

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.

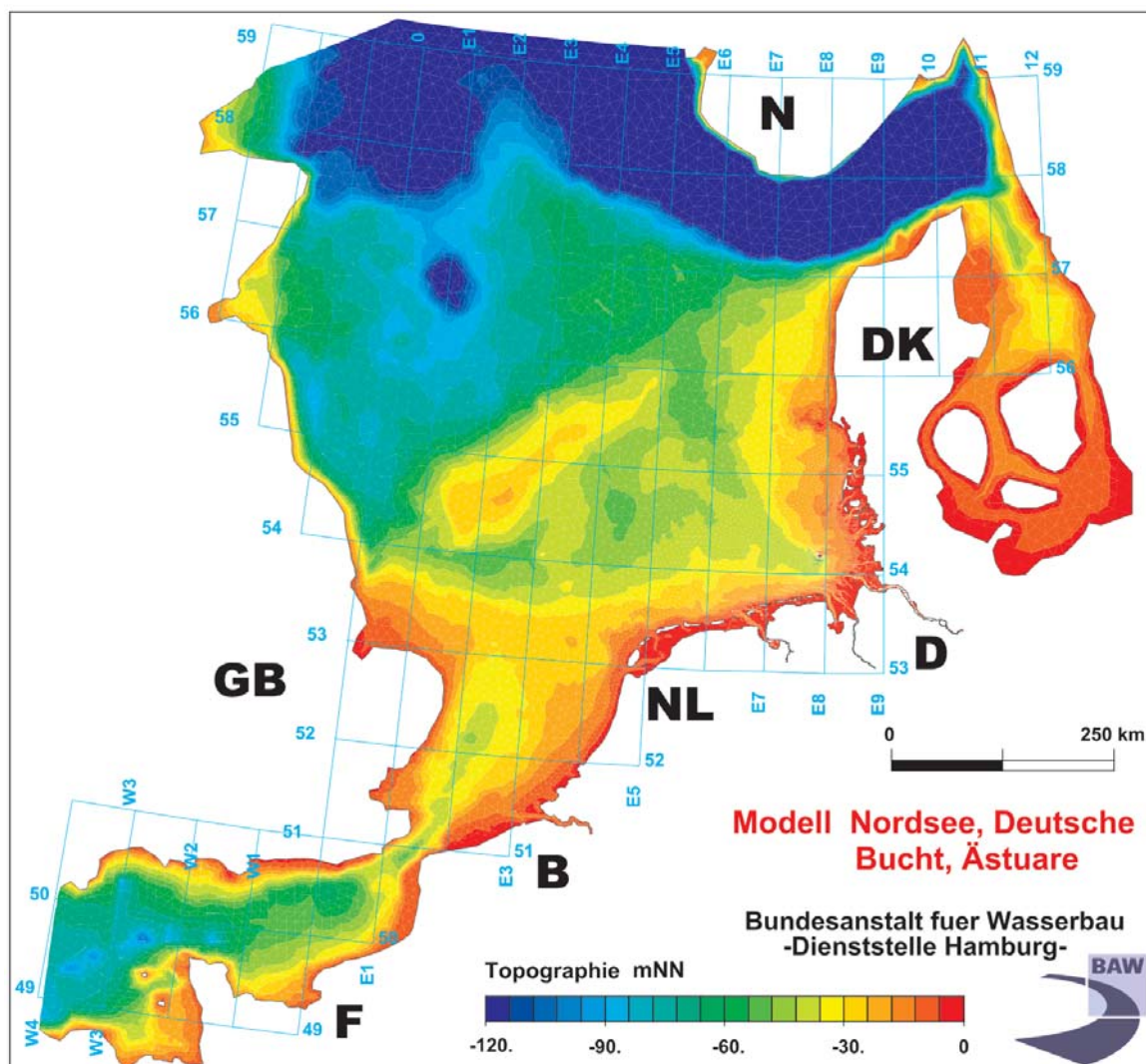


Abb. 1: Tiefenisflächen in der Nordsee, der Deutschen Bucht einschließlich der schematisierten deutschen Ästuarie

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 Watttrinnen, 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.

