Wattenmeer, einschließlich der Inseln, Außensände und Wattrinnen, eine gute Datengrundlage gegeben. Hierdurch konnte die bisherige Modelltiefenverteilung erheblich verbessert werden.
12. Durch Digitalisieren von Seekarten wurde das dänische Wattenmeer zwischen Rømø und Blåvandshuk in der Nachbildung der Tiefen und Deichlinien im Modell verbessert.
13. Netzverdichtungen mit einer Erhöhung der Auflösung wurden an vielen anderen Positionen im Modellgebiet anhand von Einzelpunkten oder Linien vorgenommen (z. B. Doggerbank, Westerschelde, ...).

Auf Abb. 2 wird die heterogene Datengrundlage zum Aufbau des Nordseemodells im Küsten- und Ästuarbereich der Deutschen Bucht deutlich. Hierauf sind die verschiedenen Zeiten der Peilungen bzw. Modelltiefen erkennbar. In den Modelltiefen sind auch wieder Datensätze aus verschiedenen Jahren/Messungen eingearbeitet (z. B. Nordfriesland teilweise von 1975 bis überwiegend 1996–1999).

Zur Dokumentation der vielgestaltigen und oft stark wechselnden Tiefenstrukturen im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht wird auf Abb. 3 der Küstenraum von Borkum bis Föhr so wiedergegeben, wie er im Nordseemodell enthalten ist. Die stark strukturierten Tiefenreliefs im Küstenvorfeld und besonders in den Mündungsbereichen der Ästuarbecken belegen hier die Notwendigkeit der Netzverdichtungen.

Als Beispiel zur vergrößerten Tiefennachbildung der Ästuarbecken im Nordseemodell wird ein Ausschnitt der Elbe (Mühlenberger Loch) der Topographie aus dem Gesamtästuarmodell gegenübergestellt. Für diesen Ausschnitt wurden im Ästuarmodell rund 3600 Knotenpunkte, im Nordseemodell lediglich 520 Knotenpunkte also rund 1/7 verwendet. Die Tiefenverteilungen für das Ästuarmodell (Abb. 7) und für das Nordseemodell (Abb. 8) weisen keine signifikanten Unterschiede in den Grobstrukturen auf. Die Verringerung der Elementanzahl im Nordseemodell wird durch den Vergleich der Gitternetze belegt (siehe Abb. 5 und 6).

Die volumentreue Nachbildung der Elbmodelltopographie im Nordseemodell wird durch die Auswertung der Niveauflächenverteilung und der Volumensummenkurve für den o.g. Ausschnitt der Elbe auf Abb. 4 gegeben. Hieran zeigt sich, dass durch die geeignete Anordnung der Dreieckselemente auch eine starke Verringerung der Knotenanzahl die Nachbildung der Topographie nicht signifikant verändert.

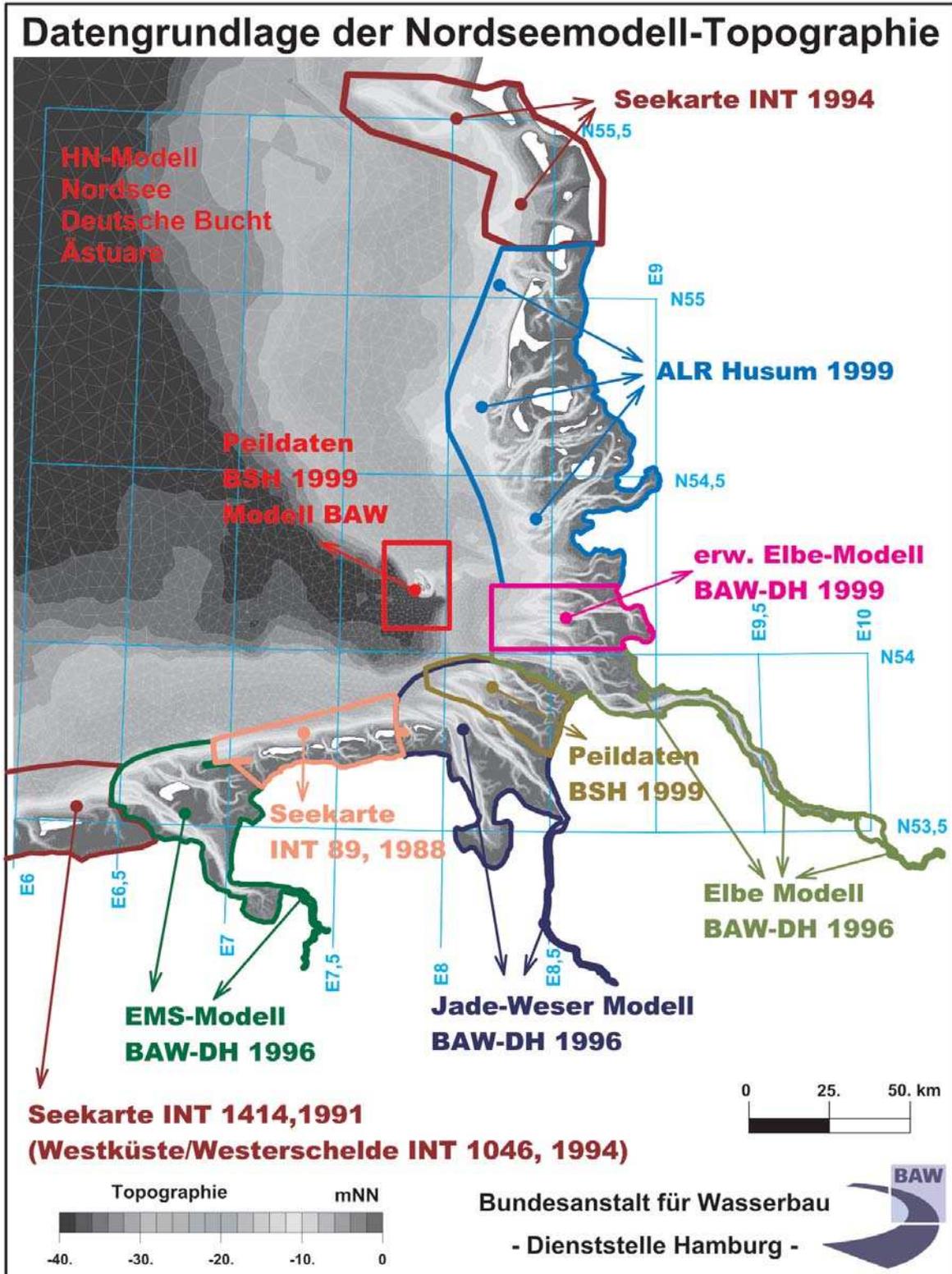


Abb. 2: Grundlage der Topographie des Nordseemodells in der Deutschen Bucht

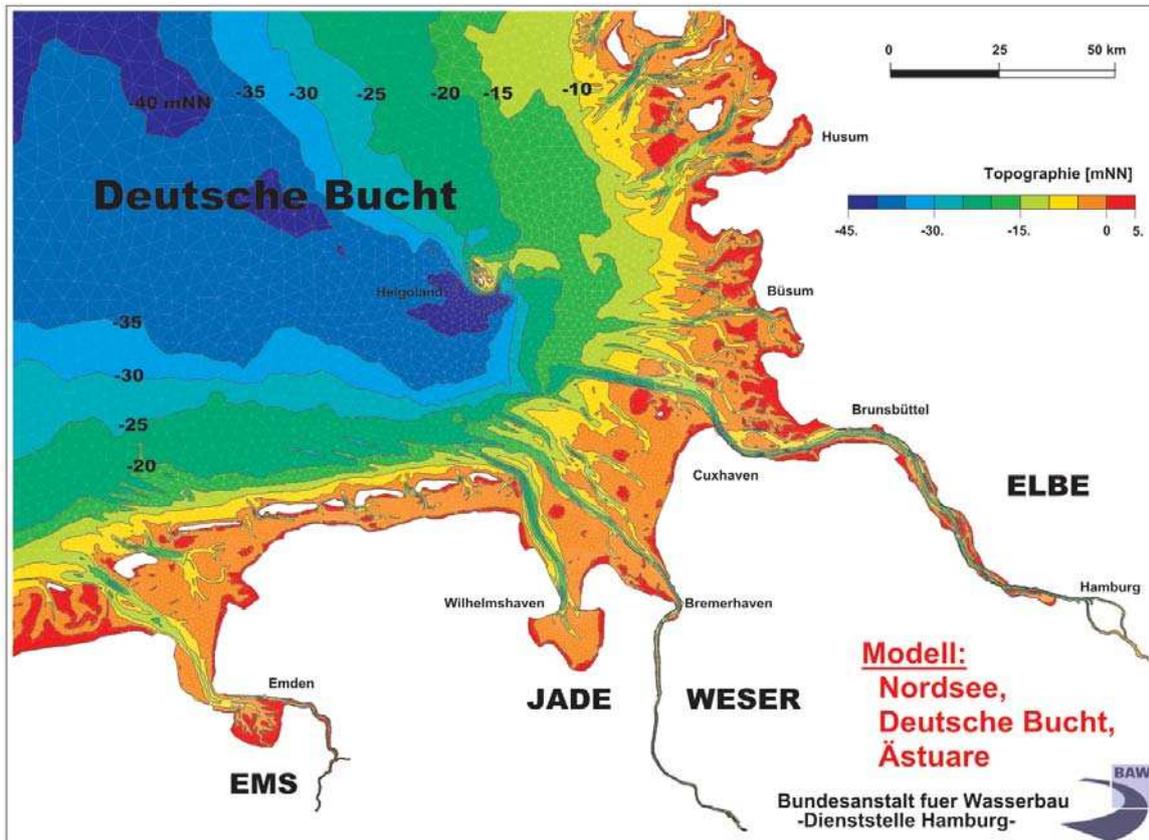


Abb. 3: Tiefenisoflächen in der Deutschen Bucht und den deutschen Ästuaren

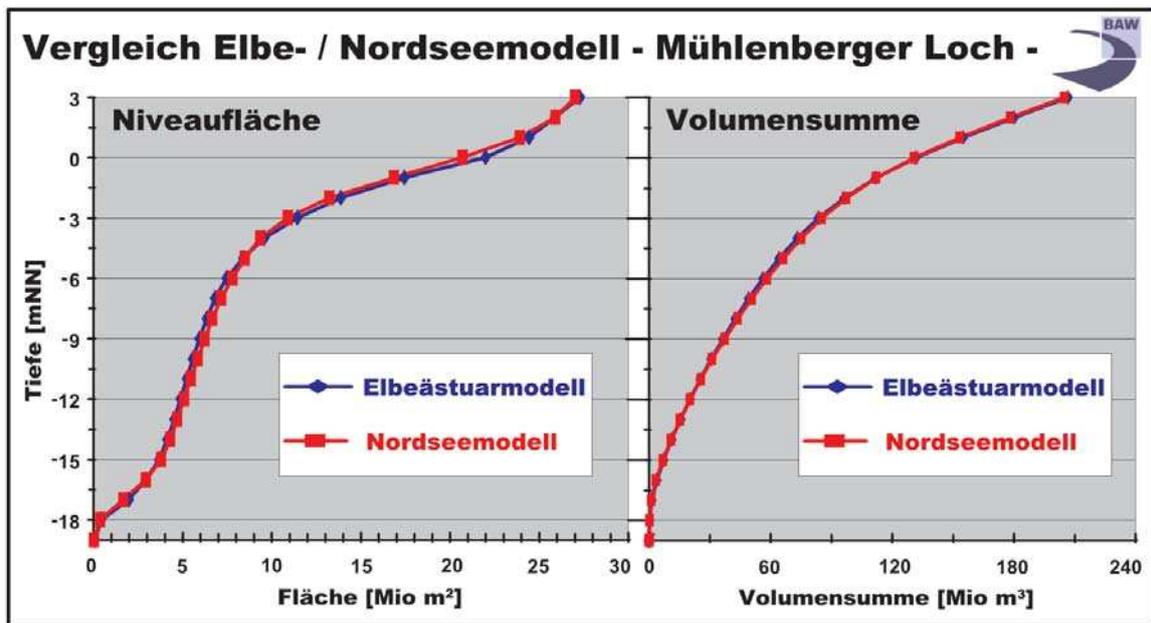


Abb. 4: Vergleich der Niveauflächen und Volumensummen zwischen Ästuarmodell der Elbe und Nordseemodell (Ausschnitt Mühlenberger Loch)

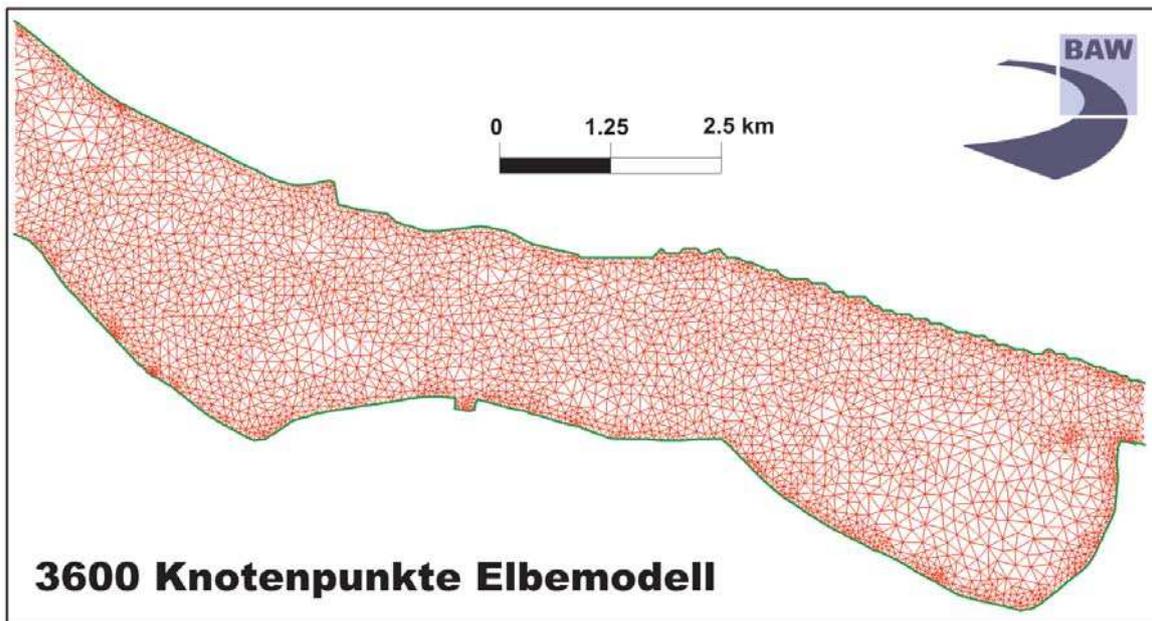


Abb. 5: Gitternetz im Ästuarmodell: **3600 Knotenpunkte**

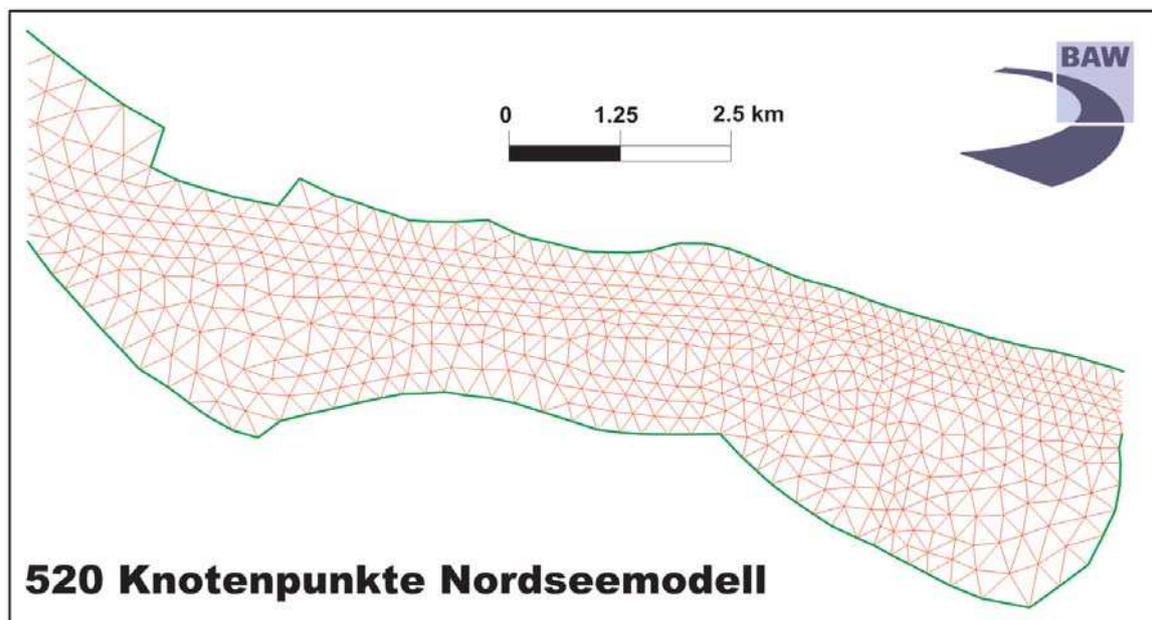


Abb. 6: Gitternetz im Nordseemodell: **520 Knotenpunkte**

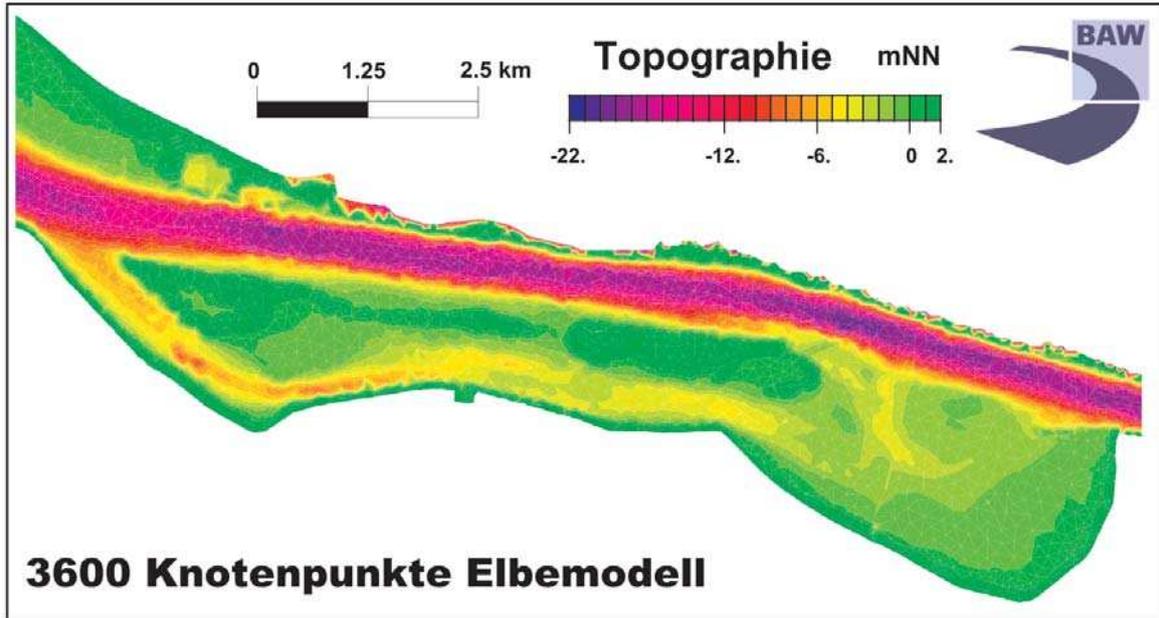


Abb. 7: Tiefen im Ästuarmodell: **3600 Knotenpunkte**

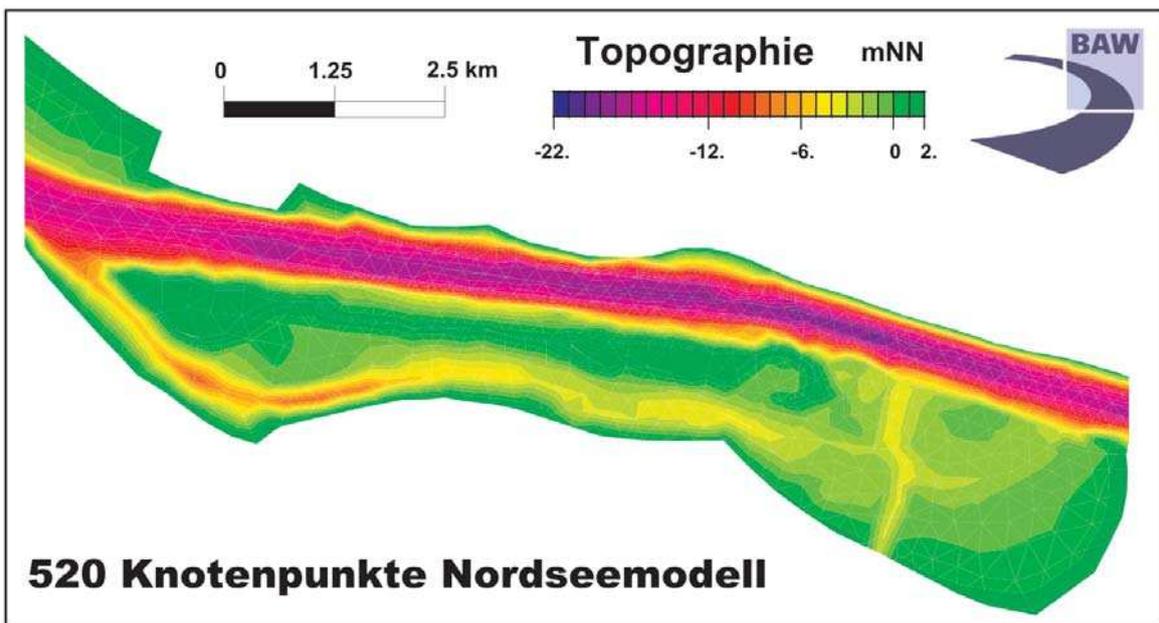


Abb. 8: Tiefen im Nordseemodell: **520 Knotenpunkte**

2.3 Rechenmodell

Die BAW-DH verwendet für die zweidimensionale Berechnung der Tidedynamik das Modellverfahren TELEMAC2D (HERVOUET u. VAN HAREN, 1996). Dieses Rechenverfahren basiert auf Dreiecken zur Approximation der Topographie und zur Ausgabe der Zustandsgrößen auf den Knotenpunkten. Die Wirkung zeit- und ortsvariabler Windfelder und des Luftdruckes sowie die Wirkung der Corioliskraft sind modellseits berücksichtigt.

Der in Kürze geplante Einsatz des 2D/3D-Modellverfahrens UnTRIM (CASULLI, 1998) auf der Basis „proportionierter“ Dreiecke ist für das Nordseemodell geplant. Hierdurch ist eine dreidimensionale Simulation von Hydrodynamik und Transport auf der Basis unstrukturierter Netze möglich.