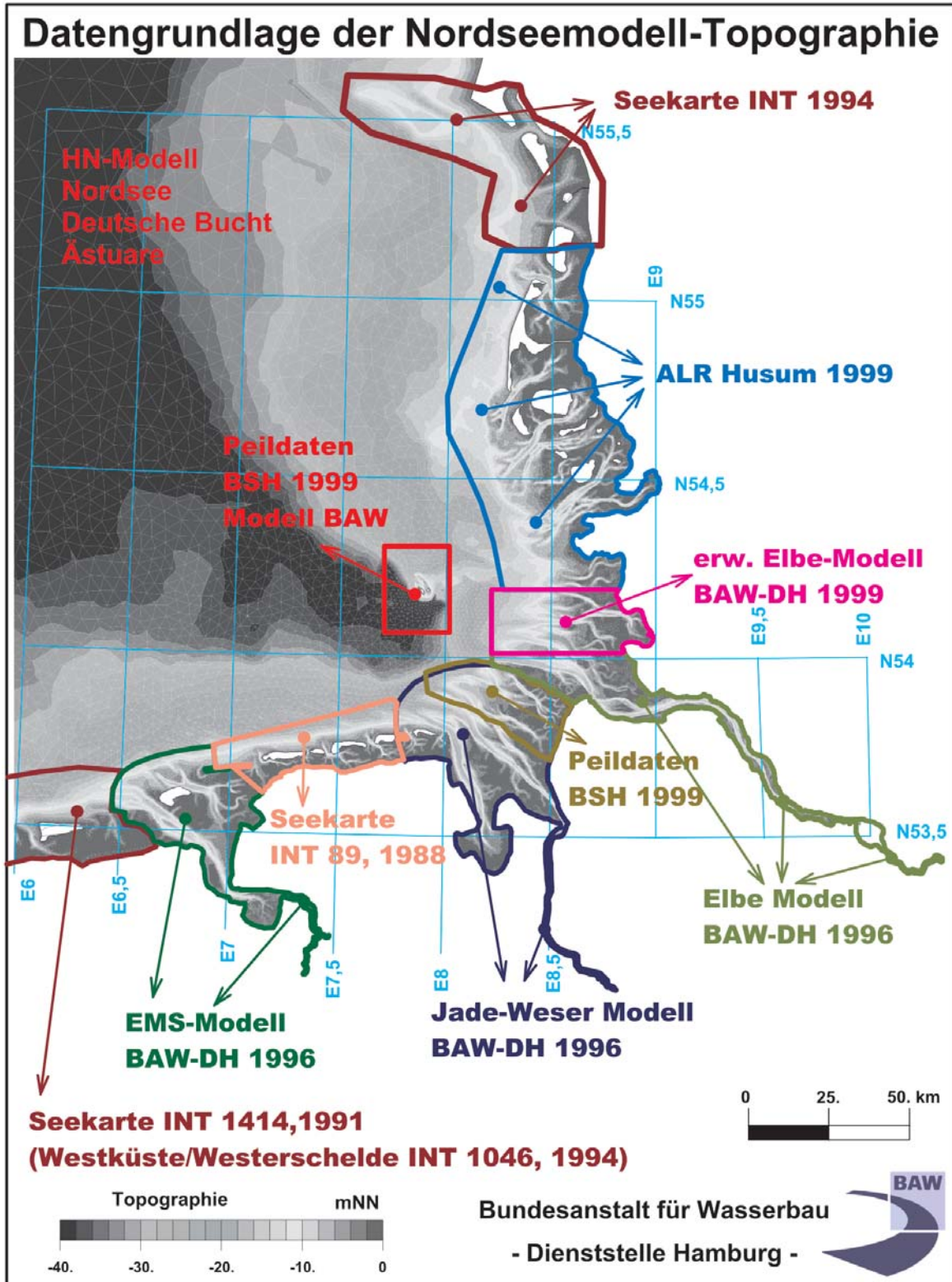


Abb. 2: Grundlage der Topographie des Nordseemodells in der Deutschen Bucht

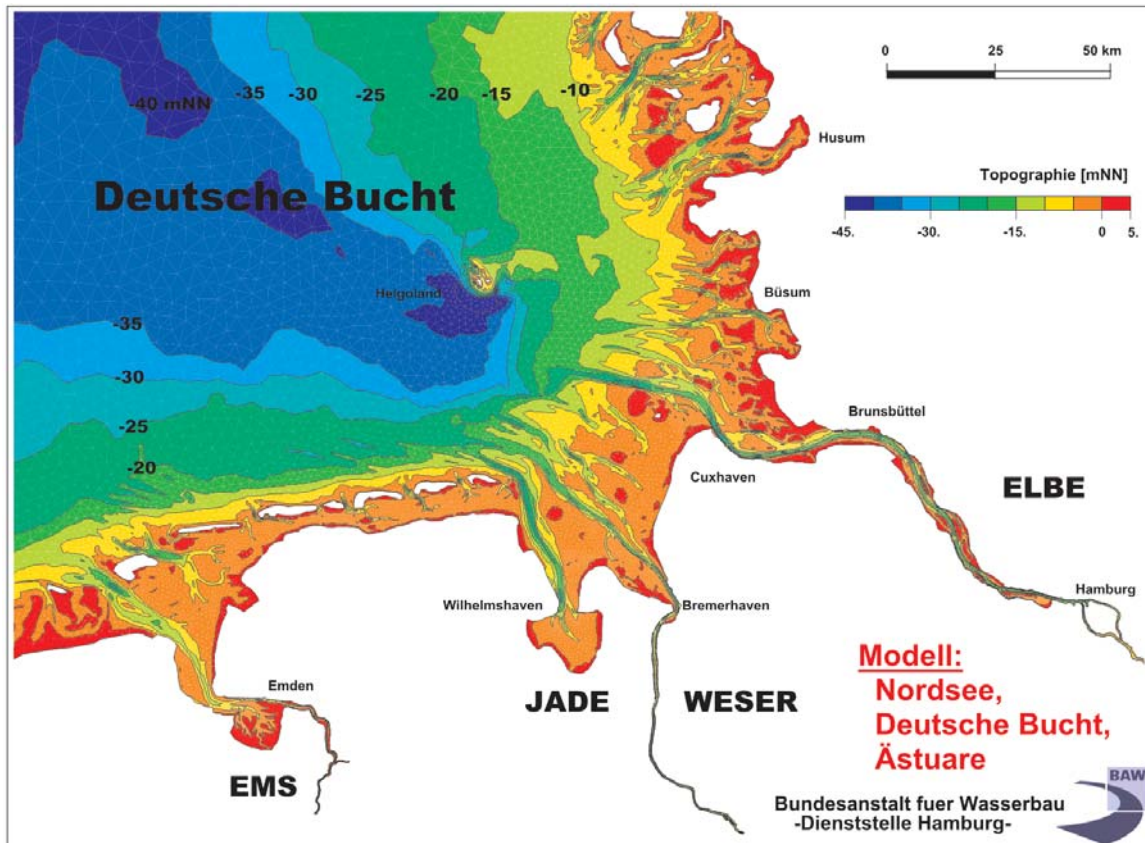


Abb. 3: Tiefenisoflächen in der Deutschen Bucht und den deutschen Ästuaren