Die Restriktionen der Dreiecke bei der Verwendung von UnTRIM setzen einen maximalen Kantenwinkel von 90° voraus (orthogonales Gitternetz). Durch den Einsatz des JAVA-basierten Gitternetzpreprozessors JANET (MILBRADT u. LIPPERT, 2002) wurden die Kantenwinkel auf maximal 90° und minimal 30° optimiert. Dieses Dreiecksnetz stellt, auch aus rechentechnischen Überlegungen heraus, ein optimales Tiefen- und Rechennetz dar, was sowohl von TELEMAC (2D/3D) als auch von UnTRIM (2D/3D) benutzt werden kann. Damit sind Vergleichsrechnungen mit unterschiedlichen Rechenverfahren unter Verwendung eines exakt gleichen Rechengitters möglich, was die Prognosefähigkeit der numerischen Modellergebnisse zusätzlich absichert.

Durch das Modellgitter wird die Nordsee nördlich der Doggerbank durch relativ großmaschige Dreiecke im km-Bereich (max. = 27 km) nachgebildet. Die Deutsche Bucht ist durch z. T. wesentlich kleinere Dreiecke nachgebildet, als es auf der freien Nordsee der Fall sein muss, und die Kantenlängen der Dreiecke betragen etwa 300 bis 800 m. Die deutschen Ästuarare sind volumentreu analog der existierenden Gesamtästuarmodelle in vergrößerter Auflösung nachgebildet. Hier verringern sich die Kantenlängen bis auf minimal 80 m. Diese abgestufte Netzstruktur wird für die gesamte Nordsee auf Abb. 9 und im Bereich der Ästuarare durch die Abb. 10 deutlich.

Das Nordsee-Modell besteht zur Zeit (2003) aus rund 40 000 Knoten und benötigt für die Berechnung von rd. 700 Tiden (1 Jahr) ca. 16 Stunden bei einem Zeitschritt von 15 Sekunden unter Verwendung von 16 Prozessoren der Mehrprozessormaschine `sgi_origin O3900`. Dieses erlaubt zukünftig die Berechnung von Zeiträumen im Bereich von Jahren bzw. eine deutliche Verfeinerung von Teilbereichen (Erhöhung der Knotenanzahl). Durch den Einsatz eines übergeordneten Modells bestehen zwei Untersuchungsvarianten:

- **Gesamtmodell mit lokalen Netzverfeinerungen:**

Durch die Anwendung unstrukturierter Netze besteht je nach Aufgabenstellung die Möglichkeit lokale bzw. regionale Verfeinerungen im Gesamtmodell der Nordsee (z. B. Ästuarabschnitte, Wattgebiete, Teilgebiete im Küstenvorfeld, ...) mit einer z. T. deutlich höheren Auflösung in das Gesamtmodell einzubinden; eine Berechnung von seeseitigen Randwerten für ein separates Ausschnittmodell entfällt hierbei. Beispiele hierzu werden im Kapitel 5.1 näher aufgeführt.

- **Modell zur Berechnung von Randwerten:**

Bei der Anwendung separater eigenständiger Modelle innerhalb der Deutschen Bucht können durch die synoptische Berechnung mit dem HN-Modell der Nordsee für alle möglichen Positionen (offener Modellrand) eines Teilmodells zeitvariable Randwerte berechnet werden. Durch diese Methode lassen sich einerseits die Lage möglicher Ästuarberandungen, andererseits aber auch die Art der Randbedingungen (Wasserstand, Strömung bzw. Durchfluss sowie Transportgrößen) optimieren. Langfristig kann die Steue-

zung der Gesamtästuarmodelle durch spezielle Messstationen in den Mündungsbereichen entfallen. Die Aussagefähigkeit zur Beurteilung von Baumaßnahmen ist nicht mehr durch die Lage der seeseitigen Ästuarberandung limitiert.

Einige Anwendungsbeispiele finden sich in Kap. 5.2.

3. Modellsteuerung

Die genaue Kenntnis der räumlichen und zeitlichen Variation der Steuergrößen ist entscheidend für die Qualität der Modellergebnisse im gesamten Lösungsgebiet. An den offenen seeseitigen Rändern des Nordseemodells (Nordrand: Schottland–Norwegen, Westrand: Frankreich–England) werden die Tidewasserstände und am landwärtigen Rand der Ästuar die Durchflüsse als Randwerte vorgegeben. Am seeseitigen Modellrand werden die astronomischen Tidewasserstände in das Modell eingesteuert; die langperiodischen Wasserstands-

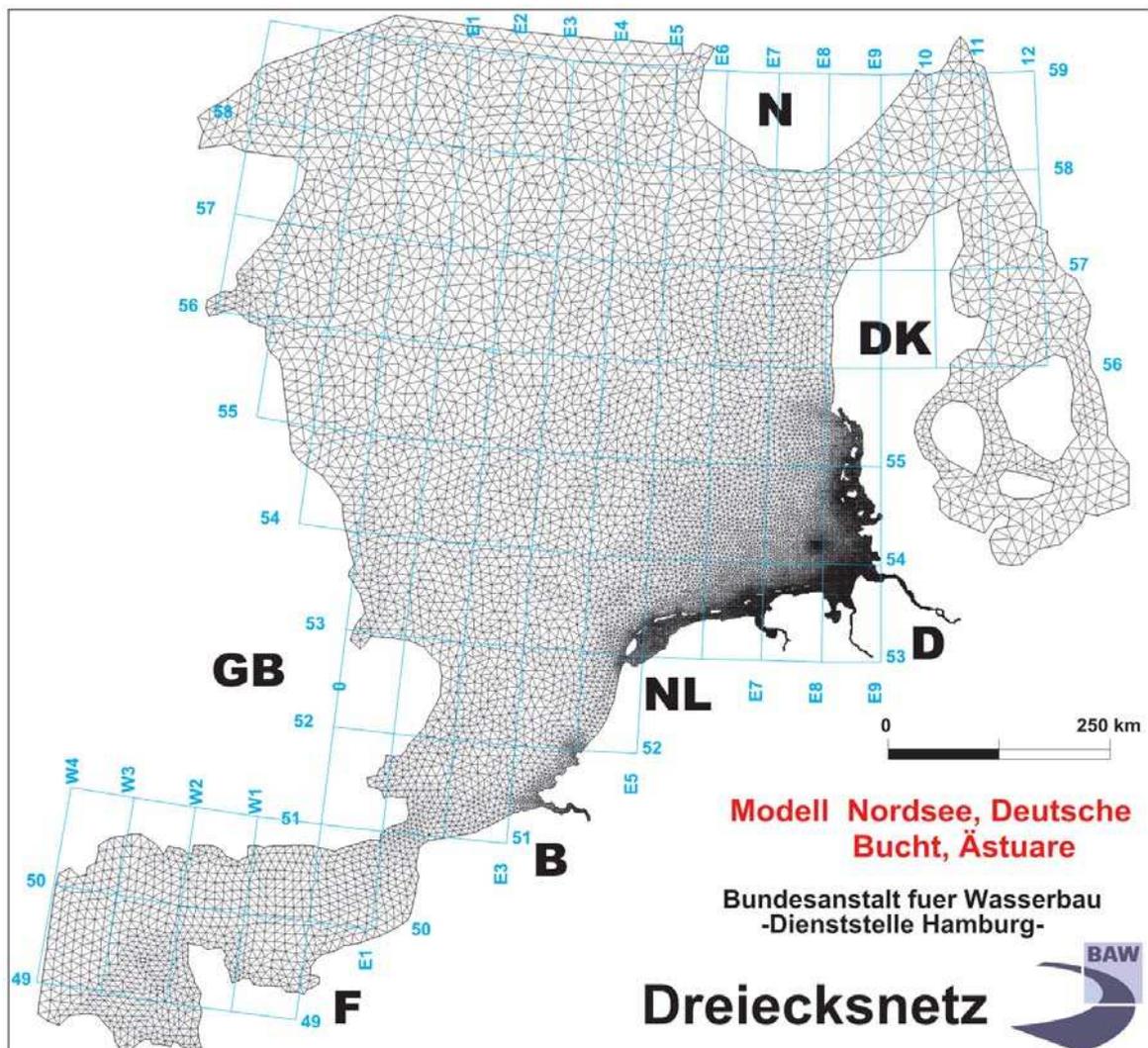


Abb. 9: Verteilung der Dreieckselemente in der Nordsee einschließlich der schematisierten deutschen Ästuar

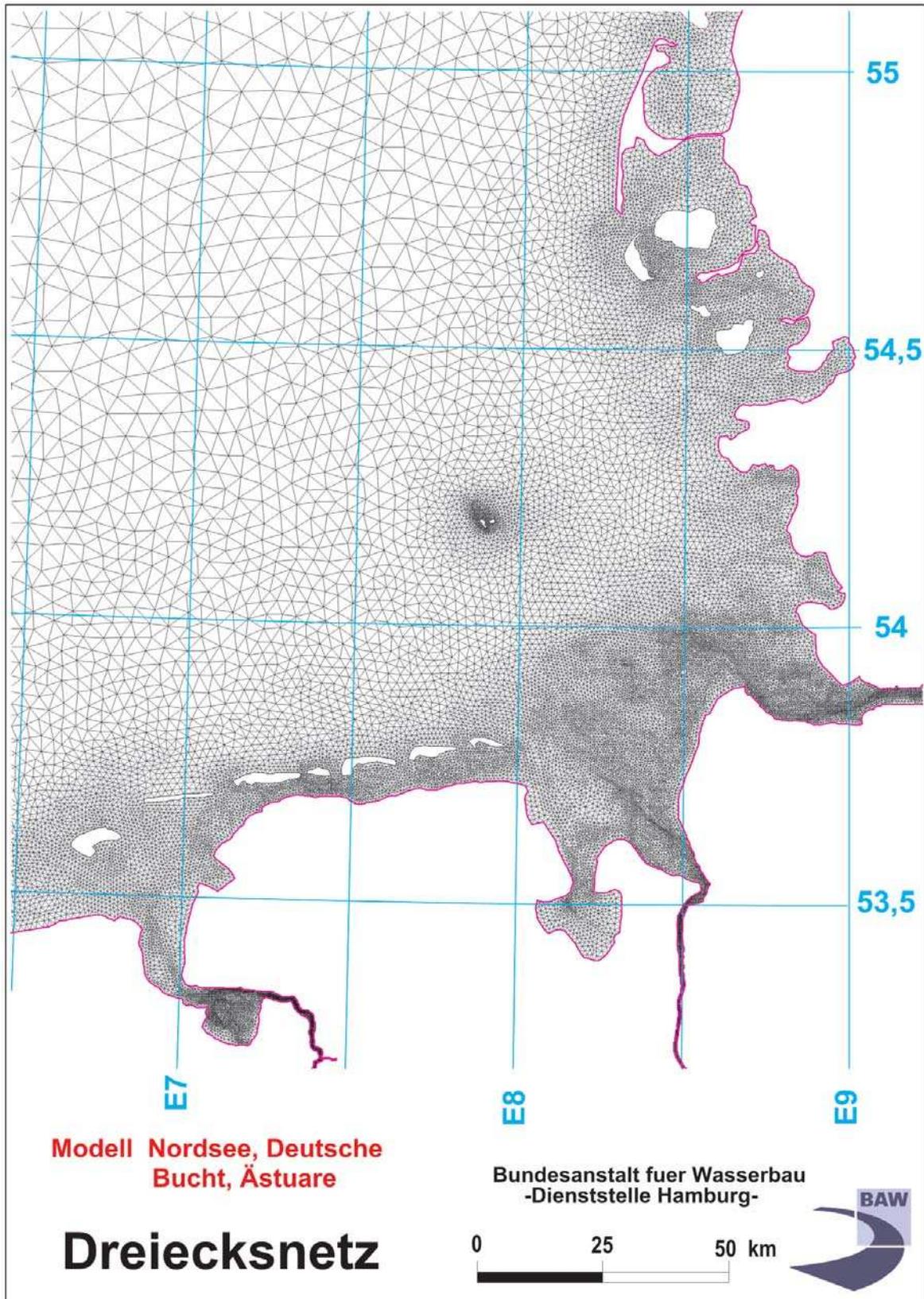


Abb. 10: Elementnetz des Nordseemodells in der Deutschen Bucht mit den Ästuaren

schwankungen müssen aus dem Vergleich mit Pegelmessungen gewonnen werden. Die Wind- und Luftdruckschwankungen werden im gesamten Lösungsgebiet durch orts-/zeitvariable Zustandsgrößen berücksichtigt, die aus vorangegangenen meteorologischen Simulationsrechnungen stammen.

3.1 Tideanalyse

Eine kurze Zusammenstellung der Klassifizierung bzw. Analyse von Tidewasserständen soll das Verständnis der Modellsteuerung im nächsten Kapitel erhöhen. Allgemein lässt sich die Tide bei der harmonischen Analyse in drei Arten unterteilen (z. B. HORN, 1948):

astronomische Tiden: Tiden die sich aus der Entwicklung des gezeitenerzeugenden Potentials durch die Berücksichtigung der Konstellationen von Sonne, Mond und Erde herleiten lassen.

Seichtwassertiden: Das Superpositionsprinzip der einzelnen Partialtiden (lineare Theorie) gilt nicht mehr, wenn die Amplituden der Tiden im Verhältnis zur Wassertiefe nicht sehr klein bleiben. Durch Bodenreibung und Strömung (Advektion) verformt sich die Tidewelle und es entstehen sog. Seichtwassertiden. Diese werden als **Obertiden** durch ein ganzzahliges Vielfaches der Argumente der astronomischen Tiden gebildet oder als **Verbundtiden** durch Wechselwirkung verschiedener astronomischer Tiden erzeugt. Diese nichtlinearen Effekte beinhalten auch die Reflexion der Tidewelle sowie Oberwassereinflüsse.

meteorologische Tiden: Als meteorologische Tiden werden Wasserspiegelauslenkungen bezeichnet, die durch Wind- und Luftdruckänderungen sowie durch thermische und haline Prozesse (Vereisung, Dichte, Temperatur- und Schichtungsänderungen) ausgelöst werden. Diese reichen von jährlichen/halbjährlichen Schwebungen bis hin zu Tagestiden (DIETRICH et al., 1975).

Alle Tidearten treten gleichzeitig auf und sind allein anhand ihrer Periode nicht eindeutig zu trennen. Für den Modellbetrieb bedeutet dieses, dass

- die astronomischen Tiden durch die Wasserstandssteuerung am offenen Modellrand an Hand der astronomischen Konstanten vorgegeben werden,
- die Seichtwassertiden durch eine möglichst genaue Reproduktion der komplexen Tiefenstruktur im Küstenvorfeld und den Ästuaren (Reibung, Reflexion), der berechneten orts-/zeitvariablen Strömungszustände sowie der Vorgabe von Oberwassermengen generiert werden und
- die langperiodischen Wasserstandsschwankungen durch Vergleich mit Pegelmessungen und rekursiv adaptierten Randwerten berücksichtigt werden.

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die Methoden zur Beschreibung der Tidekurve gegeben, um die genannten Effekte zu demonstrieren. Eine ausführliche Dokumentation hierzu wurde unter anderem im Rahmen des KFKI-Forschungsprojektes: **Charakterisierung der Tidekurve** (GÖNNERT et al., 2004) erstellt.

3.1.1 Fast-Fourier-Analyse

Mit Hilfe der Spektralanalyse wird die Größe der Amplituden im Spektrum berechnet. An Hand der maximalen Amplituden lassen sich die signifikanten Schwingungen (z. B. der Partialtiden) bestimmen; dies wird beispielhaft auf der Abb. 11 für den Pegel Helgoland gezeigt. Hier lassen sich die Frequenzen der Partialtiden von einem Tag (K1, O1), einem hal-

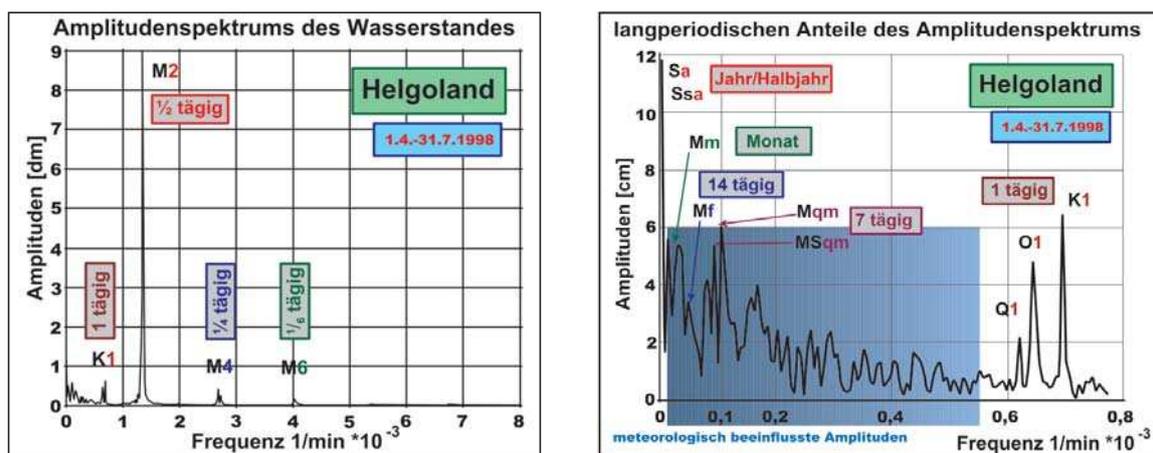


Abb. 11: Amplitudenspektrum am Pegel Helgoland

ben Tag (M2, S2) bis hin zu den Seichtwassertiden (M4, M6) eindeutig zuordnen. Im Bereich zwischen den jährlich-/halbjährlichen Tiden (Sa, Ssa) und den Tagestiden werden eine Reihe von Amplituden analysiert, bei denen die Zuordnung zu astronomischen Partialtiden mit fest vorgegebenen Frequenzen nicht immer möglich ist (vergleiche Abb. 11 sowie Analysen der langperiodischen Partialtiden in Kapitel 3.2.1). Prozesse mit Perioden von Tagen bis zu mehreren Monaten lassen sich nicht eindeutig astronomisch begründen, sondern überlagern sich mit meteorologisch bedingten Wasserstandsschwankungen sowie Fernwellen aus dem Nordatlantik.

3.1.2 Partialtidenanalyse

Bei der Partialtidenanalyse der Tide wird das Signal des Wasserstands in eine Reihe von Sinus-Gliedern mit unterschiedlicher, fest vorgegebener Frequenz zerlegt. Die Frequenzen entsprechen der zeitlichen Veränderlichkeit der Bahnlinien von Mond und Sonne. Die Stellung von Mond und Sonne zur Erde wird durch die Entfernung vom Erdmittelpunkt sowie durch die Breite und Länge, bezogen auf die Ekliptik, beschrieben. Alle drei Größen sind periodische Funktionen von fünf Winkeln (s, h, p, N und q) zur Zeit T. Die Bedeutung und Periode dieser Winkel sind in der Tab. 1 angegeben.

Tab. 1: Übersicht der fünf astronomischen Bahnparameter (Winkel) zur Berücksichtigung der Stellung von Sonne und Mond bei der Partialtidenanalyse

Nr.	Name	Periode	Bedeutung
1	s	27,3216 Tage	mittlere Länge des Mondes (tropischer Monat)
2	h	365,242 Tage	mittlere Länge der Sonne (tropisches Jahr)
3	p	8,847 Jahre	mittlere Länge des Mondbahnperigäums (Erdnähe)
4	N	18,613 Jahre	aufsteigender mittlerer Knoten der Mondbahn (Umlaufzeit)
5	q	20940 Jahre	mittlere Länge des Sonnenbahnperiheliums (Sonnennähe)

Die halb- und eintägigen Tiden sind in der Nordsee/Deutschen Bucht dominant und prägen dort den Gezeitenzyklus. Am stärksten ist die Mondtide M2, gefolgt von der Sonnentide S2, die zusammen den Spring-Nippzyklus bestimmen. Die Seichtwassertiden im

Küstenbereich (M4, M6) erreichen teilweise Amplituden von 15–20 cm. Eine Übersicht der hier analysierten bzw. zur Wasserstandssteuerung verwendeten Partialtiden gibt die Tab. 2.

Tab. 2: Partialtiden zur Analyse bzw. zur Wasserstandssteuerung der Nordsee am Nordrand (Periode [hh:mm])

Nr.	Abk.	ω [Grad/h]	Periode	Argumente	Bezeichnung/Bemerkung
Langperiodische Tiden					
1	Sa	0,041067	355 d	h-q	Ellipt. Tide 1. Ordnung zu S0
2	Ssa	0,082137	177,5 d	2h	Deklinationstide zu S0
3	Mm	0,544374	27,55 d	s-p	Ellipt. Tide 1. Ordnung zu M0
4	MSf	1,015895	14,77d	2s-2h	Variationstide zu M0, Spring/Nipp-Zyklus
5	Mf	1,098033	13,66 d	2s	Deklinationstide zu M0
6	MStm	1,569554	9,557 d	3s-2h+p	10-tägige Tide
7	MSqm	2,113928	7,096 d	4s-2h	7-tägige Variationstide
8	Mqm	2,186782	6,859 d	4s-2p	7-tägige Tide 1. Ordnung zu M0
Eintägige Tiden					
9	Q1	13,398661	26:52	-3s+h+p	Ellipt. Tide 1. Ordnung zu O1
10	O1	13,943036	25:49	-2s+h	Eintägige Haupt-Mondtide
11	NO1	14,496693	24:50	-s+h+p	Ellipt. Tide 1. Ordnung zu K1
12	P1	14,958931	24:04	-h	Eintägige Haupt-Sonnentide
13	K1	15,041069	23:56	+h	Eintägige Haupt-Deklinationstide
Halbtägige Tiden					
14	3M2S2	27,968208	13:21	-3s+3h	Verbundtide: 3M2-2S2
15	2N2	27,895354	12:54	-4s+2h+2p	Ellipt. Tide 2. Ordnung zu M2
16	μ 2	27,968208	12:52	-4s+4h	Gr. Variationstide zu M2
17	N2	28,439729	12:39	-3s+2h+p	Gr. ellipt. Tide 1. Ordnung zu M2
18	ν 2	28,512583	12:37	-3s+4h-p	Gr. Evекtionstide zu M2
19	γ 2	28,911251	12:27	-2s+2p	
20	M2	28,984104	12:25	-2s+2h	Halbtägige Mondtide
21	δ 2	29,066242	12:23	-2s+4h	
22	λ 2	29,455626	12:13	-s+p	
23	L2	29,528479	12:11	-s+2h-p	
24	T2	29,958933	12:01	-h+q	
25	S2	30,000000	12:00	0	Halbtägige Sonnentide
26	R2	30,041067	11:59	+h-q	
27	K2	30,082137	11:58	+2h	Halbtägige Deklinationstide zu M2
28	η 2	30,626513	11:45	s+2h-p	
Vierteltägige Tiden					
29	3MS4	56,952312	06:19	3M2-S2	Vierteltägige Verbundtide
30	MN4	57,423832	06:16	M2+N2	Vierteltägige Verbundtide
31	M4	57,968208	06:13	2M2	Vierteltägige Haupt-Mondobertide
32	3MN4	58,512585	06:09	3M2-N2	Vierteltägige Verbundtide
33	MS4	58,984104	06:06	M2+S2	Vierteltägige Verbundtide
34	MK4	59,066242	06:05	M2+K2	Vierteltägige Verbundtide

Die langperiodischen astronomischen Tiden S_a und S_{sa} mit ein- bzw. halbjähriger Periode werden auch als „meteorologische Tiden“ bezeichnet, da sie vor allem jahreszeitliche Änderungen des Wasserstandes beinhalten (siehe Kapitel 3.2.1). Aperiodische Wasserstandsschwankungen am Rand zum Atlantischen Ozean werden im Kapitel 3.2.2 unter dem Begriff *external surges* abgehandelt. Der Einfluss des Windes auf die astronomischen Partialtiden wird im Nordseemodell nicht weiter berücksichtigt, siehe hierzu Untersuchungen mit dem ZUNO Modell (ELIAS, 2001).