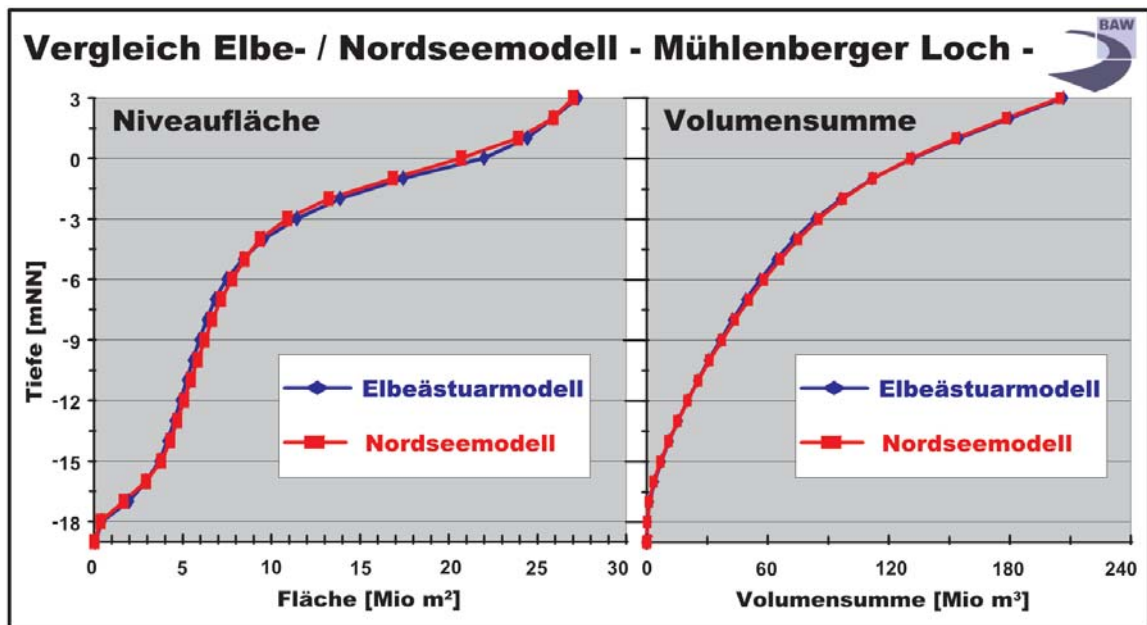


Abb. 4: Vergleich der Niveauflächen und Volumensummen zwischen Ästuarmodell der Elbe und Nordseemodell (Ausschnitt Mühlenberger Loch)