3.2 Langperiodische Wasserstandsschwankungen

Unter Wasserstandsschwankungen werden hier allgemein die aperiodischen bzw. längerperiodischen Veränderungen des Wasserstandes verstanden, die sich aus langperiodischen Partialtiden und aus Fernwellen (*external surges* aus dem Nordatlantik) zusammensetzen. Diese Schwankungen sind teilweise unabhängig von der berechneten Tidedynamik innerhalb der Nordsee, die durch Partialtiden gesteuert werden und bei denen die harmonische Analyse jeweils für einen Jahreszeitraum erfolgt. Dieser Zusammenhang wird durch den Vergleich verschiedener Rechenergebnisse mit Messwerten am Pegel Cuxhaven deutlich. Durch die Simulation einer (ungestörten) Tide, die nur aus astronomischen Konstanten am Modellrand gesteuert wird, zeigen sich im Vergleich zu der Pegelmessung die auf Abb. 12 dargestellten Abweichungen. Der Einfluss des Windes über der Nordsee auf die Wasserstände in Cuxhaven wird durch den Vergleich der geglätteten Differenzen zwischen der Messung und den Rechenergebnissen ohne und mit Wind auf der Abb. 13 deutlich. Auch mit Windeinfluss sind noch Differenzen erkennbar, wobei der Trend im Mittel um rund 10 cm unter NN liegt. Dieses ist der Anteil langperiodischer Schwankungen bzw. *external surges*.

3.2.1 Langperiodische Partialtiden

Im Rahmen der Modellbildung/-steuerung ist die Analyse der Wasserstände, insbesondere am Modellrand, von großer Bedeutung. Hierbei ist es wichtig, ob die in Kapitel 3.1.1 durch die Fourier-Analyse aufgezeigten langperiodischen Frequenzen durch eine Partialtidenanalyse eindeutig zu bestimmen sind. Hierfür wurden Pegelmessungen in Aberdeen (Schottland) über einen Zeitraum von 19 Jahren durch eine Partialtidenanalyse untersucht. Wichtig ist die Ermittlung der Variabilität der langperiodischen Partialtiden, mit Perioden zwischen einem Jahr (S_a) und 7 Tagen (MS_{qm} , M_{qm}) (vergleiche Nummern 1–8 in Tab. 2). Die Darstellung der Analysen auf Abb. 14 zeigt die Verteilung der Amplituden und Phasen sowie die Variation dieser Werte bezüglich ihres langjährigen Mittelwertes. Die größten Amplituden mit 6,5–13 cm wurden für die einjährigen Partialtiden (S_a) ermittelt, wobei die Phasen zwischen 280 und 350 Grad schwankten. Alle anderen Partialtiden wiesen deutlich geringere Amplituden auf. Die Variation der Amplituden und besonders der Phasen war hier sehr groß. Für eine Bestimmung der Wasserstände am Modellrand (Steuerung) reichen die astronomischen Konstanten allein nicht aus.

Die Berücksichtigung der langperiodischen Wasserstandsschwankungen erfolgt im Modell durch Differenzbildung zwischen Pegelmessungen und Simulationsergebnissen aus Tide plus Wind (vgl. Kap. 3.4). Der Einfluss von Tidezyklen mit Perioden von einem bis mehreren Jahrzehnten ist noch nicht endgültig erforscht (JENSEN u. MUDERSBACH, 2002; OOST et

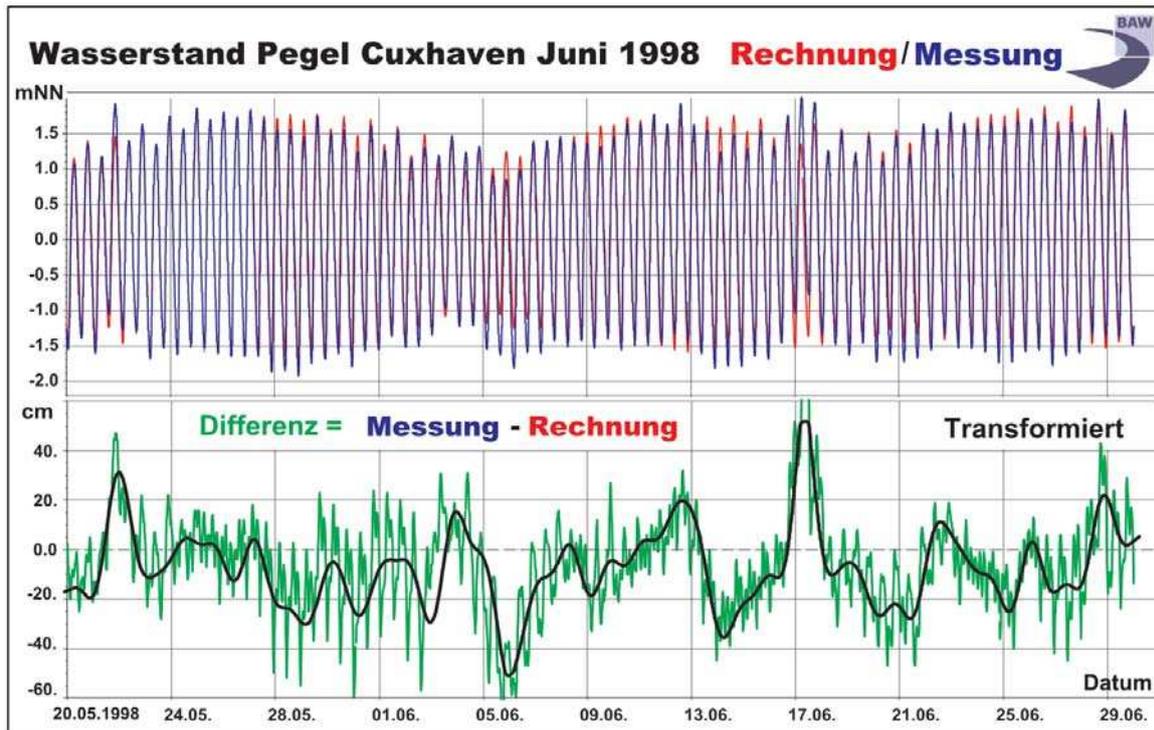


Abb. 12: Vergleich der gemessenen Wasserstände im Juni 1998 am Pegel Cuxhaven mit den Ergebnissen des Nordseemodells bei astronomischer Randsteuerung. Die Differenzen wurden durch eine Fast Fourier Transformation geglättet

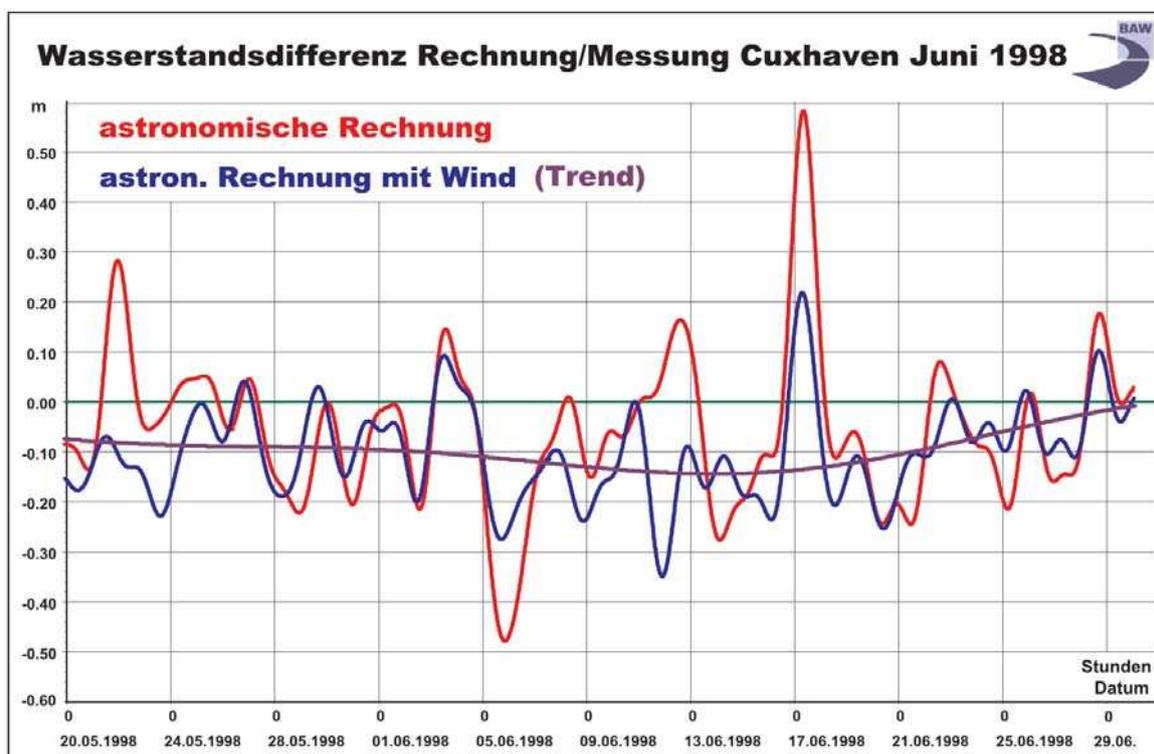


Abb. 13: Differenz der Wasserstände am Pegel Cuxhaven (Juni 1998) zwischen Messung und Ergebnissen des Nordseemodells mit astronomischer Randsteuerung und mit Windeinfluss

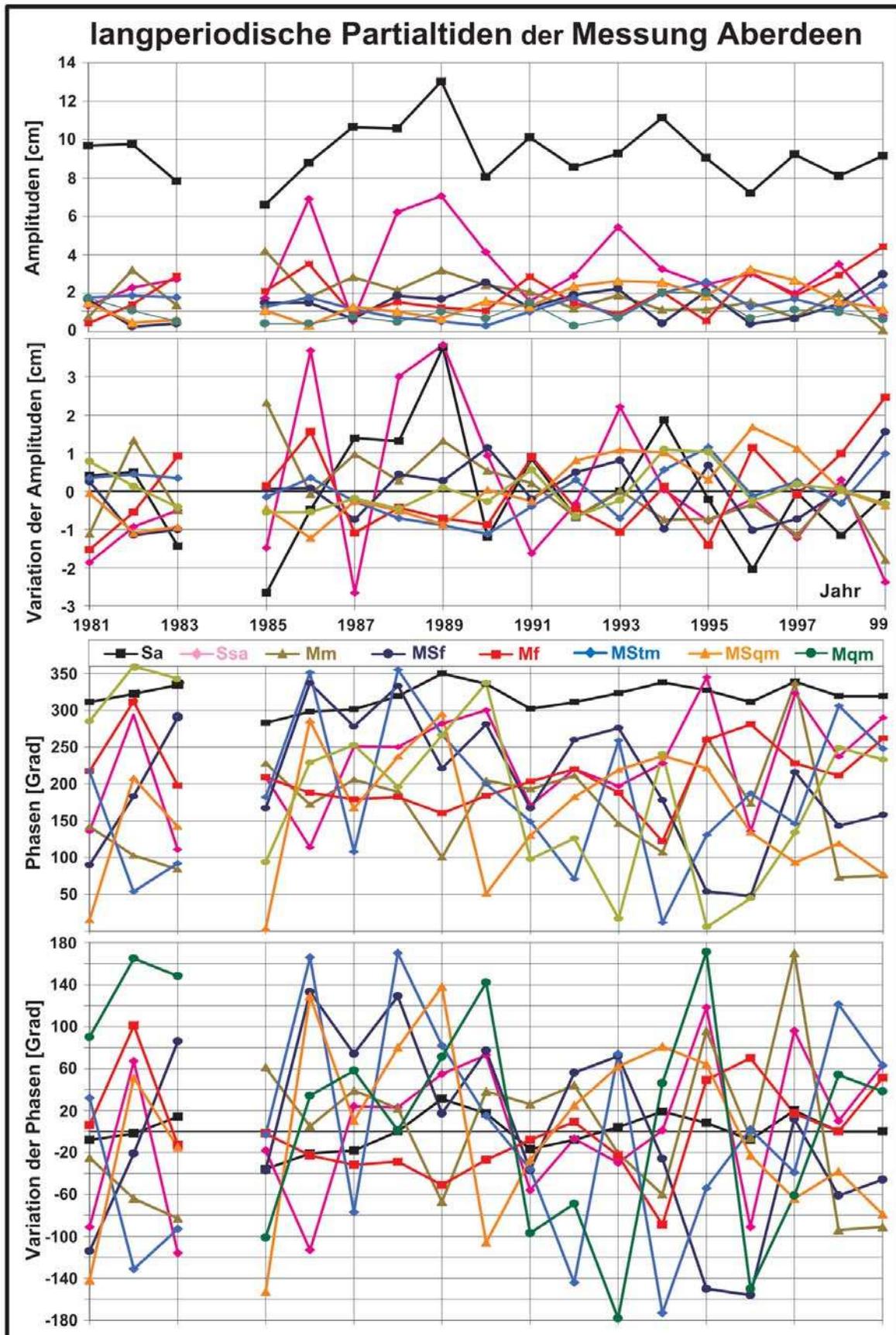


Abb. 14: Langperiodische Partialtiden in Aberdeen (1981–1999)

al., 1993). Der wichtigste längerfristige Tidezyklus ist die Nodaltide mit einer Periode von 18,61 Jahren (Winkel N auf Tab. 1). Die Veränderung des mittleren Meeresspiegels ist ebenfalls nicht sicher prognostizierbar, weshalb beide Effekte im Modellbetrieb durch den Vergleich mit gemessenen Wasserständen berücksichtigt werden.

3.2.2 Fernwellen

Die Ursachen und Wirkungen von Fernwellen (external surges) sind noch Gegenstand weiterer Forschungen; der Verlauf der internal surges in der Nordsee ist noch nicht abschließend geklärt. Der Einfluss von Fernwellen aus dem Atlantik auf das Tidegeschehen in der Nordsee ist insbesondere bei Starkwindlagen westlich von Irland bzw. im Nordatlantik nicht zu vernachlässigen. Fernwellen propagieren entlang der Ostküste von Schottland/England bis in die Deutsche Bucht und beeinflussen hier die Wasserstände. Untersuchungen z. B. von KOOPMANN (1962) und HEAPS (1969) zeigen anhand von Pegelauswertungen und Modellrechnungen, dass bei Sturmflutereignissen diese **external surges** z. B. in Aberdeen Größenordnungen von rund 0,80–1,0 m aufweisen können. Die gleiche Größenordnung wurde für den Pegel Cuxhaven beobachtet. Hierbei trat eine Phasendifferenz von 13 Stunden und 30 Minuten zu Aberdeen auf. Der typische Verlauf von Fernwellen zeigt sich als Differenz zwischen den Pegelmesswerten und den durch die harmonischen Konstanten vorausgerechneten Wasserständen. Auf der Abb. 16 wird dieses für den Monat März 1994 dokumentiert, wobei die Differenzwerte, bedingt durch Phasenverschiebungen zwischen Messung und Rechnung mit rein astronomischen Randwerten, geglättet wurden. Eine geglättete Darstellung der external surges über 36 Monate belegt auf Abb. 15 die langfristige Variabilität dieser Wasserstandsschwankungen, die nicht durch die Tidedynamik und das Wettergeschehen über der Nordsee bestimmt werden.

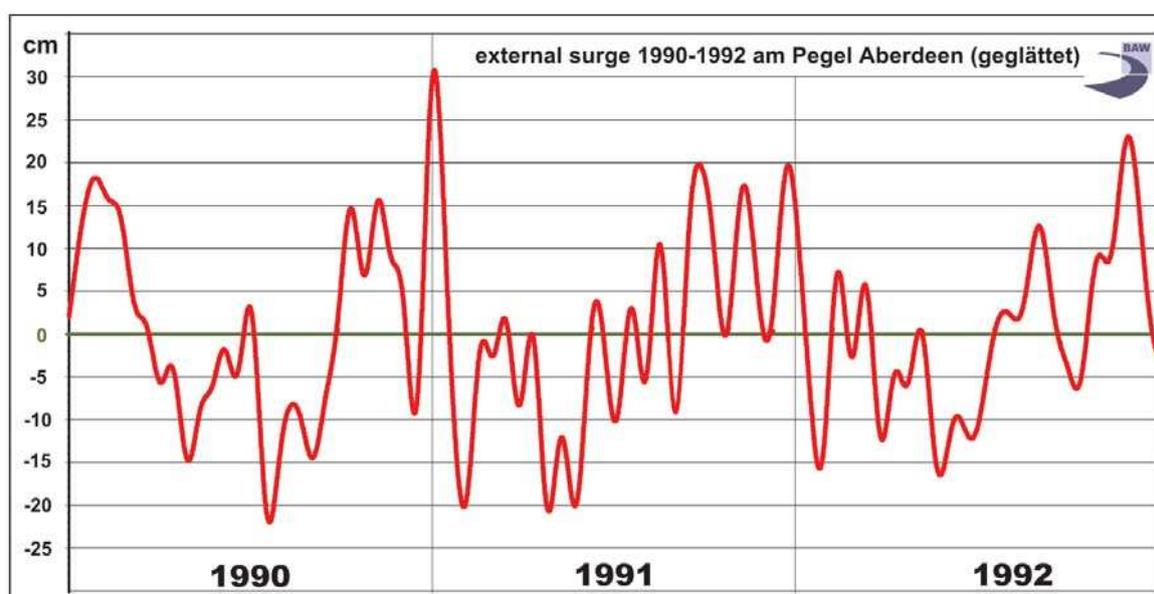


Abb. 15: External surge in Aberdeen für 1990 bis 1992

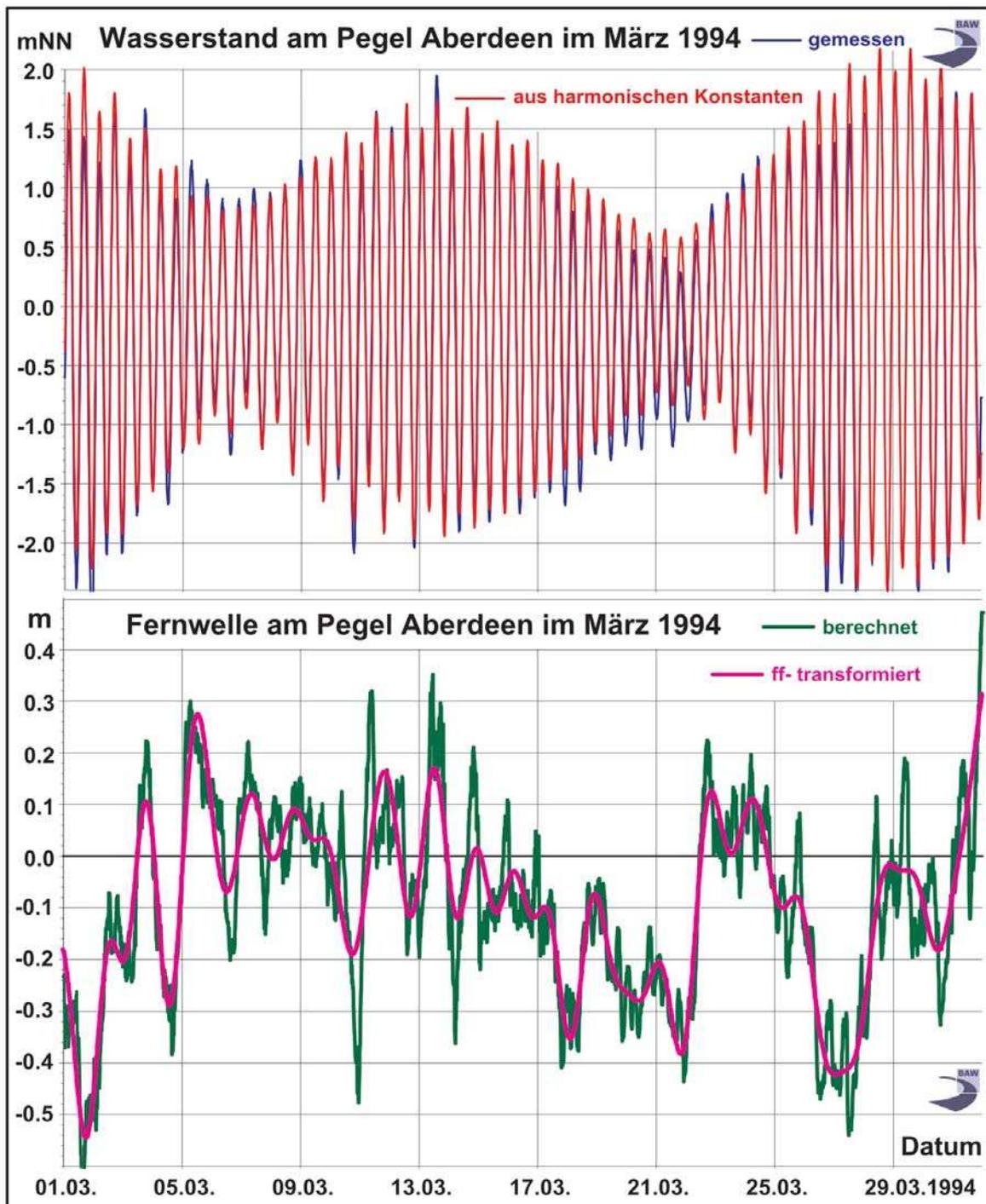


Abb. 16: Vergleich der gemessenen Wasserstände im März 1994 am Pegel Aberdeen (Schottland) mit den Wasserständen, berechnet mit Hilfe der harmonischen Konstanten. Die Differenzen wurden durch eine Fast Fourier Transformation geglättet, um Abweichungen aus Phasenverschiebungen zu eliminieren

3.3 Randsteuerung

3.3.1 Wasserstand

Die Steuerung des Nordseemodells an den offenen Rändern vollzieht sich über Wasserstandszeitreihen, die aus harmonischen Konstanten generiert wurden. Die durch Messreihen gewonnenen Durchflüsse werden mit ihren saisonalen Schwankungen am oberen Abschluss der Ästuarie eingesteuert. Diese Steuerung hat den Vorteil, dass für jeden beliebigen Termin (Zeitraum) synoptische Wasserstände/Durchflüsse bereit stehen.

Die Wasserstände werden mittels eines Programms unter Zuhilfenahme der harmonischen Frequenzen und Korrekturen aus den Tafeln der astronomischen Argumente und der Korrekturen (DHI, 1967) und den jeweils ortsabhängigen Amplituden und Phasen (harmonische Konstante) erstellt (vgl. hierzu auch PANSCH, 1988, und HORN, 1948). Die verwendeten harmonischen Konstanten für die Randpunkte stammen für den Nord- und Westrand zunächst aus dem Modell des BSH. Hierbei wurden lediglich Partialtiden verwendet, die eine Amplitude von 0,03 m überschreiten.

Zur Verbesserung der Randsteuerung wurden für den am Nordrand gelegenen Pegel Wick (Schottland) mehrjährige Pegelmessungen verwendet. Durch eine Partialtidenanalyse der Wasserstandszeitreihe ließen sich mehrere astronomische Tiden bestimmen, deren Frequenzen eng benachbart sind (Nummern 9–34 in Tab. 2). Je nach Analysezeitraum der Pegelmessung ergab sich eine große Variabilität der „konstanten“ und langperiodischen Anteile, so dass diese bei der Randsteuerung vernachlässigt werden. Sie finden Berücksichtigung in dem Vergleich mit Messwerten, einer nachfolgenden Korrektur der Randwerte sowie einer Neuberechnung der Tidesituation in der Nordsee (vgl. Kap. 3.4). In der Tab. 2 werden die verwendeten 26 Partialtiden dokumentiert, wobei astronomische Tiden berücksichtigt wurden, die Amplituden von mehr als 0,5 cm (Wick) besitzen.

3.3.2 Wind

Die räumliche/zeitliche Variation der Windverhältnisse auf der Nordsee kann nicht oder nur unzureichend durch Interpolation der gemessenen Windgrößen an den Windmessstationen, die sich vorwiegend in Küstennähe befinden, reproduziert werden. Aus diesem Grunde wird hier auf berechnete Windfelder für die gesamte Nordsee zurückgegriffen. Bedingt durch die relativ großen Gitternetzweiten dieser großräumigen meteorologischen Modelle werden z. B. der Übergang Wasser/Land sowie Abschattungseffekte hinter Inseln nicht hinreichend nachgebildet. Durch Modellsimulationen stehen für das gesamte Gebiet der Nordsee konsistente Winddatensätze zur Verfügung, die in ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung und Größe nicht immer die natürlichen Prozesse widerspiegeln. Hier wäre eine Verbesserung der Genauigkeit durch zusätzliche Messungen auf der Nordsee hilfreich.

Es wurden meteorologische Modelldaten aus verschiedenen Institutionen berücksichtigt:

- Berechnungen von Det Norske Meteorologiske Institutt (DNMI)
- Vorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes (DWD)
- Nachrechnungen im Rahmen von HIPOCAS (Hindcast-Simulationen in Kooperation mit der GKSS).

DNMI-Wind

Det Norske Meteorologiske Institutt DNMI hat anhand von digitalisierten Wetterkarten das geostrophische Windfeld für das Gebiet zwischen dem Nordpol und der Biskaya berechnet und so den Bodenwind in 10 m Höhe für die Jahre 1955 bis 1996 in sechsstündigem Abstand auf einem 75-km-Gitter ausgewertet und zur Nutzung bereitgestellt. Auf der Abb. 18 wird das vom DNMI berechnete Windfeld über der Nordsee während der Sturmflut vom 28.1.1994 (12:00 Uhr) dargestellt. Ein Vergleich zwischen Windmesswerten am Pegel Borkum und den aus dem MKW-Modell (SCHMIDT u. PÄTSCH, 1984) berechneten Größen sowie den Ganglinien der nächstgelegenen DNMI-Windwerten wird auf Abb. 17 gegeben.

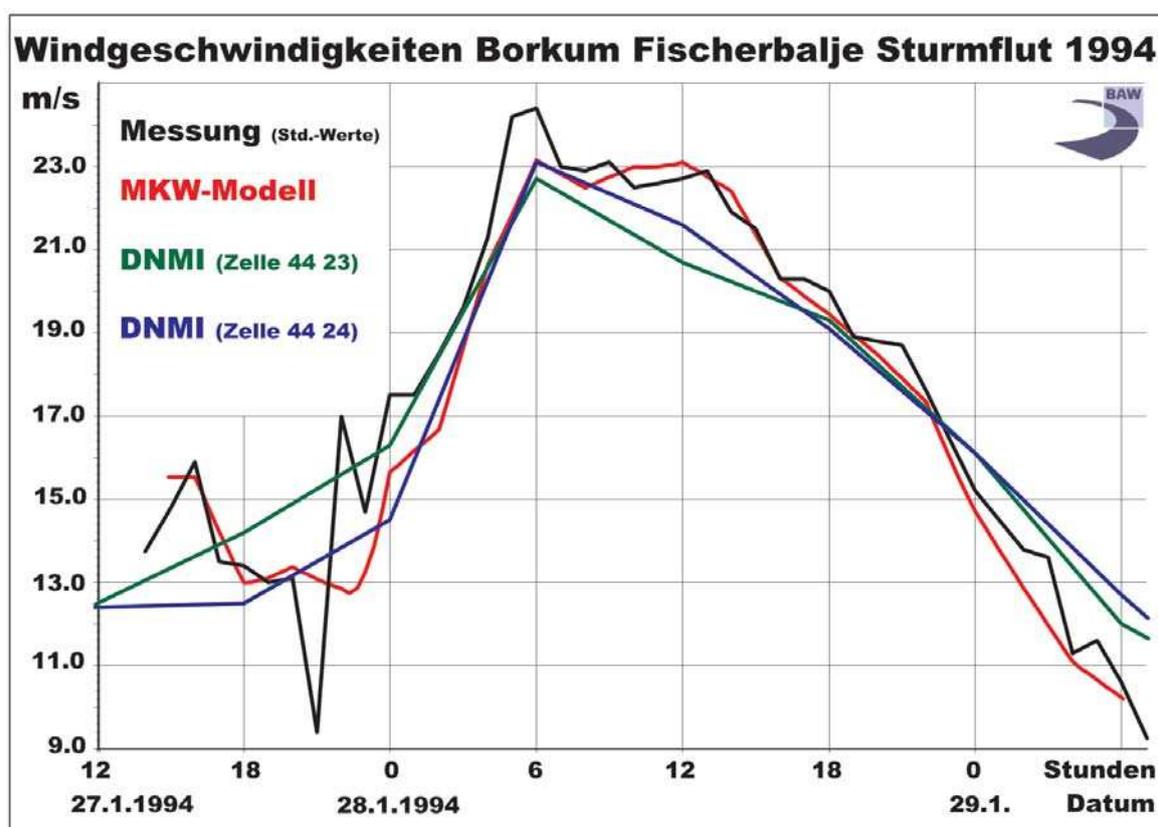


Abb. 17: Windgeschwindigkeiten am Pegel Borkum Fischerbalje zwischen Messung und MKW Modell sowie den Rechenzellen 4423 und 4424 des DNMI

HIPOCAS-Wind

Im Rahmen einer Forschungskooperation im Projekt: Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe **HIPOCAS** zur Berechnung von Wind, Wellen und Strömungen/Wasserständen über einen Zeitraum von 40 Jahren (1958–1998) wurden der BAW in Zusammenarbeit mit der GKSS die dort berechneten Windfelder zur Verfügung gestellt. Diese in einstündigem Abstand auf einem 50-km-Gitter abgespeicherten Daten stellen eine gute Grundlage zur Simulation des Windeinflusses im HN-Modell der Nordsee dar. Die räumliche Verteilung der HIPOCAS-Windfelder zeigt sich beispielhaft für einen Termin im Januar 1993 auf der Abb. 19.

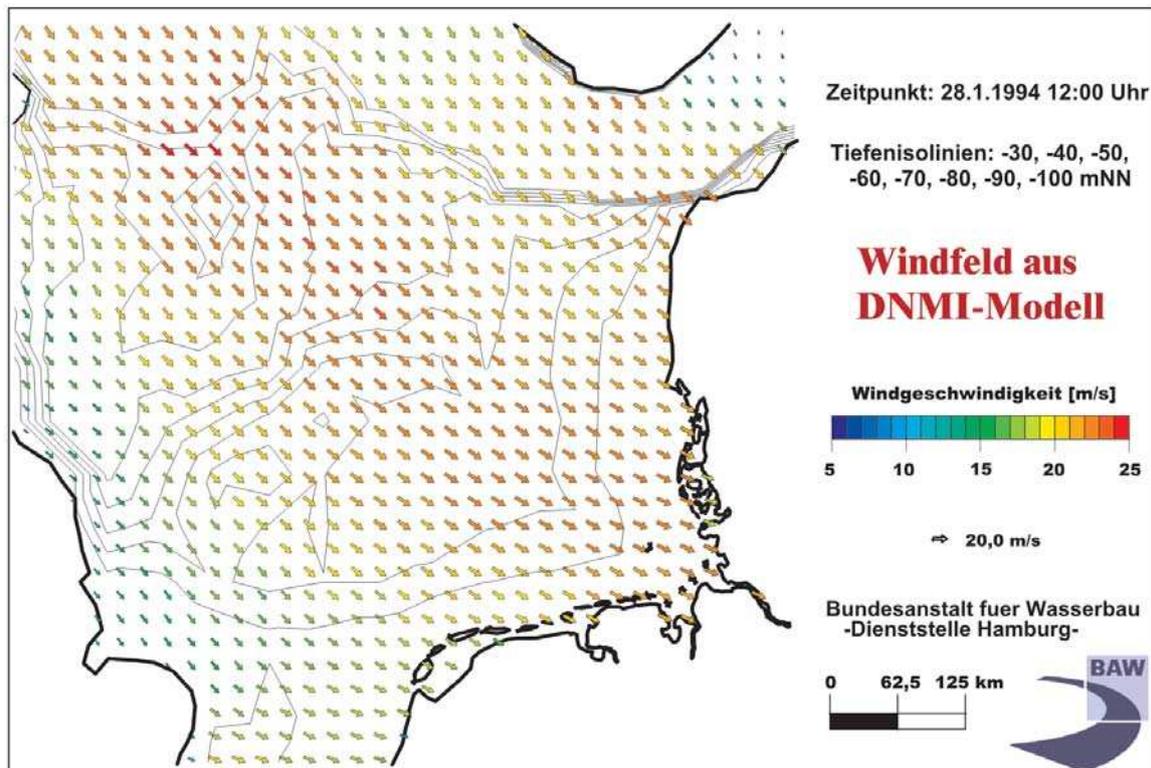


Abb. 18: Berechnete Windsituation am 28.1.1994 um 12:00 Uhr (DNMI)

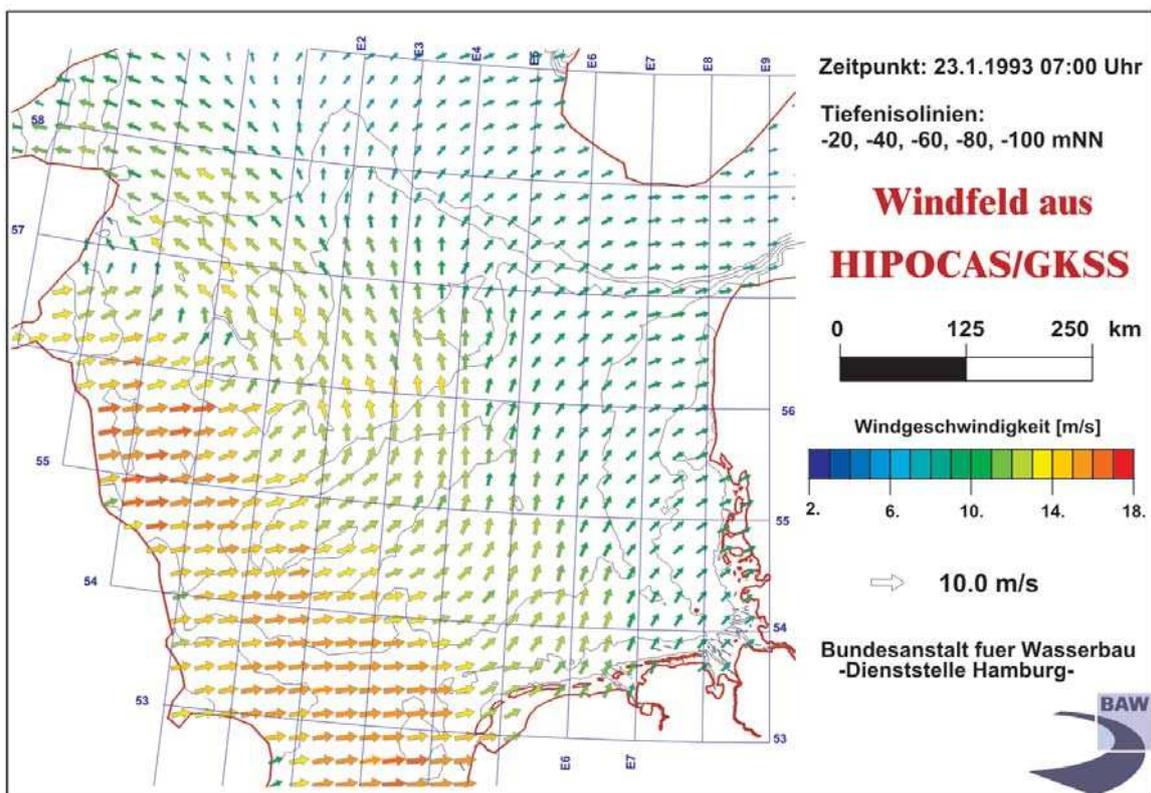


Abb. 19: Berechnete Windsituation am 23.1.1993 um 7:00 Uhr (HIPOCAS)

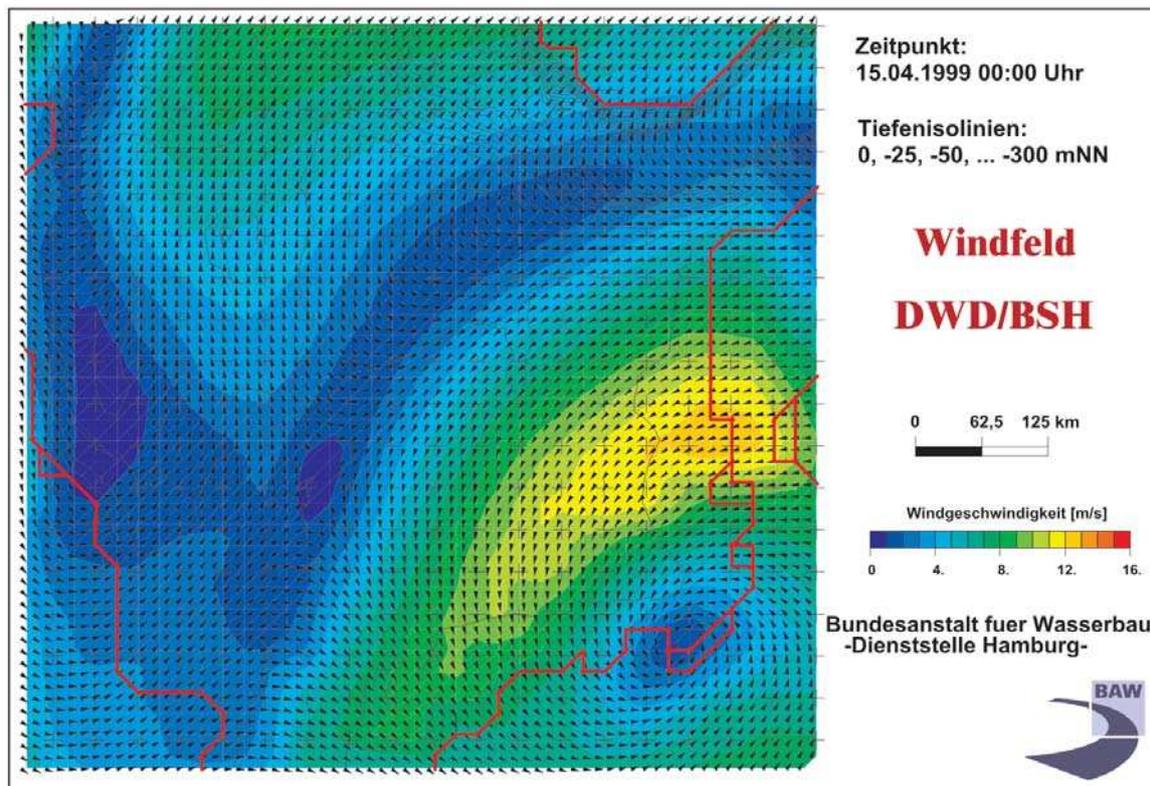


Abb. 20: Berechnete Windsituation am 15.4.1999 um 00:00 Uhr (DWD)

DWD-Wind

Zum Test der Vergleichbarkeit der Modellergebnisse des BSH und der BAW wurde der BAW-DH das Windfeld der 48-Stunden-Vorhersage des DWD für den Monat April 1999 durch das BSH zur Verfügung gestellt. Auf der Abb. 20 ist die Verringerung der Windgeschwindigkeiten beim Übergang Wasser/Land bzw. das Auffrischen des Windes über dem Wasser erkennbar. Die nachfolgend dargestellten Wasserstandsvergleiche stammen aus dieser Studie. Des Weiteren werden die DWD-Winddaten für Mai und Juni 2000 sowie für das gesamte Jahr 2001 zur Simulation verwendet. Hierbei werden neben den Windgeschwindigkeiten auch die flächenhaften Luftdrücke in das Modell eingesteuert.

3.4 Rechenablauf

Zur Berücksichtigung der o. g. Effekte müssen mehrere Simulationsläufe des Nordseemodells durchgeführt werden. Der Ablauf ist dabei folgendermaßen gegliedert:

1. Berechnung der reinen astronomischen Tide mit Perioden kleiner als ein Tag (z. B. K1) ohne Wind und Wasserstandsschwankungen als Vergleich mit der „naturnahen“ Simulation.
2. Berechnung der astronomischen Tide 1 mit Windeinfluss (Windfeld).
3. Vergleich der Ergebnisse 2 mit Pegelmessungen (Deutsche Bucht) zur Ermittlung der langperiodischen Wasserstandsschwankungen aus Fernwellen und Meteorologie an den Pegelpositionen.

4. Zur Verbesserung der Nachbildung der Tidedynamik in der Deutschen Bucht werden die Differenzen zwischen der Pegelmessung und den Simulationsergebnissen aus astronomischen Tiden mit Windeinfluss über der Nordsee 3 für einige Küstenpegel berechnet. Diese Abweichungen werden durch einen Tiefpassfilter von kurzzeitigen Differenzen (lokale Windeffekte, Phasenverschiebungen Rechnung/Messung, ...) bereinigt und mit einem Zeitversatz (z. B. Helgoland–Nordrand/Wick = 14 Std.) auf die Randwerte am offenen Nordrand hinzuaddiert, um so die langperiodische Wasserstandserhöhung bzw. -senkung im Modell zu berücksichtigen.
5. Berechnung der Tide 1 mit Windeinfluss und neuen Randwerten nach 4.
6. Der Vergleich der reinen astronomischen Berechnung 1 mit der Simulation unter Berücksichtigung von Wind und langperiodischen Wasserstandsschwankungen zeigt flächenhaft die Abweichung von Wasserstand und Strömung zwischen der reinen astronomischen Tide und den tatsächlichen Verhältnissen.

Durch diesen Rechenablauf werden bessere Übereinstimmungen mit den Messwerten erzielt. Diese Verbesserung zeigt sich deutlich auf der Abb. 21 durch die Differenzen Messung zu

- astronomischer Tide (rot),
- Tide mit Windeinfluss (blau) und
- Tide mit Einfluss von Wind und Wasserstandsschwankungen (schwarz).

Durch die „Überlagerung von Tide, Wind und langperiodischen Schwankungen“ verringert sich z. B. die Standardabweichung von 0,19 über 0,15 auf 0,13 und die Korrelation steigt von 0,985 über 0,991 auf 0,994 für den Pegel Cuxhaven (s. u. und Abb. 36).

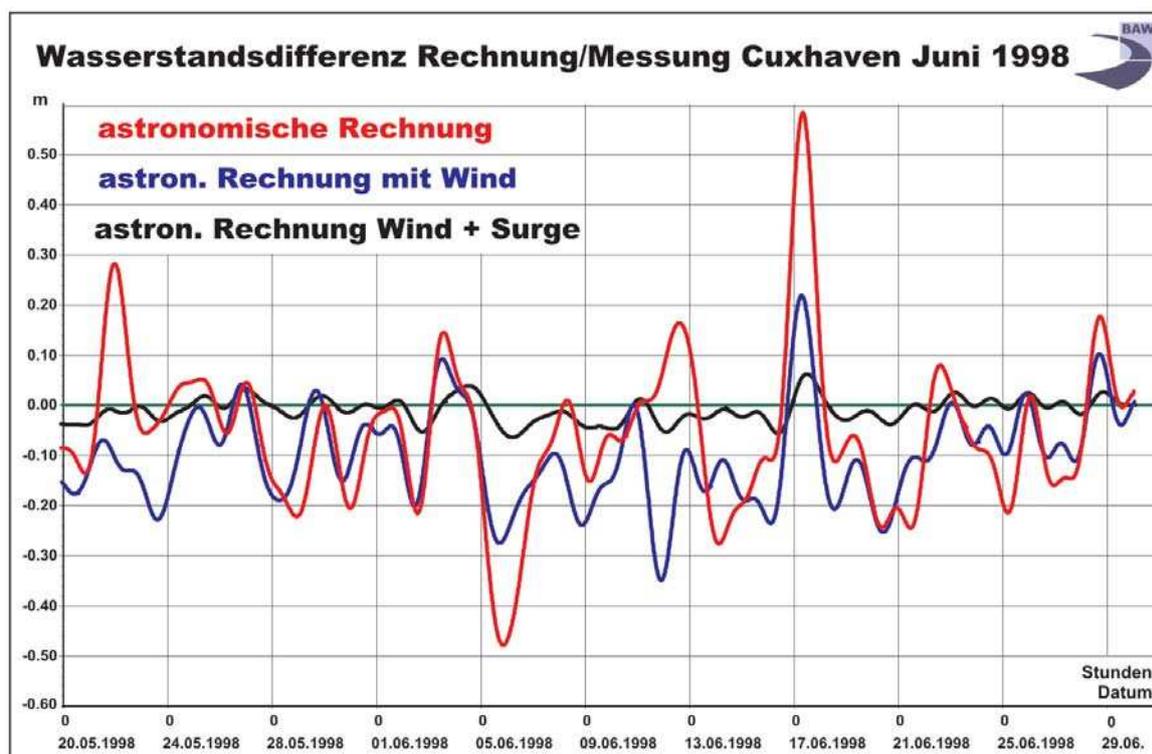


Abb. 21: Differenz der Wasserstände am Pegel Cuxhaven (Juni 1998) zwischen Messung und Ergebnissen des Nordseemodells mit astronomischer Randsteuerung, Windeinfluss und Surge

4. Verifikation

Nachfolgend soll an Hand von verschiedenen hydrographischen Zuständen die Naturähnlichkeit der Modellergebnisse bzw. die Vergleichbarkeit mit ausgewählten anderen Modellrechnungen gezeigt werden.