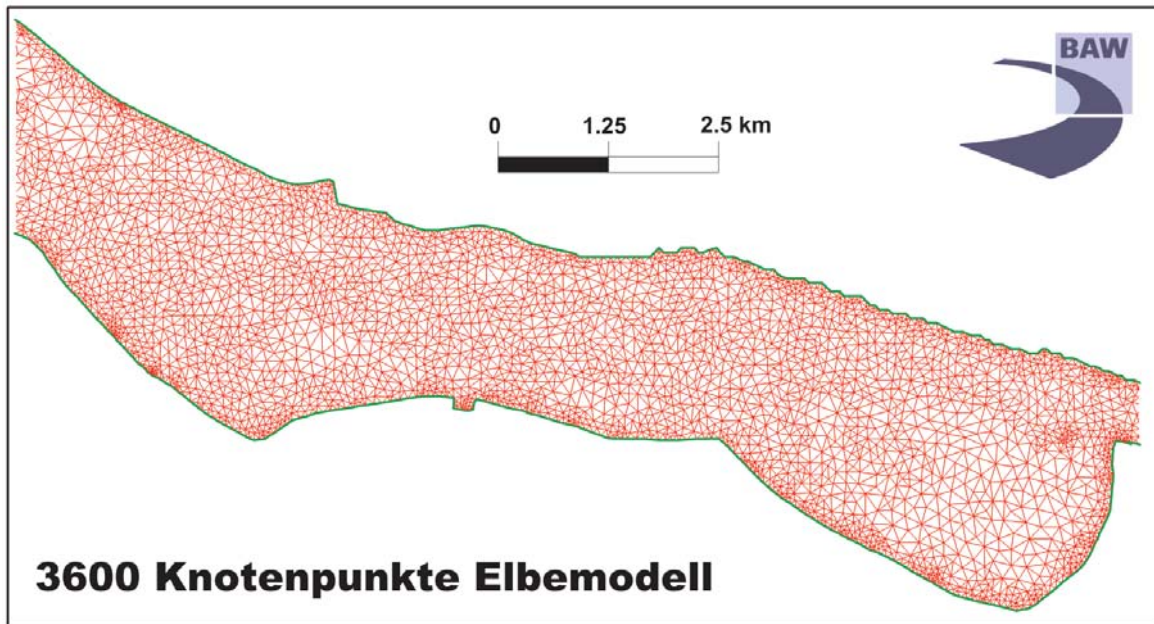


Abb. 5: Gitternetz im Ästuarmodell: **3600 Knotenpunkte**

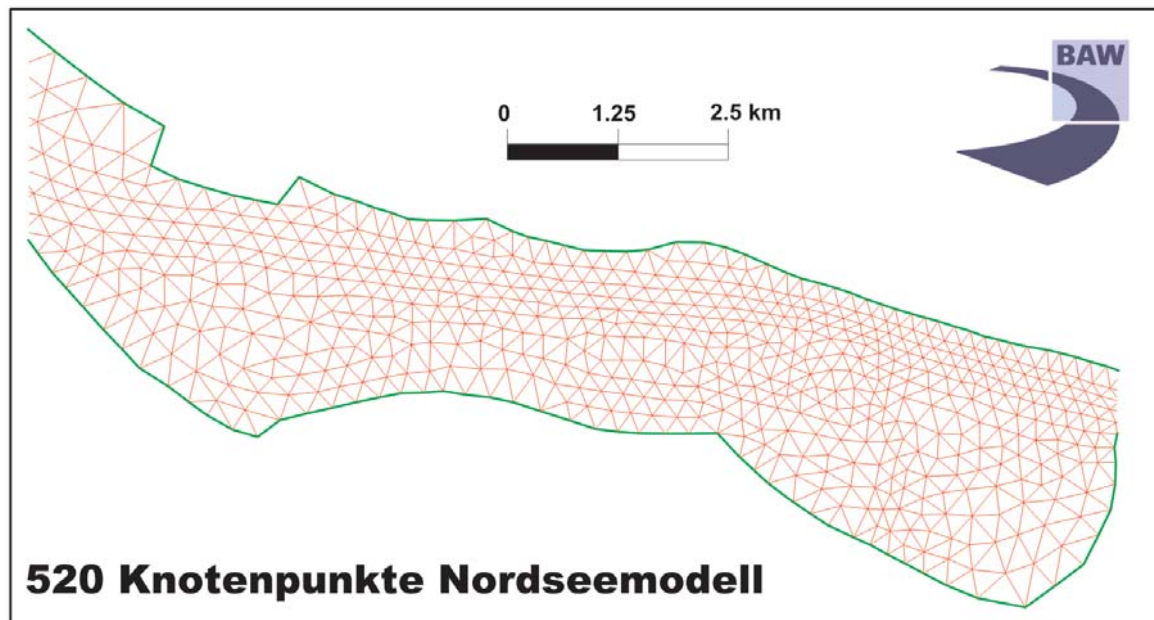


Abb. 6: Gitternetz im Nordseemodell: **520 Knotenpunkte**

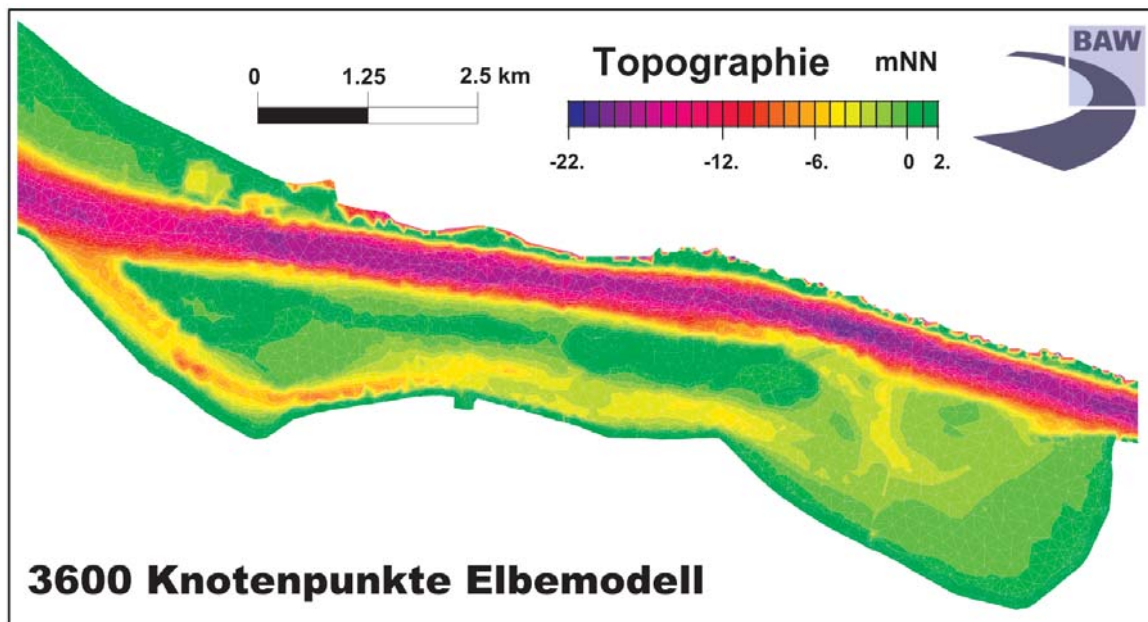


Abb. 7: Tiefen im Ästuarmodell: **3600 Knotenpunkte**