4.1 Astronomische Tiden

Die Tideschwingung in der Nordsee wird dominiert durch die halbtägige Mondtide M2 mit einer Periode von 12 Stunden und 25 Minuten (44714 Sekunden). Für die astronomischen Tideverhältnisse durch alleinige Anregung mit der M2-Gezeit existieren in der Literatur eine Reihe von Vergleichsergebnissen der flächenhaften Verteilung der Amplituden und Phasen aus Simulationsrechnungen sowie lokale Werte aus Partialtidenanalysen von Messwerten (MAIER-REIMER, 1977; DAVIES, 1967; MARINEOBSERVATORIUM WILHELMSHAVEN, 1947; SIEFERT u. LASSEN, 1985; MÜLLER-NAVARRA, 1987; BACKHAUS, 1982; DUWE, 1980; ZIELKE et al., 1996; ZIELKE et al., 1995; STENGEL, 1995; HOLZ, PLÜß u. SALAMUN, 1988).

In einer Systemstudie wurde die Dynamik der Nordsee über einen Zeitraum von mehr als 40 Tagen berechnet und die M2-Amplituden und Phasen flächenhaft analysiert. Diese Ergebnisse wurden vergleichbaren Rechenläufen anderer Modelle gegenüber gestellt. Der große Nachteil vieler der genannten Modelle besteht darin, dass die innere Deutsche Bucht und insbesondere die Ästuare nur unzureichend in ihren vielgestaltigen Strukturen der Tiefen und Berandungen erfasst wurden. Dieses führt im Küstenbereich und insbesondere in den Ästuaren und Flussmündungen zu lokal unterschiedlichen Verläufen der Amplituden und Phasen.

Der Wattsockel vor der Küste, zusammen mit den Inseln und den Tiderinnen, verursacht die Verformung der linksdrehend durch die Deutsche Bucht fortschreitenden Tidewelle. Hierbei werden die Seichtwassertiden durch Bodenreibung und Reflektion an der Berandung generiert. Die Seichtwassertiden bewirken eine Verformung der Tidekurven insbesondere in Küstennähe (Seichtwasserpartialtiden z. B. M4, M6) und sind somit wichtig bei der naturähnlichen Reproduktion der gemessenen Tideganglinien durch das Nordseemodell.

Die vom Atlantik einlaufende „Kelvinwelle“ (KELVIN, 1868) propagiert linksdrehend um *amphidromische Punkte*, deren wichtigster für die Deutsche Bucht etwa auf der Breite von Esbjerg ($\varphi = 55^{\circ} 20' N$) und der Länge von Terschelling ($\lambda = 5^{\circ} 20' E$) liegt. Dieses Phänomen wird im Nordseemodell zufriedenstellend nachgebildet und durch die Darstellung der Phasen als Eintrittszeiten der M2-Gezeit auf Abb. 22 dokumentiert.

Mit zunehmender Entfernung vom amphidromischen Punkt erhöhen sich die Amplituden der Tiden in der inneren Deutschen Bucht. Insbesondere in den Mündungsgebieten der Ästuare nehmen die Amplituden (Wasserstände) zu. Dieses wird auf Abb. 23 durch die Verteilung der berechneten M2-Amplituden in der Deutschen Bucht wiedergegeben. Der Vergleich mit anderen Modellrechnungen und auch mit analysierten Messwerten bestätigt ebenfalls die berechnete Amplitudenverteilung.

Die aus Messwerten von SIEFERT u. LASSEN (1985 u. 1991) gewonnenen Linien gleicher Eintrittszeiten zeigen insbesondere im Bereich der Weser- und Elbemündung eine große Übereinstimmung mit den Rechenergebnissen des Nordseemodells. Bei beiden Auswertungen ist das Verschwenken der Linien gleicher Phasen bzw. Eintrittszeiten in Küstennähe, hervorgerufen durch die stark strukturierte Bodentopographie, deutlich erkennbar.

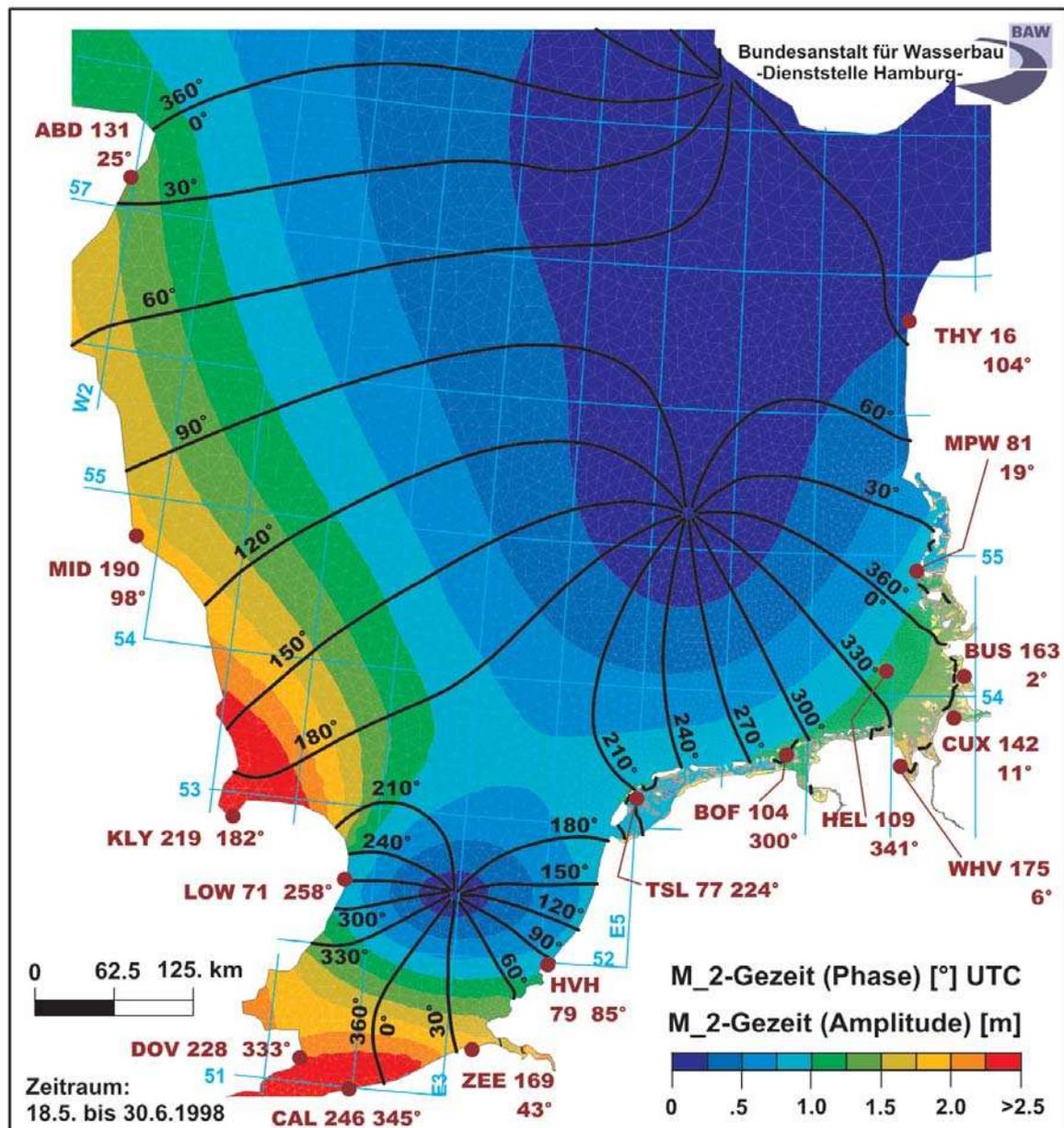


Abb. 22: Amplituden und Phasenverteilung der berechneten M2-Partialtide in der Nordsee

4.2 Tiden mit geringem Windeinfluss

Die Simulation und Verifikation der Hauptschwingungskomponente der Nordsee, die M2-Gezeit, stellt nur die erste Stufe der Validierung dar. Neben der M2-Gezeit sind zur Simulation der tatsächlich ablaufenden Gezeitendynamik eine Reihe von Partialtiden wichtig. Die in Kapitel 3.1 auf Tab. 2 angegebenen ein- und halbtägigen Partialtiden sowie mit geringen Anteilen einige Seichtwassertiden wurden benutzt, um naturähnliche Wasserstandszeitreihen zur Modellsteuerung zu generieren.

Als Beispiel der Berechnung **realer, gelaufener Tiden** mit geringem Windeinfluss in der Nordsee/Deutschen Bucht werden nachfolgend die Simulationsergebnisse der Tidedynamik durch Vergleich mit Pegelmessungen für Zeiträume im Juli 1997, Juni 1998 und März 1999 dokumentiert. Auf den Abb.en 24 bis 35 zeigt sich an Hand verschiedener Zeitreihenver-

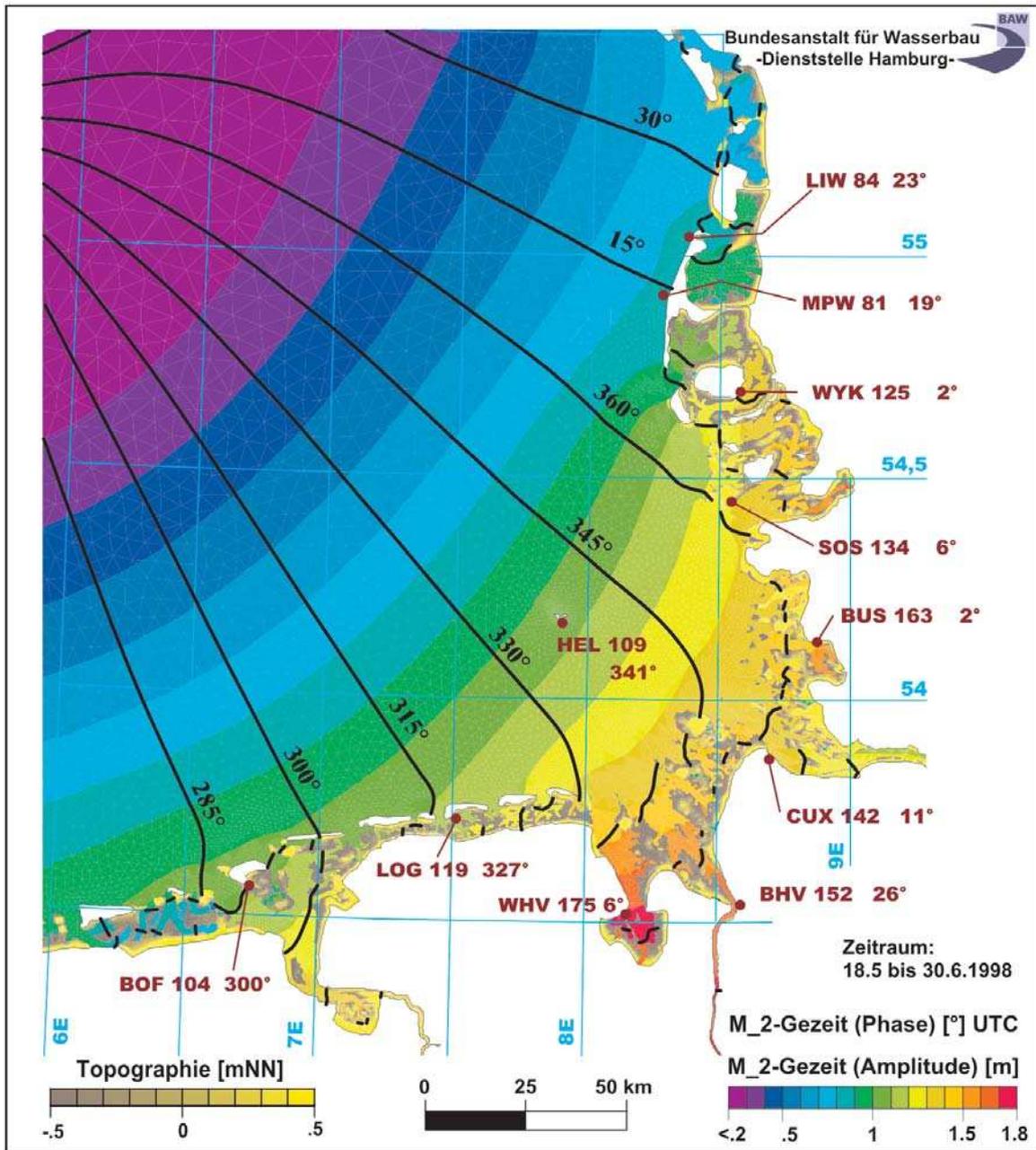


Abb. 23: Amplituden und Phasenverteilung der berechneten M₂-Partialtide im Küstensaum der Deutschen Bucht und den Ästuarmündungen

gleiche die Naturähnlichkeit der Simulationsergebnisse. Die Qualität der Modellergebnisse wird belegt durch die guten Übereinstimmungen in der Phasenlage, den Hoch- und Niedrigwasserscheitelwerten, der Tideform und der täglichen Ungleichheit der Tide. Die Abweichungen zu den Pegelmessungen sind teilweise auf eine zu grobe Auflösung der lokalen Topographie bzw. nicht vollständig erfasste Wind- und Fernwelleneffekte zurückzuführen.

Für den Zeitraum zwischen dem 18.5.1998 und 29.6.1998 werden die berechneten Hoch- und Niedrigwasserstände den entsprechenden Messwerten in Form eines Streudiagrammes (scatter-plot) gegenübergestellt. Die lineare Regressionsgerade der 166 Werte verläuft in etwa durch den Nullpunkt und weist eine Steigung von fast 1:1 auf, was die gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung bestätigt (vgl. Abb. 36).