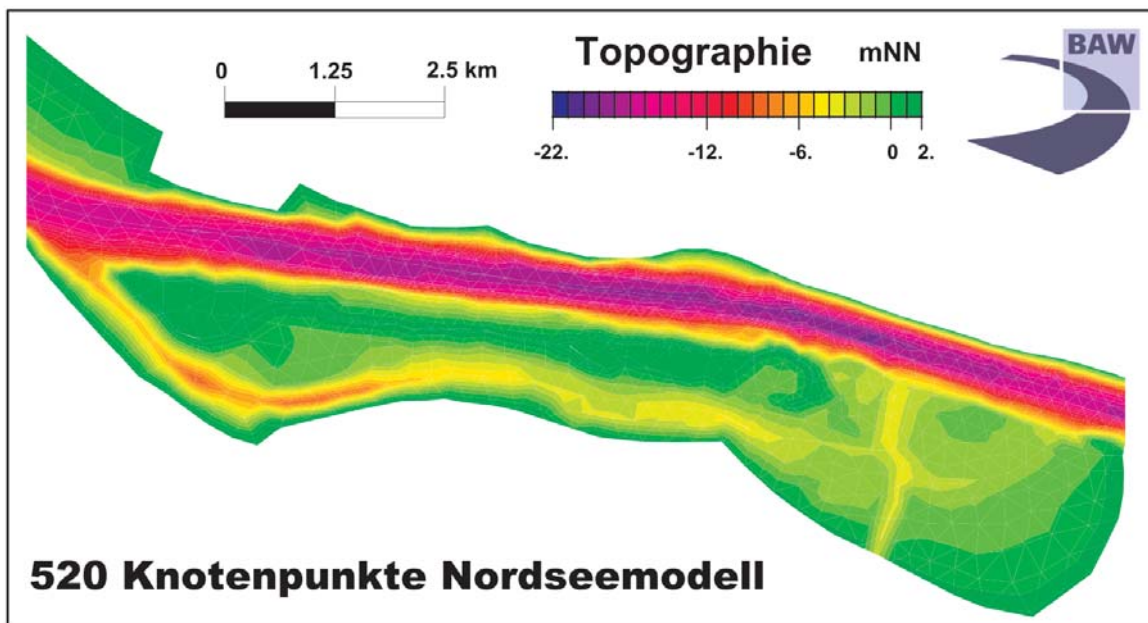


Abb. 8: Tiefen im Nordseemodell: **520 Knotenpunkte**

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 Rechenetz 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 Ästuare 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 Ästuare 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-

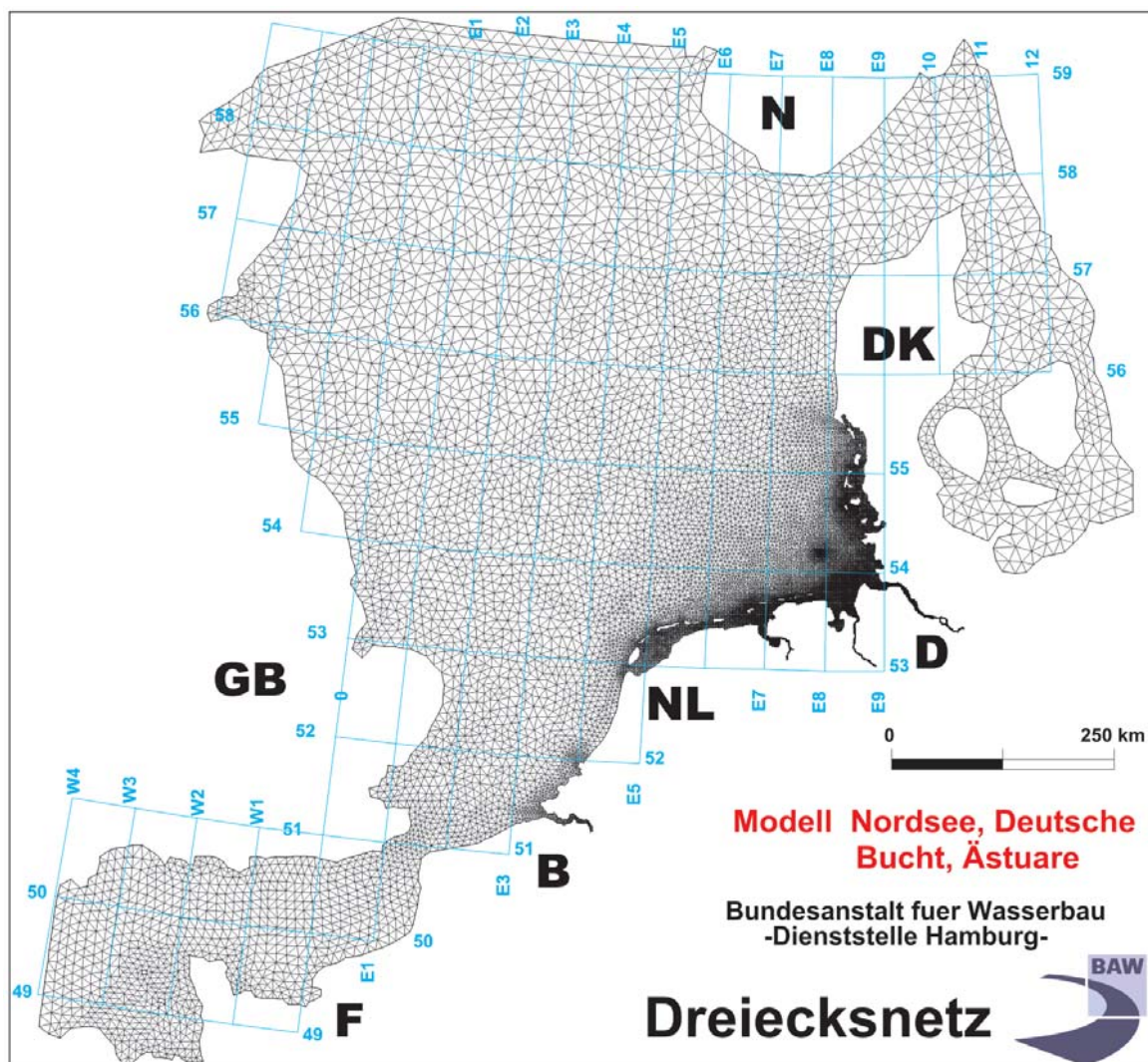


Abb. 9: Verteilung der Dreieckselemente in der Nordsee einschließlich der schematisierten deutschen Ästuar