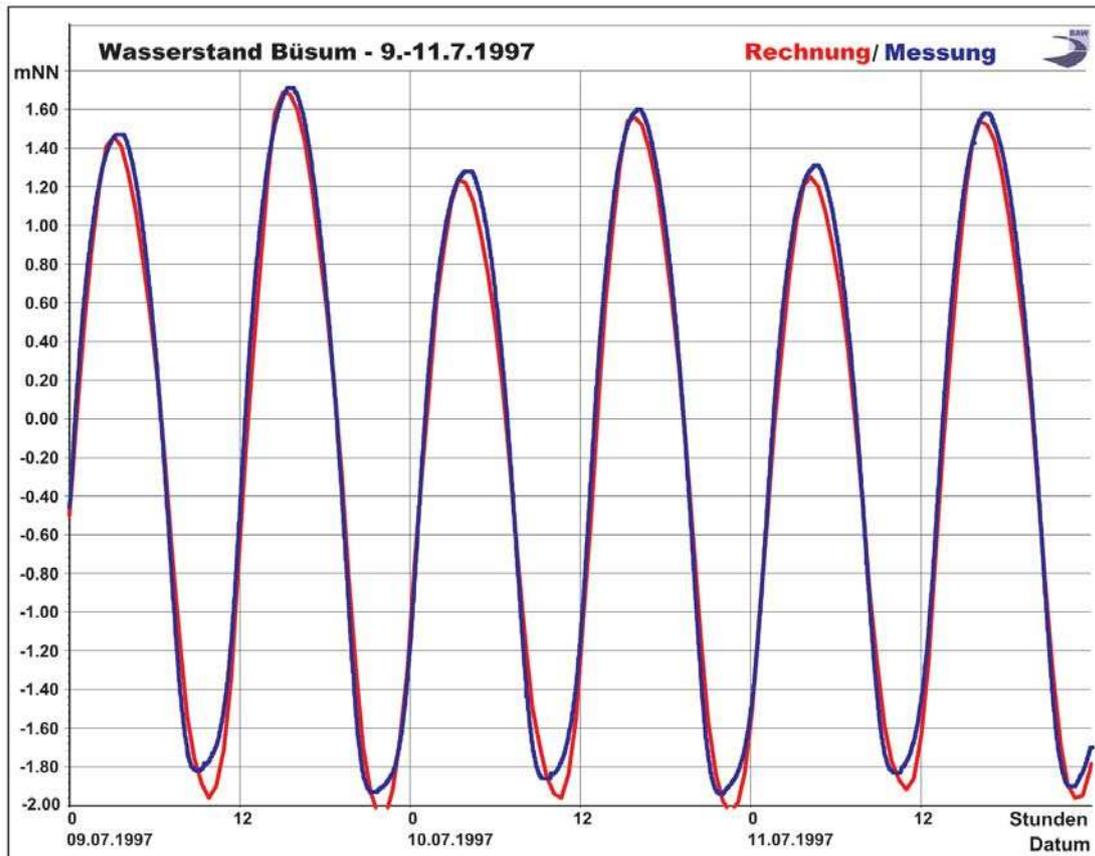


Abb. 24: Vergleich Pegel Büsum vom 9.-11.7.1997

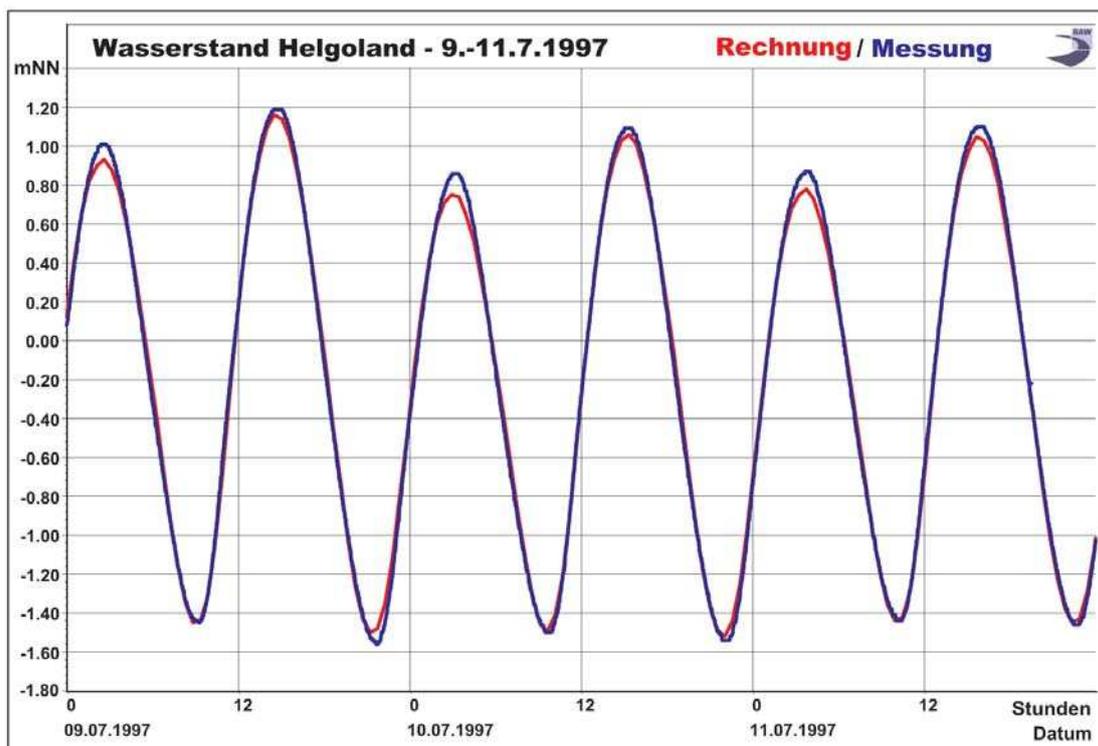


Abb. 25 : Vergleich Pegel Helgoland vom 9.-11.7.1997

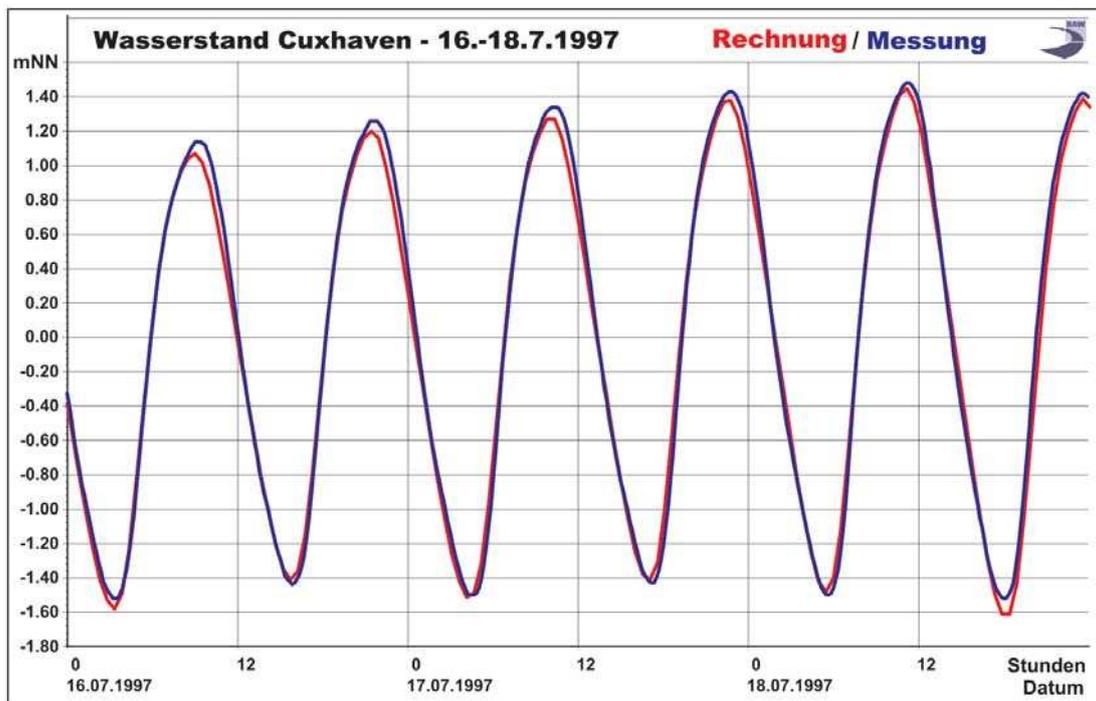


Abb. 26: Vergleich Pegel Cuxhaven vom 16.-18.7.1997

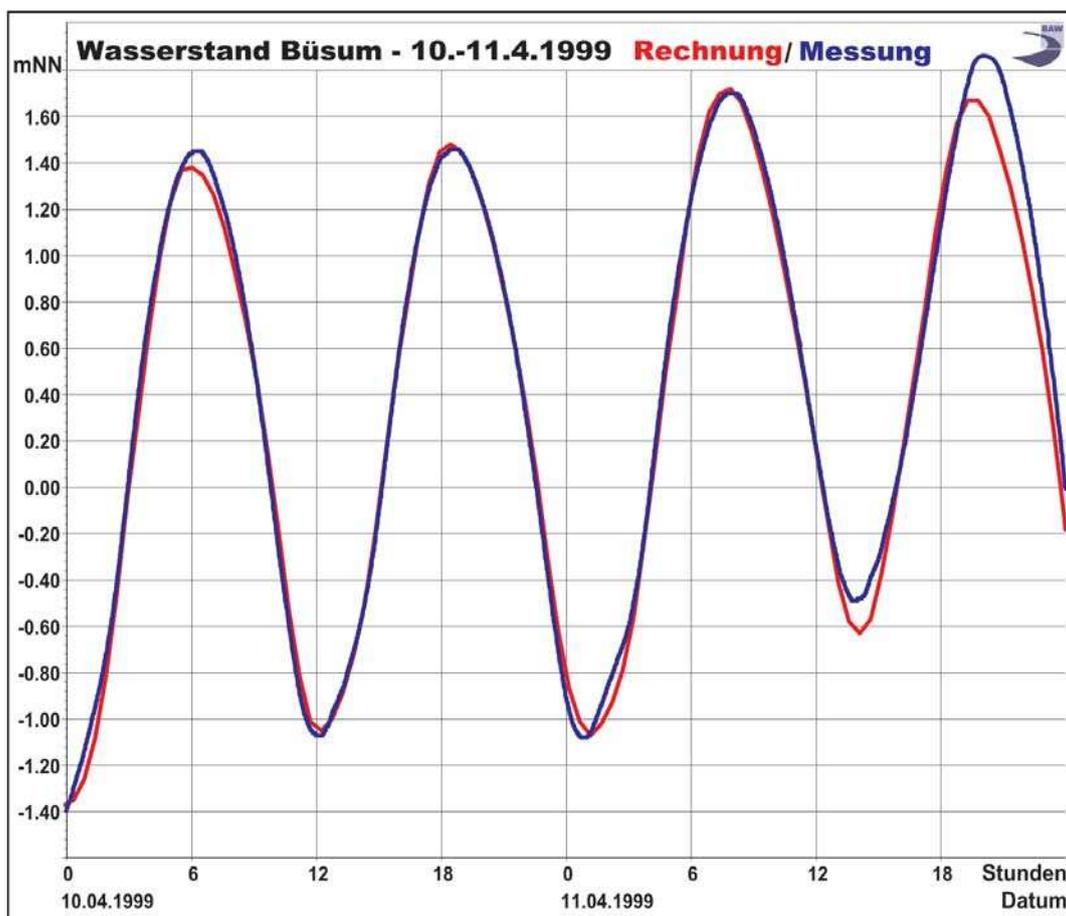


Abb. 27: Vergleich Pegel Büsum vom 10.-11.4.1999

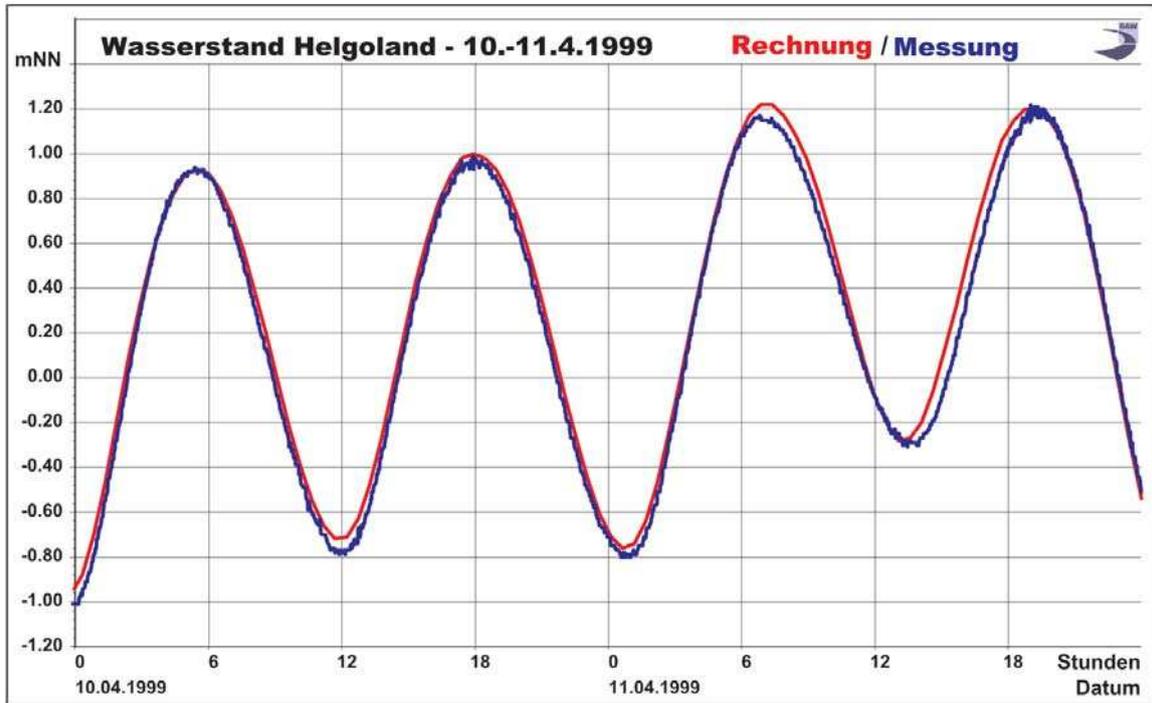


Abb. 28: Vergleich Pegel Helgoland vom 10.-11.4.1999

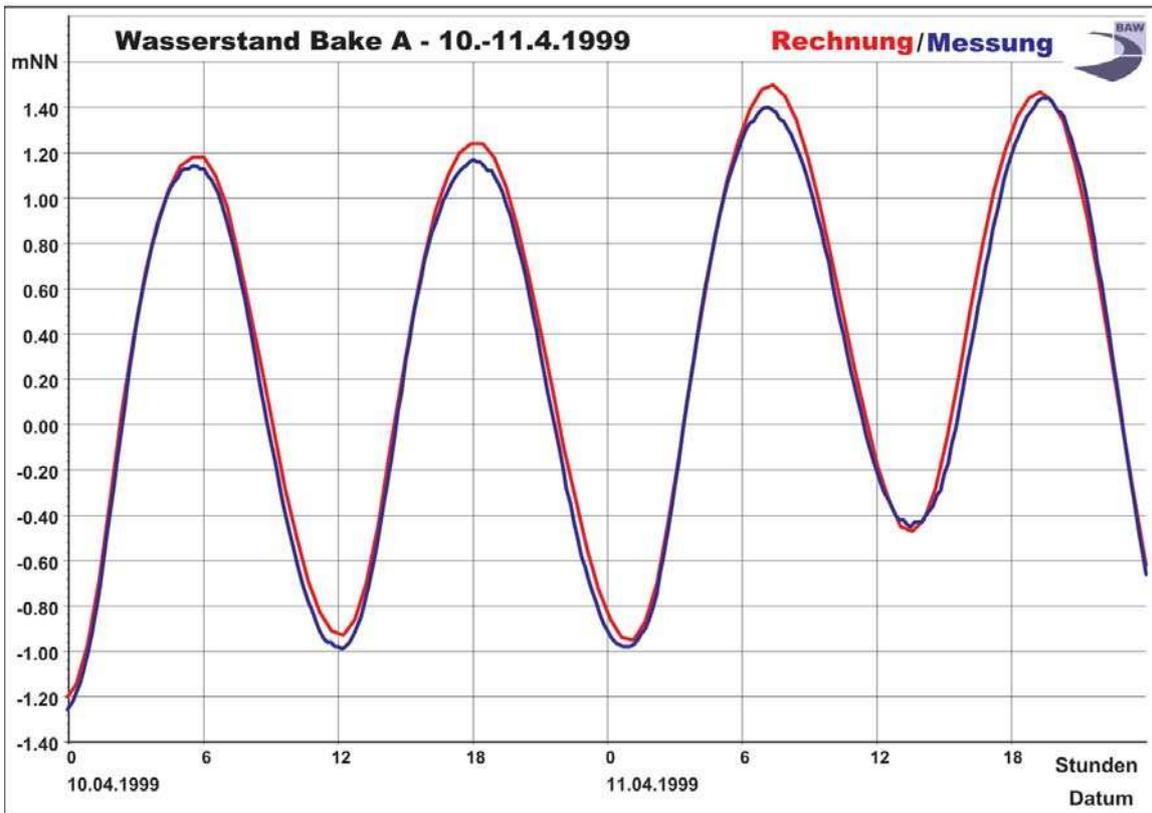


Abb. 29: Vergleich Pegel Bake A vom 10.-11.4.1999

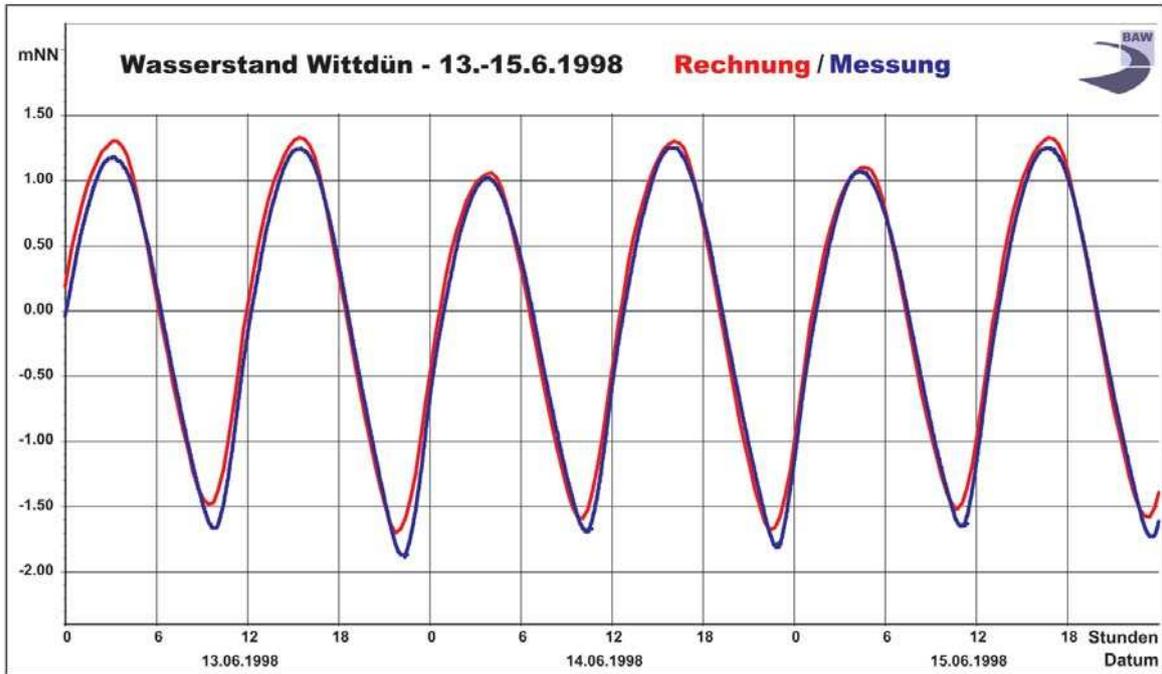


Abb. 30: Vergleich Pegel Wittdün vom 13.-15.6.1998

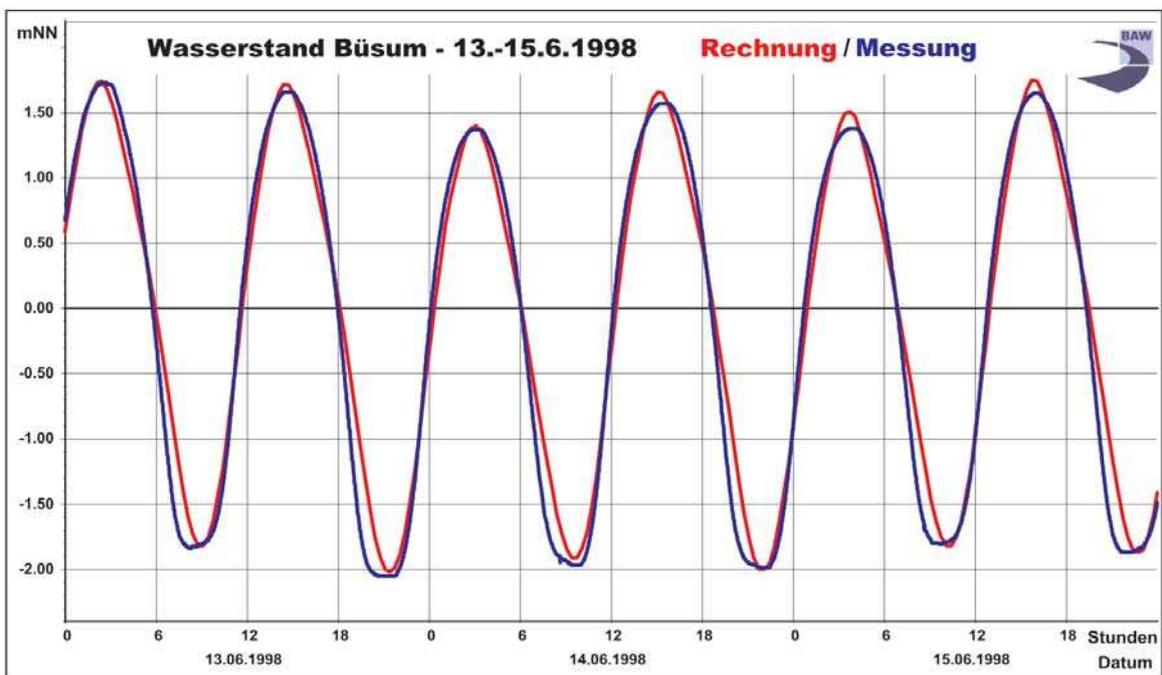


Abb. 31: Vergleich Pegel Büsum vom 13.-15.6.1998

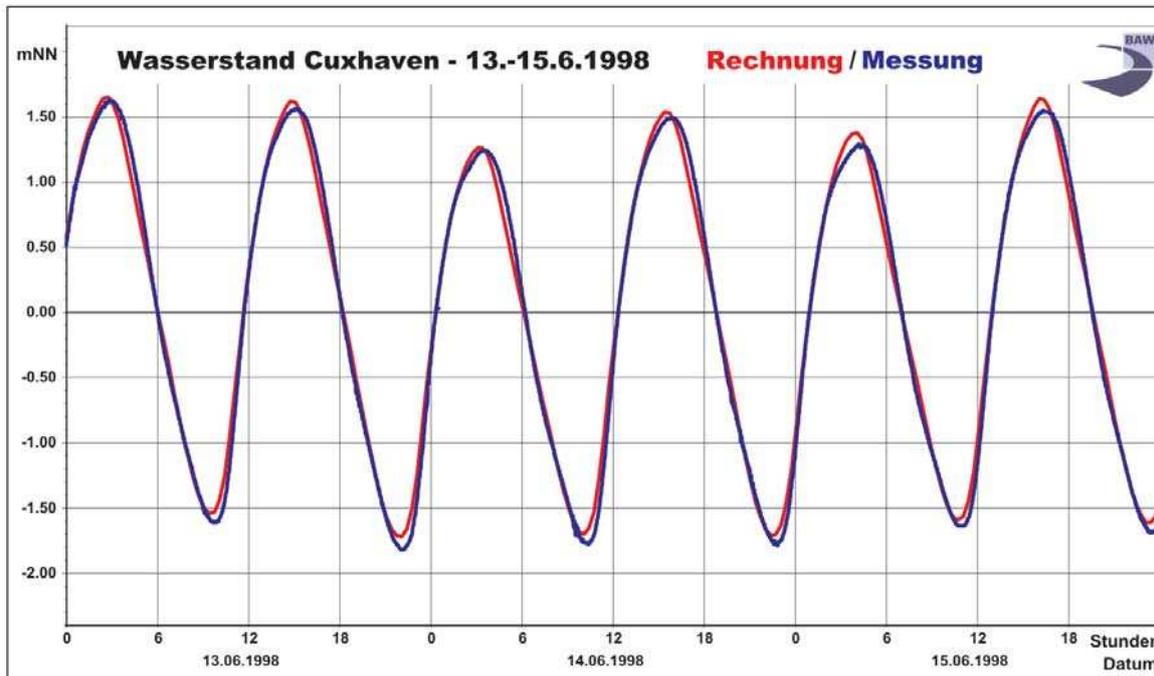


Abb. 32: Vergleich Pegel Cuxhaven vom 13.-15.6.1998

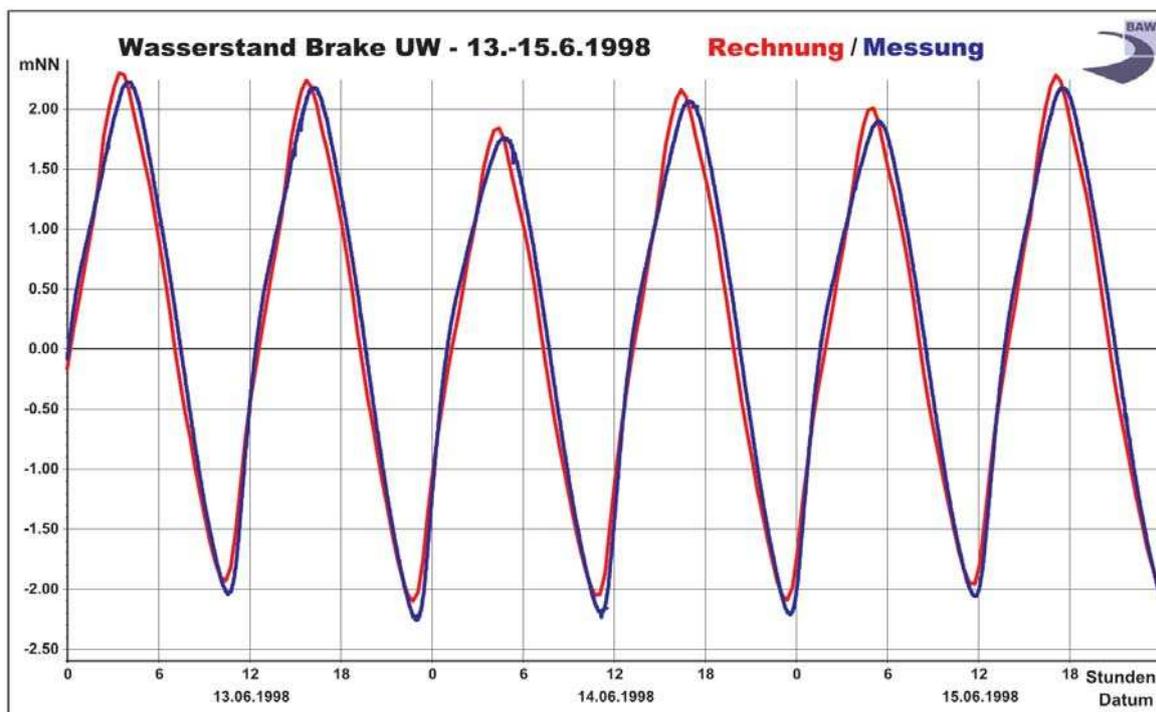


Abb. 33: Vergleich Pegel Brake vom 13.-15.6.1998

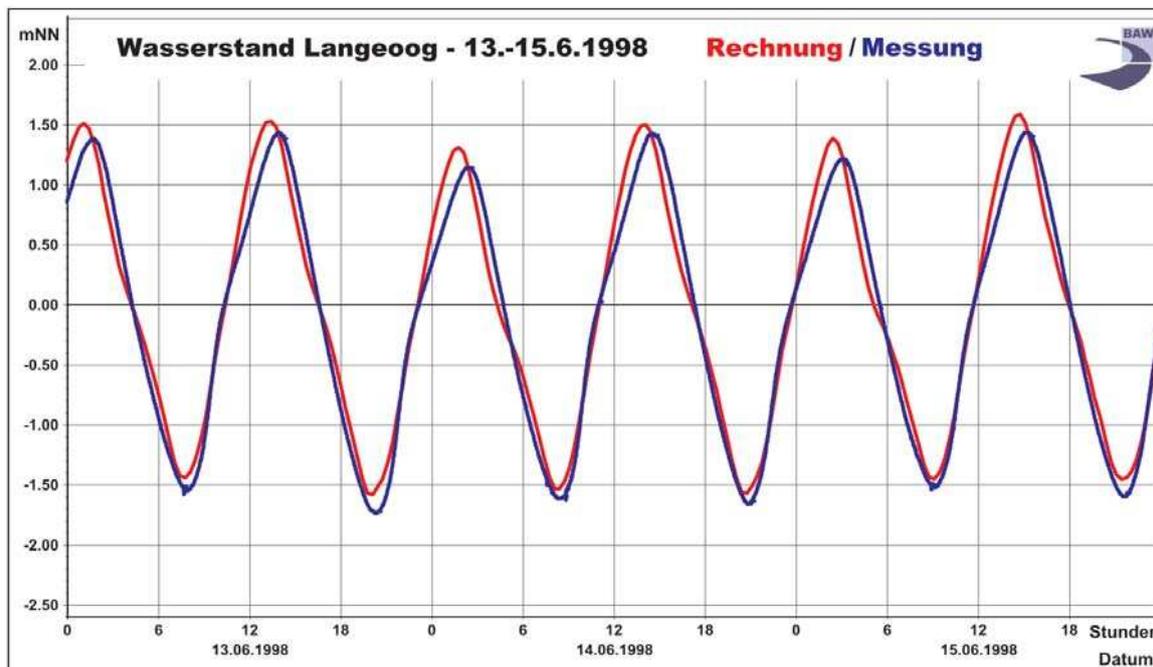


Abb. 34: Vergleich Pegel Langeoog vom 13.-15.6.1998

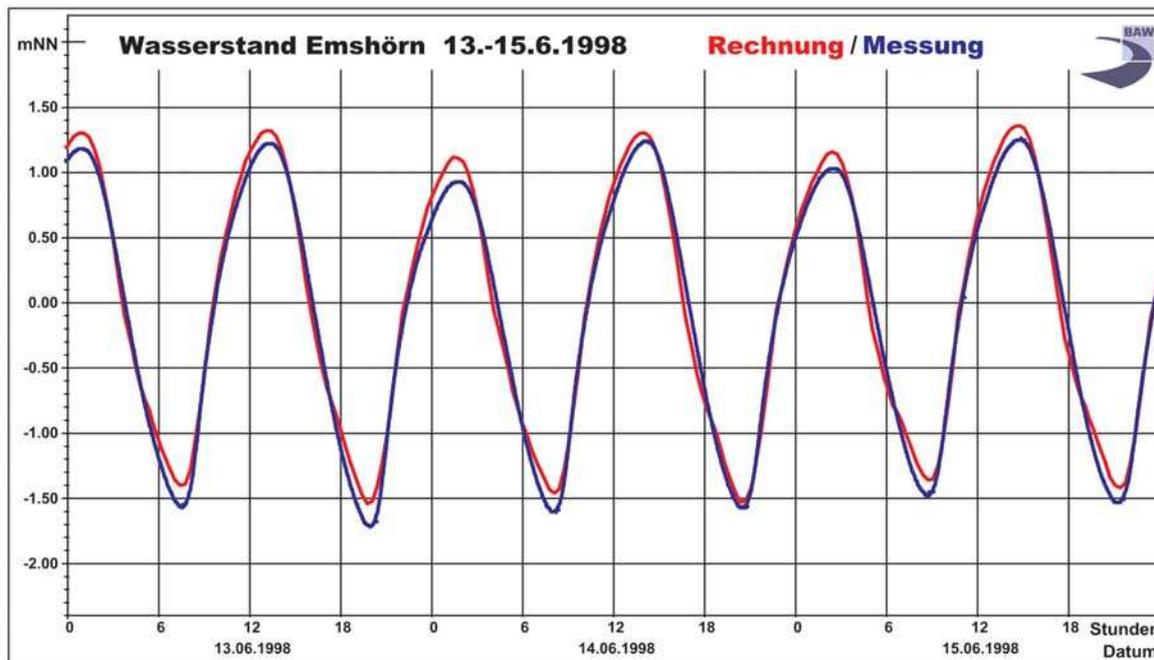


Abb. 35: Vergleich Pegel Emshörn vom 13.-15.6.1998

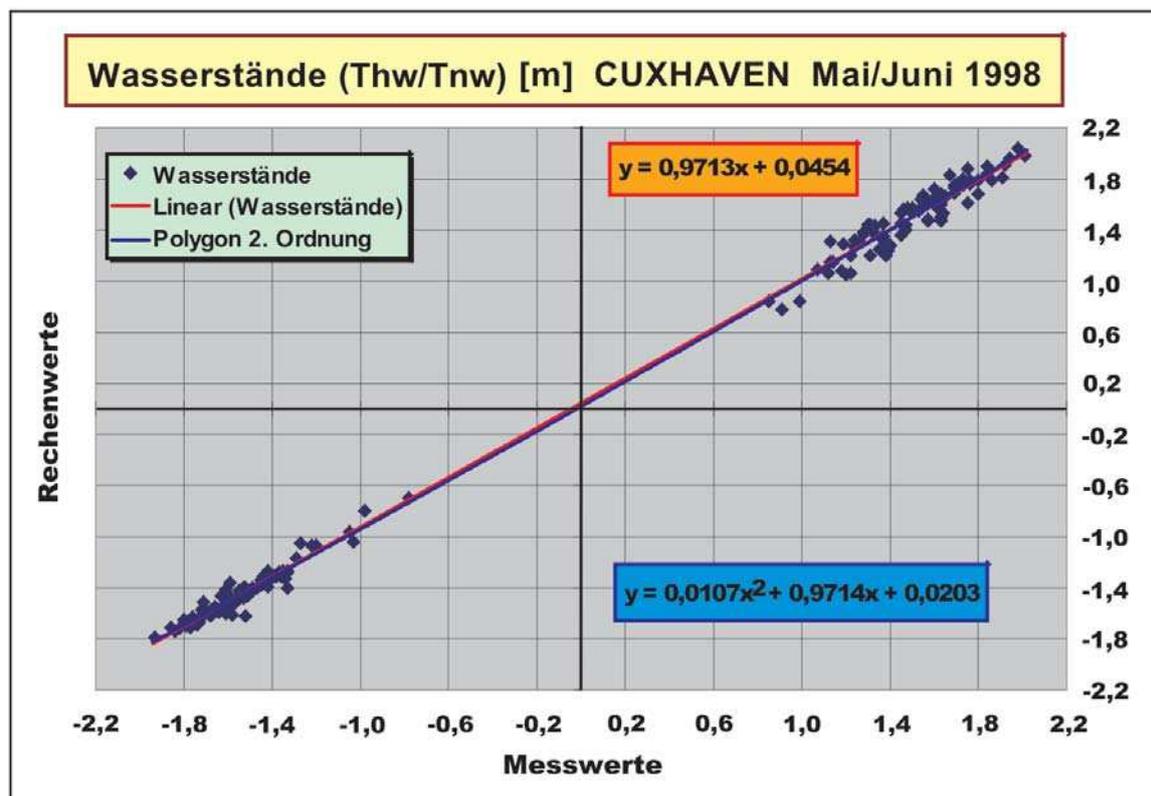


Abb. 36: Vergleich der Thw/Tnw vom 18.5.–29.6.1998 am Pegel CUXHAVEN zwischen Rechenwerten und Messwerten

4.3 Sturmfluten