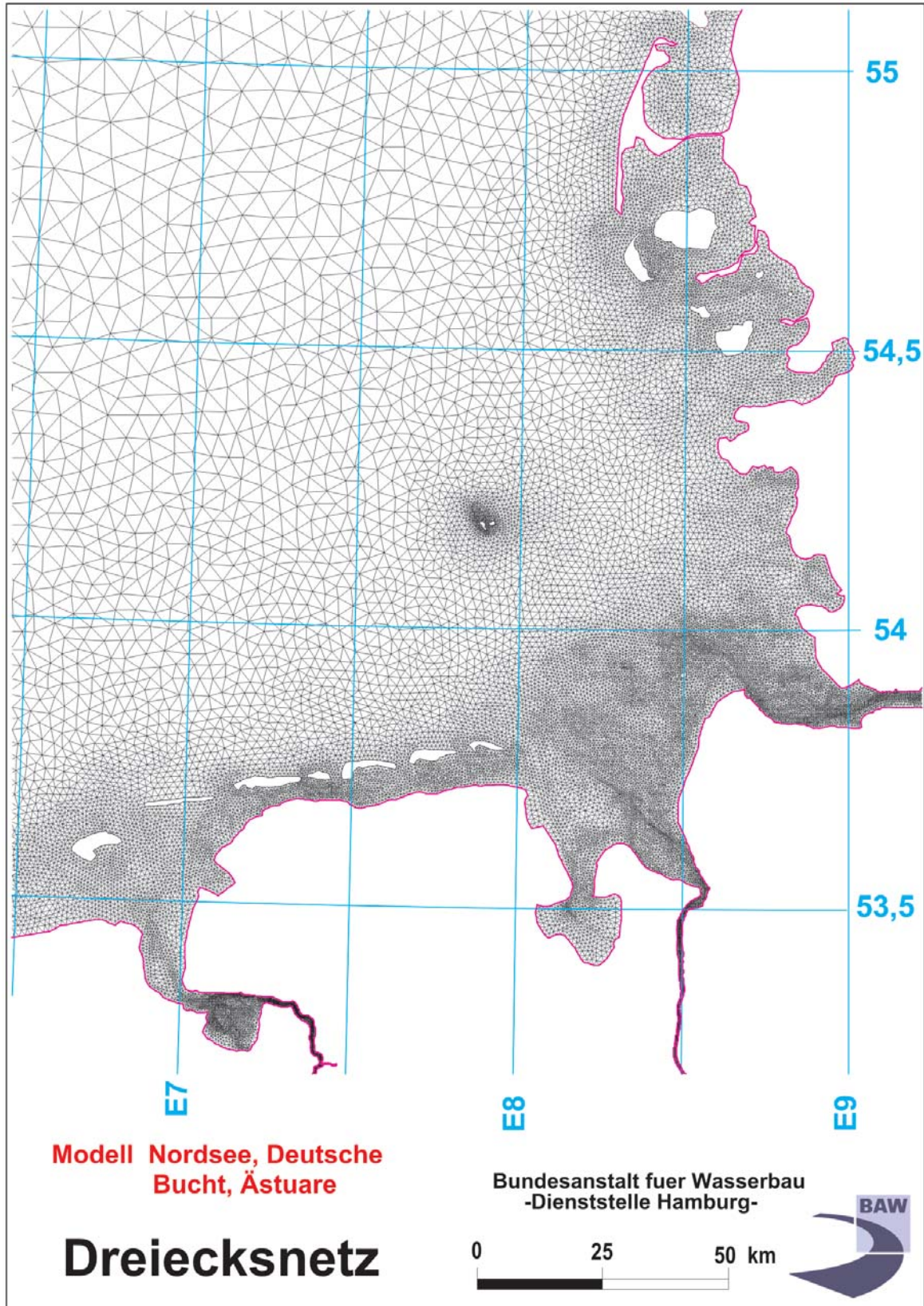


Abb. 10: Elementnetz des Nordseemodells in der Deutschen Bucht mit den Ästuaren

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-