Zur Berechnung von Sturmflutereignissen in den deutschen Ästuaren müssen die erhöhten Wasserstandsverläufe an den Modellrändern der Gesamtästuarmodelle bekannt sein. Unter Berücksichtigung der Windfelder über der Nordsee wird der Windstau als Wasserstandserhebung in der Deutschen Bucht synoptisch berechnet. Eine vergleichbare Vorgehensweise bei der Simulation von großräumigen Sturmfluten wird bei VERBOOM et al. (1992) angewendet (siehe auch CAÑIZARES et al., 1998).

Für jeden Rechenknoten werden die Scheitelwerte des Wasserstandes innerhalb des Analysezeitraumes berechnet und in ihrer flächenhaften Verteilung dargestellt. Beispielhaft werden die so berechneten Sturmflutscheitelwasserstände für die Sturmflut vom 28.1.1994 in der Deutschen Bucht auf der Abb. 37 dokumentiert.

Der Wasserstandsverlauf bei Sturmfluten ist wesentlich geprägt von der zeitlichen und räumlichen Genauigkeit der verwendeten Starkwindlagen über der Nordsee. Insofern ist der Verlauf der Wasserstände an den Pegelpositionen nicht deckungsgleich mit den Messwerten. Gleichwohl wird die Sturmflutdynamik in ihrer zeitlichen Entwicklung und Höhe gut durch das Modell reproduziert, was beispielhaft für die Sturmflut vom 28.1.1994 an Hand der Pegel Borkum, Norderney, Mellumplate, Cuxhaven und Alte Weser sowie für die Sturmflut vom 3.–4.1.1976 ebenfalls für den Pegel AlteWeser gezeigt wird (vgl. Abb. 38 bis 43).

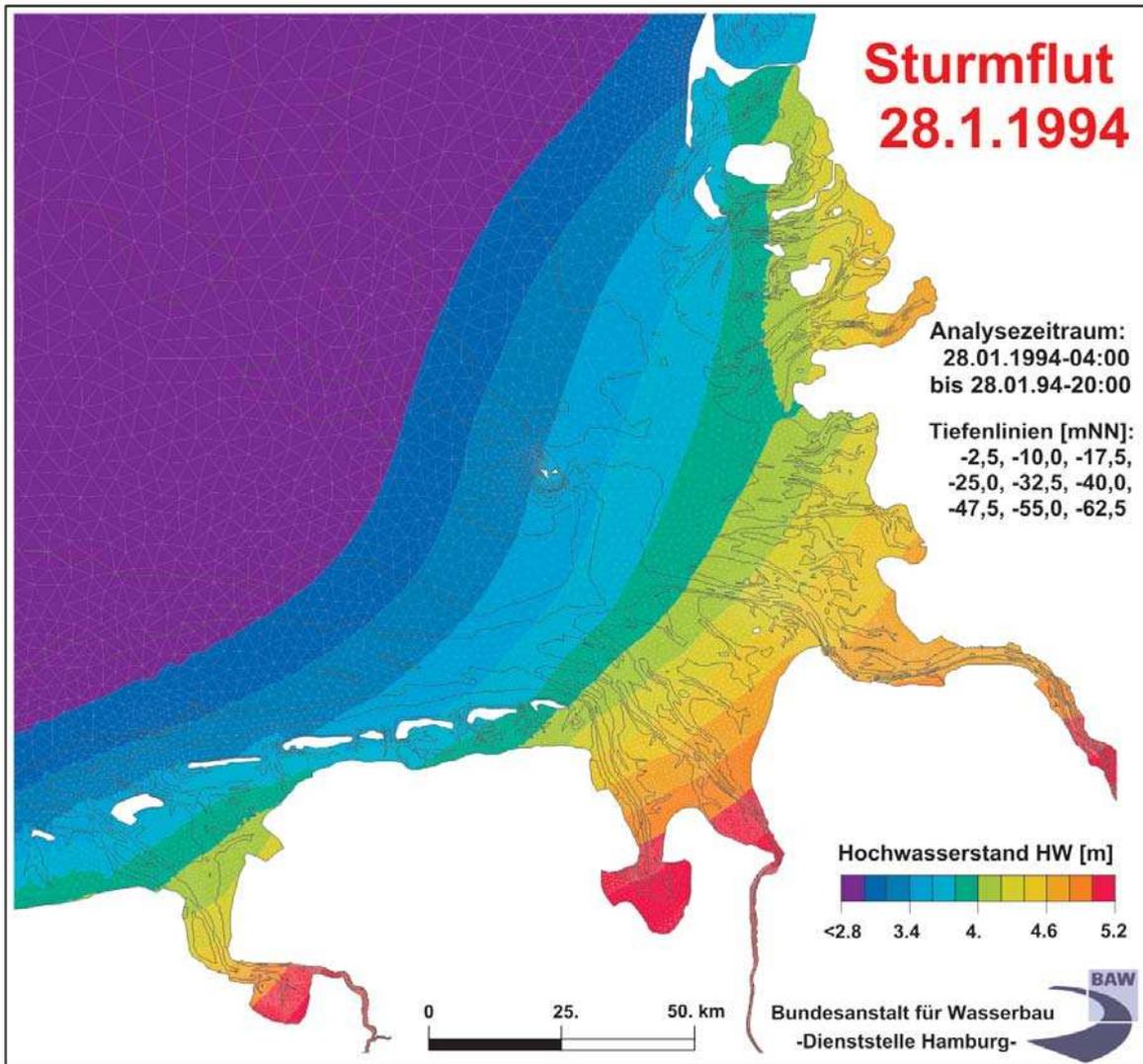


Abb. 37: Berechnete Sturmflutscheitelwasserstände in der Deutschen Bucht vom 28.1.1994