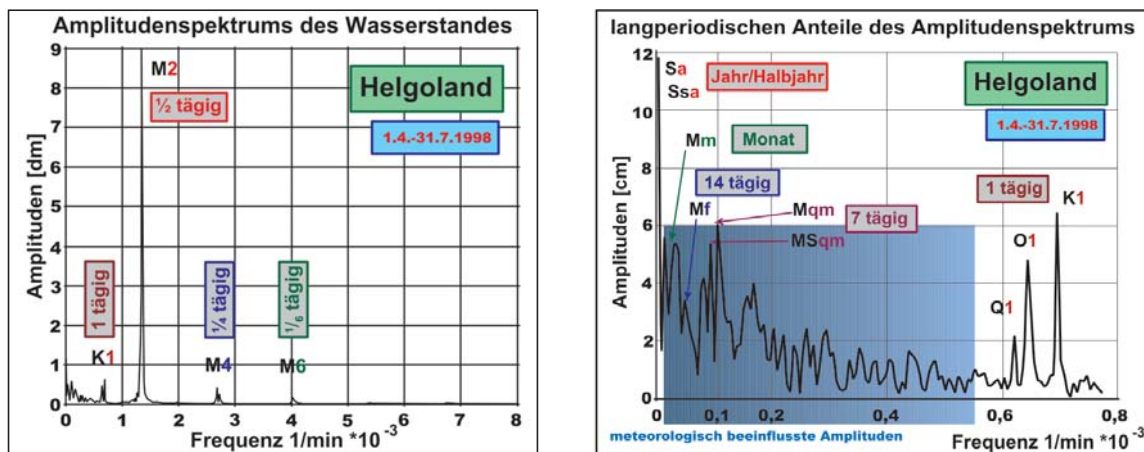


Abb. 11: Amplitudenspektrum am Pegel Helgoland

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