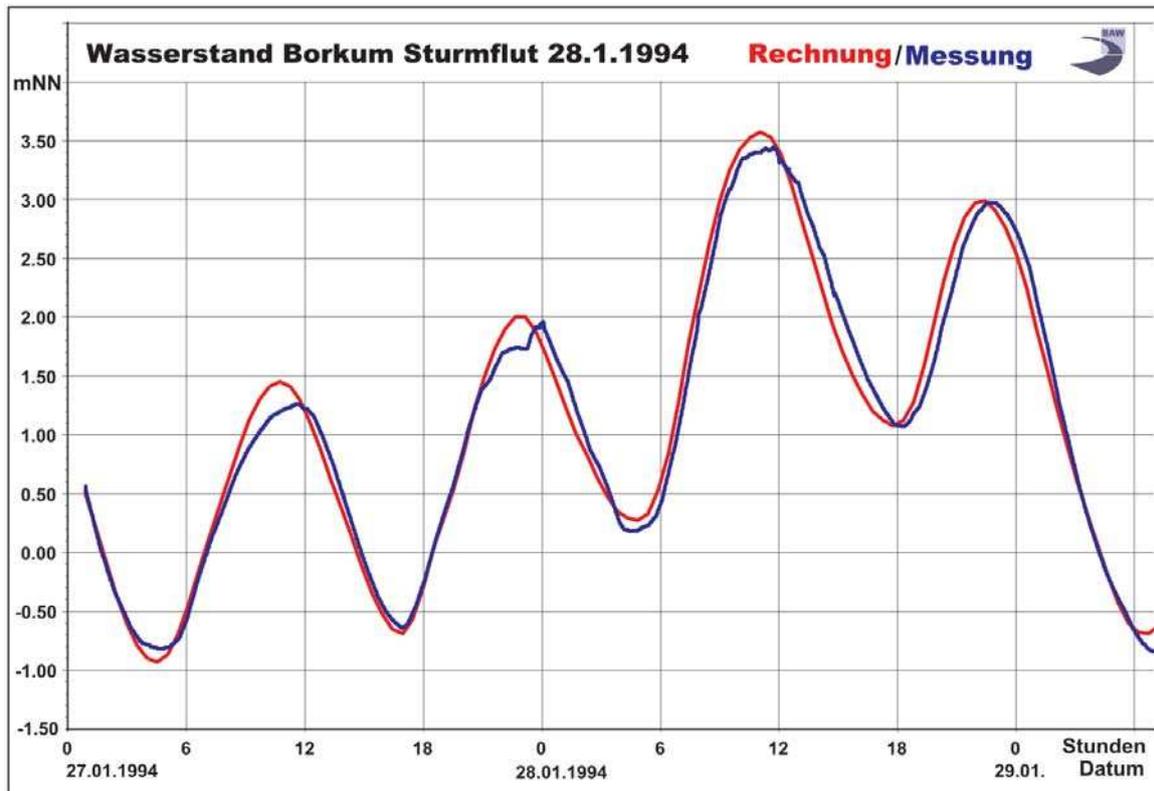


Abb. 38: Vergleich Pegel Borkum, Sturmflut vom 28.1.1994

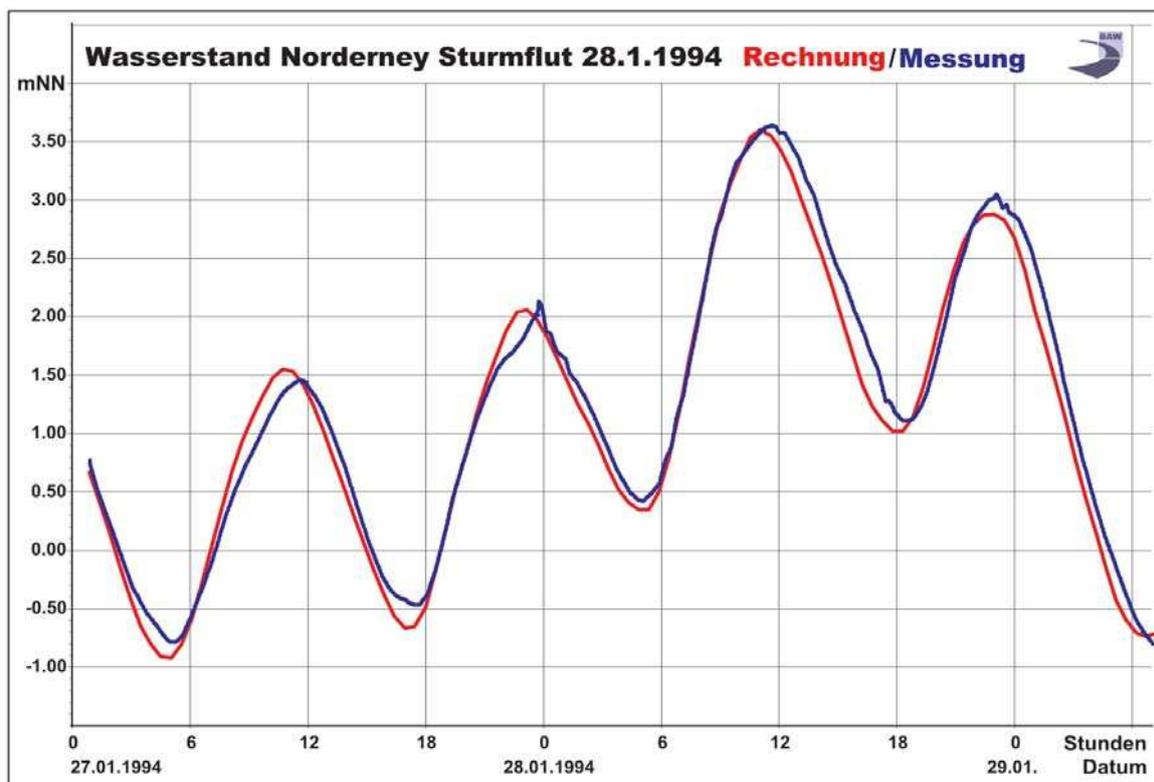


Abb. 39: Vergleich Pegel Norderney, Sturmflut vom 28.1.1994

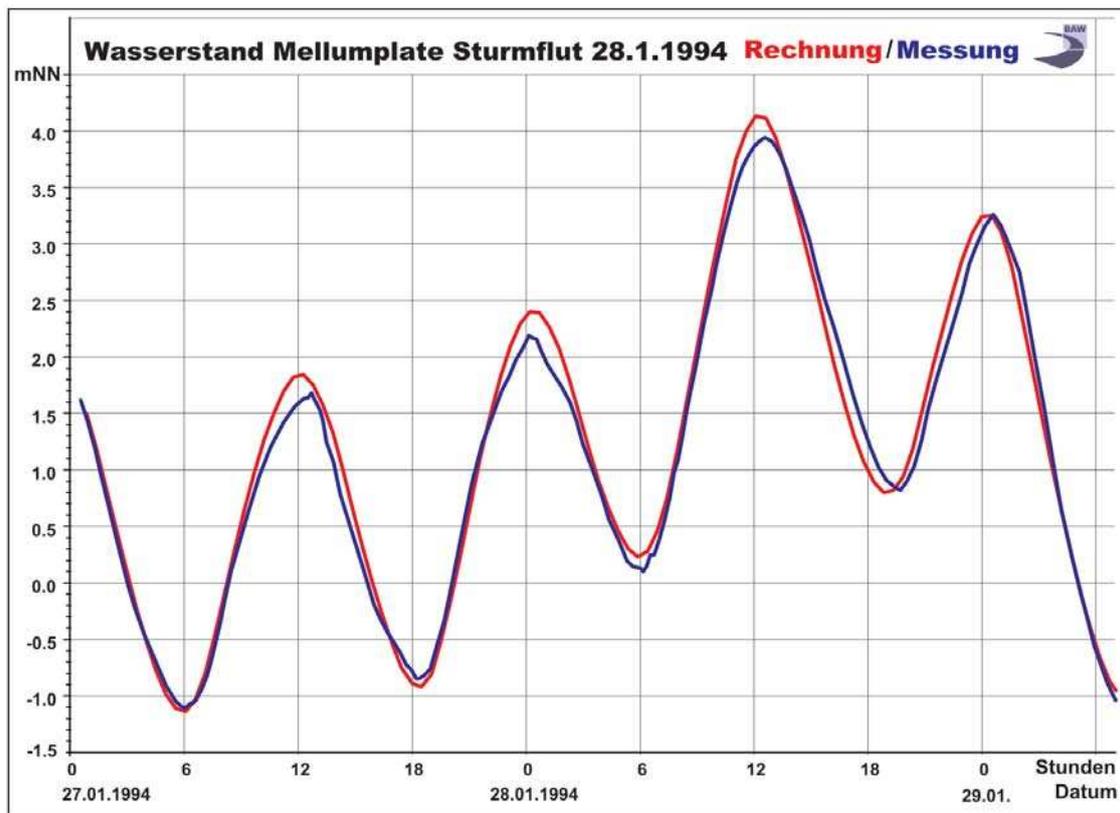


Abb. 40: Vergleich Pegel Mellumplate, Sturmflut vom 28.1.1994

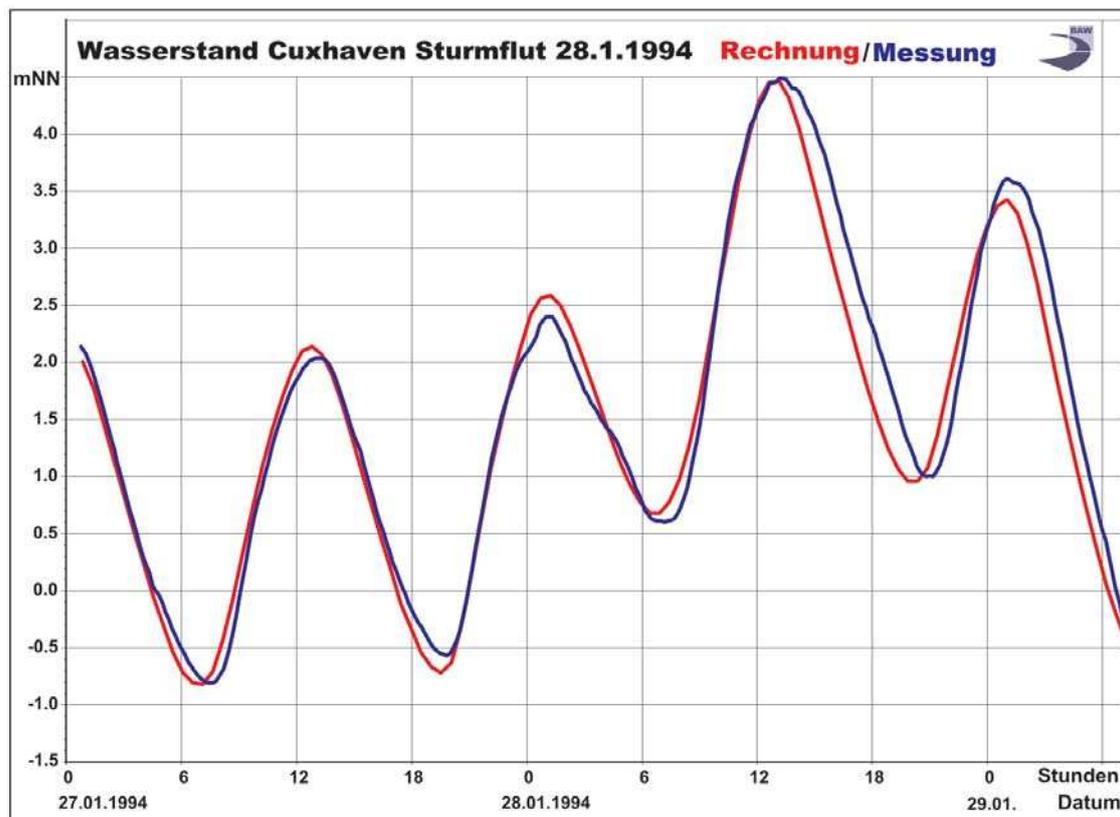


Abb. 41: Vergleich Pegel Cuxhaven, Sturmflut vom 28.1.1994

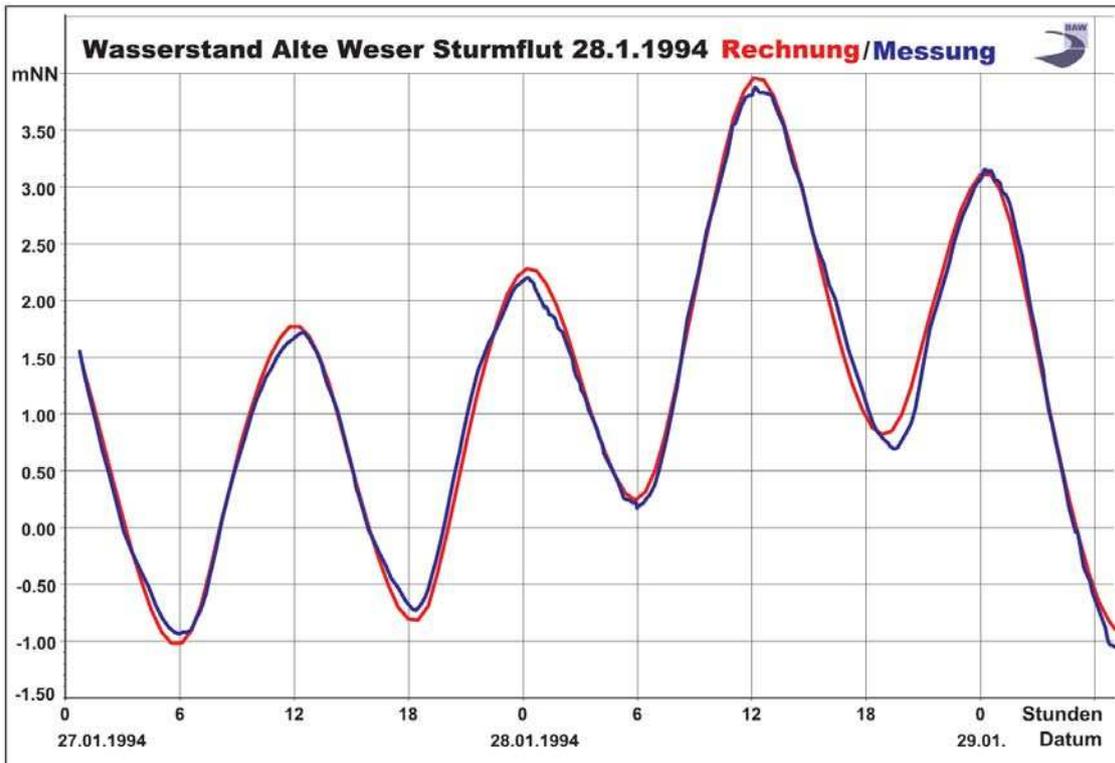


Abb. 42: Vergleich Pegel Alte Weser, Sturmflut vom 28.1.1994

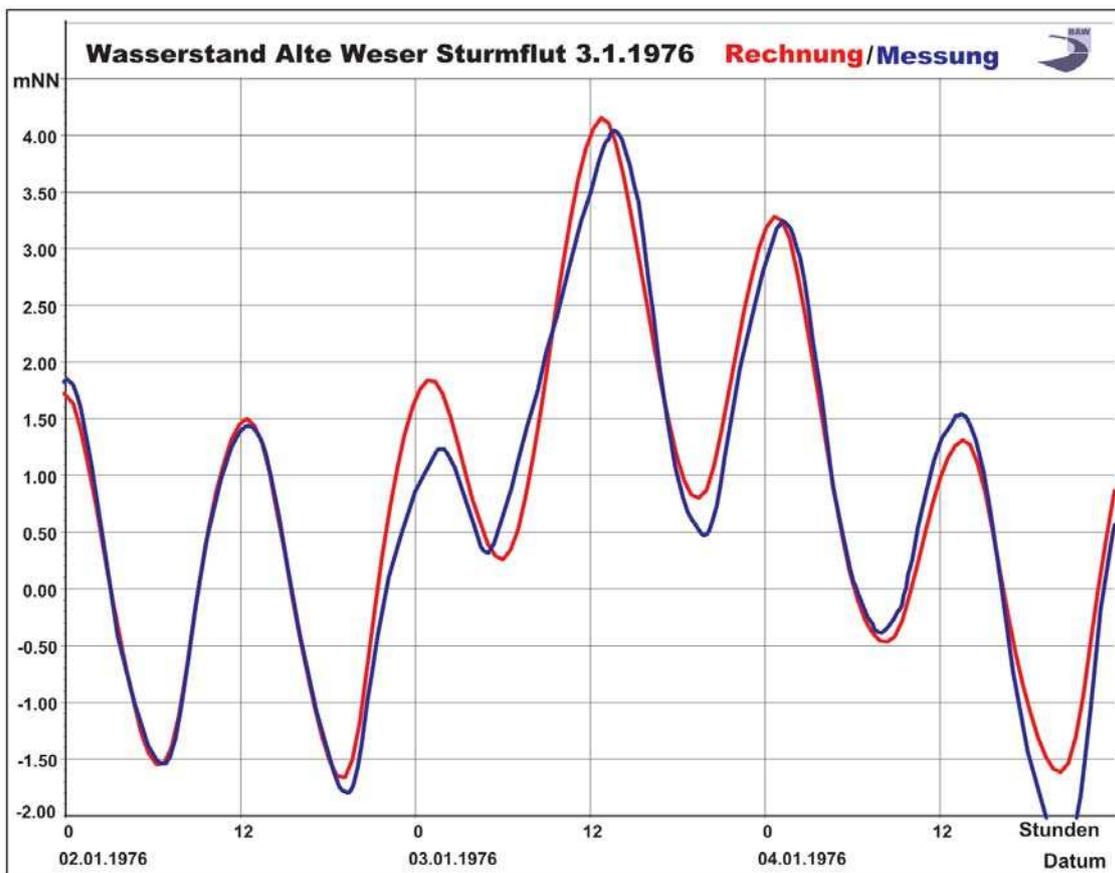


Abb. 43: Vergleich Pegel Alte Weser, Sturmflut vom 3.1.1976

5. Anwendungen

Zur Demonstration der vielgestaltigen Einsatzmöglichkeiten des Nordsee-Modells sollen hier einige Anwendungsrechnungen aufgezählt werden. Dabei wird unterschieden zwischen der Nutzung des gesamten Modells für großräumige Fragestellungen, des Gesamtmodells mit lokalen Netz- bzw. Topographieverfeinerungen sowie des Modells zur Generierung von Randwerten für eigenständige Ausschnittmodelle.

5.1 Gesamtmodell

Neben der hauptsächlichen Bearbeitung von Aufgaben der BAW wird das HN-Modell der Nordsee und der Deutschen Bucht z. Zt. in folgenden Kooperationen bzw. Forschungsaktivitäten verwendet:

- Zusammenarbeit mit der GKSS im Projekt: Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe **HIPOCAS** zur Berechnung von Wind, Wellen und Strömungen/Wasserständen über einen Zeitraum von 1958 bis 1998 (2000–2002).
- Zusammenarbeit mit dem BSH zur Bestimmung der Lowest Astronomical Tide **LAT** im Bereich der Deutschen Bucht als neues Bezugsniveau für Seekarten entsprechend dem SKN (2002).
- Zusammenarbeit mit der Wirtschaftsbehörde Hamburg, Strom- und Hafenbau im Rahmen des KFKI-Projektes „Charakterisierung der Tidekurve“ (2000–2002).

5.2 Modell mit lokalen Verfeinerungen

Zur Untersuchung von Teilbereichen innerhalb des gesamten Nordseemodells wurden/ werden folgende Simulationen durchgeführt:

- Untersuchung zur Baggerung einer neuen Hafeneinfahrt zum Fähranleger Wittdün/ Amrum, – Vorstudie – 4/2000
- Untersuchung der Auswirkungen eines Container-Terminals in Cuxhaven in der Elbmündung mit einem Modell der Deutschen Bucht – Machbarkeitsuntersuchung – 8/2000
- Untersuchungen zur Auswirkung der Sandentnahme auf die Tidedynamik im Feld DELPHIN/Westertill – Gutachten – 3/2001
- Risikoanalyse der geplanten Sandentnahme „Delphin“ in Bezug auf Heller und Küstenschutzanlagen – Gutachten – 8/2001
- Aufbau und Betrieb eines hochaufgelösten Elbeästuarmodells von Geesthacht über Cuxhaven bis in die Nordsee hinein zur Simulation von Transportprozessen im Übergangsbereich Küstensaum – Ästuarmündung – BAW-DH – 2003/2004.

5.3 Modell zur Berechnung von Randwerten

Die Anwendung des Nordseemodells zur Bestimmung von Randwerten zum Betrieb von Teilmodellen (Ästuarmodelle) spielt für die Fachaufgabe der BAW eine wichtige Rolle.

Beispiele sind:

- Elbmodell: Simulation der Tidedynamik mit Erweiterung des seewärtigen Modellrandes.
- Jade-Wesermodell: Berechnung der Tidedynamik und der Sturmfluten 1976 und 1994 (PLÜß et al., 2001).

- Emsmodell: Simulation der Sturmflut 1976 (PLÜß et al., 2001).
- Nordfriesland: Bereitstellung von Randwerten der Tidedynamik und der Sturmflut 1994 für das Amt für ländliche Räume (ALR) Husum.
- Ausschnittsmodell Helgoland: Simulation der Tidedynamik für Wellenuntersuchungen.

6. Zusammenfassung / Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Der grundlegende Aufbau des Modells der Nordsee und insbesondere der Deutschen Bucht in Bezug auf Topographie und Randsteuerung ist erfolgreich abgeschlossen. Der Modellaufbau basiert auf unstrukturierten Dreiecksnetzen zur Auflösung der komplexen Topografie im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht und der Ästuarmündungen sowie der gesamten Nordsee. Damit ist die durchgängige Interaktion zwischen Küstensaum und Ästuaren gewährleistet und wird nicht durch künstliche Modellränder gestört. Diese müssen mit aus Messungen (punktuell) gewonnen und inter- bzw. extrapolierten Randwerten gesteuert werden. Durch die großräumige Simulation stehen für verschiedene Zeiträume an jeder Stelle im Küstensaum synoptische Zustandsgrößen (Wasserstand, Geschwindigkeit, Durchfluss, Salzgehalt, Transportgrößen ...) als Steuerwerte für hochaufgelöste Ausschnittsmodelle zur Verfügung.

Die im Nordseemodell verwendete, optimierte Netztopologie genügt den Ansprüchen neuester Rechenmodellverfahren. Eine gute Nachbildung der komplexen Topographie, bei gleichzeitiger Begrenzung der Rechenpunktmenge und einem großen Rechenzeitschritt, gewährleistet eine hohe Simulationsgenauigkeit und gute Performanz.

Neben den Verifikationsstudien wurden bereits viele Systemstudien bzw. Anwendungsrechnungen durchgeführt und so die Praxistauglichkeit des Modells nachgewiesen. Diese gewährleistet eine gute Reproduktion der natürlichen Tide- und Sturmflutdynamik synoptisch für den Küstenbereich der Nordsee einschließlich der Unterläufe der deutschen Ästuare.

Durch den Aufbau des Nordseemodells besteht die Möglichkeit

- eine Berechnung von Randwerten im Mündungsgebiet der Ästuare für hochaufgelöste Gesamtästuarmodelle,
- Untersuchungen im Küstenvorfeld durch lokale Verfeinerungen innerhalb des bestehenden Gesamtmodells und
- Langfristsimulationen im Küstenbereich durchzuführen.

6.2 Ausblick

Weitergehende Entwicklungs- und Einsatzmöglichkeiten lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Topographie/Morphologie

- Nutzung von Topographiedatenbanken (Die Konsistenz synoptischer Daten ist Gegenstand des neuen KFKI-Forschungsprojektes KODIBA) zum
- Aufbau zurückliegender Jahrgangstopographien und zur
- Analyse von Verlagerungs- bzw. Umlagerungstendenzen im Küstensaum und in Ästuarmündungen.

Tide

- Weitergehende Verifikation anhand der Partialtidenanalyse mehrerer harmonischer Konstanten (M2, S2, O1, K1, M4, M6) von Simulationsergebnissen und synoptischen Pegelmessungen in der Deutschen Bucht (KFKI-Forschungsprojekt: Charakterisierung von Tidekurven).
- Berechnung historischer Tideverhältnisse im Vergleich zur Simulation gegenwärtiger und zukünftiger Tiden.
- Berechnung dreidimensionaler Prozesse mit dem selben Gitternetz und den mathematischen Verfahren TELEMAC3D und UnTRIM(3D).
- Bestimmung von großräumigen Auswirkungen von Baumaßnahmen im Küstenvorfeld und/oder im Mündungsbereich der Ästuare.

Wind

- Der Einfluss realer Windereignisse auf die Tidedynamik in der Nordsee (Windstau, internal surges).
- Die Bestimmung synthetischer bzw. abgeänderter Windereignisse (z. B.: Verlagerung von Zugbahnen bei Tiefdruckgebieten) auf die Tide- bzw. Sturmflutdynamik.

external surges

- Verlauf und Verformung bei der Propagation im Nordseebecken.
- Variation der Einsteuerung am Nord- bzw. Westrand.
- Analyse der langperiodischen Partialtiden bis hin zur Nodaltide (Periode = 18,6 Jahre).

Transportprozesse

- Einstieg in die Simulation großräumiger Transportprozesse Nordsee \leftrightarrow Deutsche Bucht \leftrightarrow Ästuare.
- Bereitstellung sedimentologischer Randwerte (Schwebstoff, Geschiebe), zusätzlich zu den hydrodynamischen Werten, zum Betrieb morphodynamischer Ästuarmodelle.
- Ansatz zur Berechnung von längerfristigen Umlagerungsprozessen im Küstenvorfeld und den Ästuarmündungen.

Zur Untersuchung vergangener und zukünftiger hydrographischer Situationen ist es nötig, die wesentlichen Einflussgrößen zu kennen und gegebenenfalls zu variieren und/oder zu kombinieren. Hierdurch lassen sich weitergehende Erkenntnisse gewinnen, wie z. B.:

- Der Einfluss der großräumigen Topographieänderungen im Küstenvorfeld auf die Tidedynamik.
- Hindcast-Simulation älterer Sturmfluten und Variation der Parameter (Windrichtung, -dauer, -stärke) zur Berechnung maximal möglicher Wasserstände (Tide, Sturmflut).
- Analyse des Windstaus in der Nordsee und der Deutschen Bucht.
- Generierung von Langfristszenarien (Monate, Jahre), z. B. für morphologische Simulationen in den Gesamtästuarmodellen.
- Bestimmung von Wasserstands- und Strömungsverhältnissen in Küstengebieten der Deutschen Bucht zur Kopplung mit der Berechnung von Seegang (z. B. Seegangsklima um Helgoland).
- Auswirkungen von Küstensenkungen bzw. Meeresspiegelanstieg.

Eine Übersicht des Nordseemodells gibt das Poster:

Modell der Nordsee, der Deutschen Bucht und der deutschen Ästuare _ (<http://www.hamburg.baw.de/docs/>).

7. Schriftenverzeichnis

- BACKHAUS, J. O.: Simulation von Bewegungsvorgängen in der Deutschen Bucht. Technical Report 15, Deutsches hydrographisches Institut, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Bernhard-Nocht-Str. 78, Hamburg, 1980.
- CAÑIZARES, R.; HEEMINK, A.W. u. VESTED, H. J.: Application of Advanced Data Assimilation Methods for the Initialisation of Storm Surge Models. *Journal of Hydraulic Research*, 36(4): 655–674, 1998.
- CASULLI, V.; CHENG, R. T. u. LANG, G.: Mathematical Model UnTRIM – Validation Document-Version 0.2. Technical report, 2002: <http://www.hamburg.baw.de/hnm/untrim/PDF/vd-untrim-0-2.pdf>.
- CASULLI, V. u. ZANOLLI, P.: A Three-Dimensional Semi-Implicit Algorithm for Environmental Flows on Unstructured Grids. *Proceedings of ICFD Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics*, Oxford, 1998.
- DAVIES, A. M.: A Numerical Model of the North Sea and its Use in Choosing Locations for the Deployment of Off-shore Tide Gauges in the JONSDAP'76, *Oceanographic Experiment*. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 29(1): 11–24, 1976.
- DHI: Tafeln der astronomischen Argumente v_0+v und Korrekturen j, v zum Gebrauch bei der harmonischen Analyse und Vorausberechnung der Gezeiten für die Jahre 1900 bis 1999, Deutsches Hydrographisches Institut, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie -2276, Bernhard-Nocht-Str. 78, Hamburg, 1967.
- DIETRICH, G.; KALLE, K.; KRAUS, W. u. SIEDLER, G.: *Allgemeine Meereskunde*. Borntträger, Berlin, Stuttgart, 1975.
- DUWE, K.: Untersuchungen zur Simulation gezeiten- und meteorologisch bedingter Bewegungsvorgänge in der Nordsee mit Hilfe barotroper und barokliner numerischer Modelle. Diplomarbeit im Fach Ozeanographie, Universität Hamburg, 1980.
- ELIAS, E.: Validation and Calibration of Wind in the ZUNO model - Project: Updrift Barrier Inlet Dynamics. TU-Delft, Draft Version 0.1, 2001.
- GÖNNERT, G.; HEYER, H.; GIESE, H.; ISERT, K. u. PLÜß, A.: Charakterisierung der Tidekurve, Abschlussbericht eines KFKI-Projektes. Nicht veröffentlicht, 2003.
- GRAY, G. G.; DROLET, J. u. KINNMARK, P. E.: A Simulation of Tidal Flow in the Southern Part of the North Sea and the English Channel. *Advances in Water Resources*, 10: 131–137, 1987.
- HEAPS, N. S.: A Two-Dimensional Numerical Sea Model. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A. Mathematical and Physical Science*, 265 (1160): 93–137, 1969.
- HERVOUET, J. M. u. VAN HAREN, L.: TELEMAC2D Version 3.0 Principle Note. Rapport EDF HE-4394052B, Electricité de France, Département Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou CEDEX, 1996.
- HOLZ, K.-P.; PLÜß, A. u. SALAMUN, T.: Mathematisches Modell Sylt. Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover, 1988.
- HORN, W.: Über die Darstellung der Gezeiten als Funktion der Zeit. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 1(4): 124–140, 1948.
- JENSEN, J. u. MUDERSBACH, C.: Long-Term Changes of the Water Levels Along the German North Sea Coastline. *Littoral 2002, The Changing Coast*, EUROCOAST/EUCC, Porto, 2002.
- KELVIN, LORD alias THOMSON, W.: Reports on the Committee for the Purpose of Promoting the Extension, Improvement and Harmonic Analysis of Tidal Observation. *British Association for the Advancement of Science Report*, London, 1868.
- KLEINE, E.: Das operationelle Modell der Nordsee und Ostsee, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Bernhard-Nocht-Str. 78, Hamburg, 1994.
- KOOPMANN, G.: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 in ozeanographischer Sicht. *Die Küste*, 2: 55–68, 1962.
- LASSEN, H. u. SIEFERT, W.: Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee - säkularer Trend und Verhältnisse um 1980 (Schlussbericht eines KFKI-Projektes). *Die Küste*, 52: 85–137, 1991.
- LE PROVOST, C. u. FORNERINO, M.: Tidal Spectroscopy of the English Channel With a Numerical Model. *Journal of Physical Oceanography*, 15: 1009–1031, 1985.
- MAIER-REIMER, E.: Residual Circulation in the North Sea Due to M2-tide and Mean Annual Wind Stress. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 30(3): 69–80, 1977.

- MARINEOBSERVATORIUM WILHELMSHAVEN: Karten der harmonischen Gezeitenkonstanten für das Gebiet der Nordsee. Oberkommando der Kriegsmarine, 1942.
- MILBRADT, P.; LIPPERT, W. u. SELLERHOFF, F.: Preprozessor JANET Benutzerhandbuch Version 1.4. smile consult GmbH, Vahrenwalder Straße 7, 30165 Hannover, 2002.
- MÜLLER-NAVARRA, H. u. MITTELSTAEDT, E.: Schadstoffausbreitung und Schadstoffbelastung in der Nordsee – Eine Modellstudie –. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Ergänzungsheft B, 18, 1987.
- OOST, A. P.; DE HAAS, H.; JENSEN, F.; VAN DEN BOOGERT, J. M. u. DE BOER, P. L.: The 18.6 yr Nodal Cycle and its Impact on Tidal Sedimentation. Sed. Geol., Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 87: 1–11, 1993.
- PANSCH, E.: Harmonische Analyse von Gezeiten- und Gezeitenstrombeobachtungen im Deutschen Hydrographischen Institut, Wiss.-Techn. Berichte 1988-1. 2350, Deutsches Hydrographisches Institut, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Bernhard-Nocht-Str. 78, Hamburg, 1988.
- PLÜß, A.: Netzbearbeitung und Verfahrensverbesserungen für Tidemodelle nach der Finiten Element Methode. Nr. 35, Inst. f. Strömungsmech. und Elektr. Rechnen i. Bauwesen, Dissertation. Univ. Hannover, 1994.
- PLÜß, A.; RUDOLPH, E. u. SCHRÖDTER, D.: Characteristics of Storm Surges in German Estuaries. Climate Research, 18: 71–76, 2001.
- PLÜß, A.; TANEGUCHI, T. u. HOLZ, K. P.: Grid-Generation and Grid-Optimization for Estuary Modelling. Advances in Hydro-Science and -Engineering, Part A, Edit. by Sam S. Y. Wang – Proceedings of the first Int. Conf. on Hydrosience and -Eng., Washington, D. C. June 7–11, 1993, I: 1997–2003, 1993.
- SCHMIDT, H. u. PÄTSCH, J.: Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. Die Küste, 54: 131–142, 1984.
- SEITZ, R. u. ZEH, H.: Archivierung von KUEstenpeil DATen auf dem Zentralrechner der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) bei der BAW in Karlsruhe. (2), 11, 1996.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. Die Küste, 42: 1–77, 1985.
- STENGEL, T.: Änderung der Tidedynamik in der Deutschen Bucht und Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs. Bericht Nr. 38 des Inst. f. Strömungsmech. u. Elektron. Rechnen i. Bauwesen, Uni Hannover, 1995.
- SÜNDERMANN, J.: Hydrodynamics of Bays and Coastal Waters; Numerical Computation of Tidally and Wind Generated Motion Processes in Estuaries and Coastal Waters. Int. Center for Mechanical Sciences; UDINE/ITALY, July 1974.
- VERBOOM, G. K.; RONDE, J. G. DE u. DIJK, R. P. VAN.: A Fine Grid Tidal Flow and Storm Surge Model of the North Sea. Continental Shelf Research, 12(2/3): 213–233, 1992.
- WALTERS, R. A.: A Model for Tides and Currents in the English Channel and Southern North Sea. Advances in Water Resources, 10: 138–148, 1987.
- WERNER, W. E. u. LYNCH, D. R.: Field Verification of Wave Equation Tidal Dynamics in the English Channel and Southern North Sea. Advances in Water Resources, 10: 115–130, 1987.
- WERNER, F. E. u. LYNCH, D. R.: Tides in the Southern North Sea/English Channel: Data Files and Procedure for Reference Computations. Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, NH, USA, 1988.
- ZIELKE, W.; MAYERLE, R.; KÜCK, F.; GROß G. u. NIELINGER, J.: Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Wasserstände und Windverhältnisse an der Deutschen Nordseeküste, 1. Zwischenbericht. Inst. f. Strömungsmech. u. Elektron. Rechnen i. Bauwesen, Uni Hannover, 1995.
- ZIELKE, W.; MAYERLE, R.; KÜCK, F.; HOYME, H.; GROß, G.; ROTH, R.; NIELINGER, J. u. BUSCH, U.: Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Wasserstände und Windverhältnisse an der Deutschen Nordseeküste, 2. Zwischenbericht. Inst. f. Strömungsmech. u. Elektron. Rechnen im Bauwesen, Uni Hannover, 1996.