

Über neuere Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage für die deutsche Nordseeküste

Von SYLVIN H. MÜLLER-NAVARRA

Zusammenfassung

In diesem Aufsatz werden die Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage für die deutsche Nordseeküste beschrieben, wie sie im Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Erledigung der gesetzlichen Aufgaben betrieben werden. In den letzten 15 Jahren hat es dabei eine rasante Entwicklung gegeben. Mitte der 1990er Jahre, als auf meteorologischer Seite die numerische Wettervorhersage (NWV) der klassischen Synoptik bei der maritimen Windvorhersage ernsthafte Konkurrenz machte, wurden auf ozeanographischer Seite noch hauptsächlich empirische Wasserstandsvorhersageverfahren angewendet. Es gab zwar bereits numerische Wasserstandsmodelle, gespeist aus der NWV, aber die Vorhersagen erreichten noch nicht die Genauigkeit der manuellen Vorhersage. Das ist jetzt anders. Die Wasserstandsvorhersage schöpft parallel Information aus vielen Welten – Synoptik, Empirie, NWV, Wasserstandsmodelle, Statistik, Automation – und gewinnt dadurch an Qualität.

Schlagerwörter

Wasserstandsvorhersage, Sturmflutvorhersage, Deutsche Bucht

Summary

This paper describes the methods used at Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH, Federal Maritime and Hydrographic Agency) to forecast water levels and storm surges for the German North Sea coast, in accordance with the agency's statutory task. There has been rapid development in this area in the past fifteen years. In the mid-1990s, when numerical weather prediction in meteorology competed increasingly with the traditional synoptic approach in maritime wind forecasting, oceanographers still relied mainly on empirical water level prediction methods. Although there already existed numerical water level prediction techniques at the time which used numerical weather prediction input data, the accuracy of these predictions lagged behind that of the traditionally made predictions. The situation is different now. Today, water level forecasts are based on information from a variety of sources: synoptics, empiricism, numerical weather prediction, water level models, statistics, and automated systems – which increases their quality considerably.

Keywords

Water level forecast, storm surges forecast, German bight

Inhalt

1. Einleitung	194
2. Verfahren und Informationsflüsse	194
2.1 Die Atmosphärenmodelle GME und COSMO-EU	195
2.2 Das Atmosphärenmodell GFS	196
2.3 Gezeitenvorausberechnung	196
2.4 Numerische Modelle, 2D-Windstaumodelle, 3D-Schelfmeermodelle	197

2.5	BSH-MOS (Model Output Statistics)	197
2.6	Wasserstandsdatenfernübertragung (WDFÜ)	198
2.7	Automatische Scheitelwerterkennung und Windstauermittlung	198
2.8	Empirisch-statistische Verfahren	199
2.9	Synoptik, Modellinterpretation	199
2.10	Mensch-Maschine-Mix (MMM), Windstauvorhersage	200
2.11	Wasserstandsvorhersage, Sturmflutwarnung	201
3.	Weitere Möglichkeiten und Ausblick	201
4.	Danksagung	202
5.	Schriftenverzeichnis	202

1. Einleitung

Eine die ganze deutsche Nordseeküste und die Gezeitenflüsse abdeckende, regelmäßige Wasserstandsvorhersage für die Öffentlichkeit gibt das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) bzw. seine Vorgängerorganisationen seit mehr als 80 Jahren heraus (TOMCZAK, 1954; MÜLLER-NAVARRA, 2009a). Hinzu treten bei Bedarf Sturmflutwarnungen. Diese Aufgaben sind dem BSH durch das Seeaufgabengesetz zugeschrieben (ANONYMUS, 2002/2006), wobei eine sowohl inhaltlich als auch räumlich enge Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD/Seewetteramt) in Hamburg praktiziert wird.

Die im Laufe der Jahre zur Wasserstandsvorhersage verwendeten Verfahren sind in der Literatur hinlänglich beschrieben worden (TOMCZAK, 1960; ANNUTSCH, 1976; MÜLLER-NAVARRA und GIESE, 1999; MÜLLER-NAVARRA et al., 2003). Da der astronomisch erklärbarer Anteil an den Wasserstandsschwankungen – die Gezeiten – schon längere Zeit recht genau vorauszuberechnen ist, behandeln die genannten Zitate vornehmlich den Windstauanteil. Unter Windstau wird hier die Differenz zwischen Scheitelwasserstand und astronomisch vorausberechneter Hoch- bzw. Niedrigwasserhöhe verstanden. Dabei können die Eintrittszeit des Scheitelwasserstandes und die astronomische Eintrittszeit zeitlich gegeneinander verschoben sein. Für Zwecke der Windstauvorhersage wurden bis Mitte der 1990er Jahre vornehmlich empirische Verfahren eingesetzt, bei denen aus Windvorhersagen (Stärke und Richtung) für die Deutschen Bucht der örtliche Windstau aus Tabellen entnommen und dem astronomisch vorausberechneten Gezeitenwasserstand (ANONYMUS, 2009) hinzuaddiert wurde, um so den Gesamtwasserstand vorherzusagen.

Seit Anfang der 1980er Jahre werden beim BSH numerische Windstaumodelle operationell gerechnet (SOETJE und BROCKMANN, 1983), die von Wettermodellen des Deutschen Wetterdienstes angetrieben werden. Seit etwa 1995 ist deren Vorhersagegenauigkeit den bis dato benutzten rein empirischen Verfahren überlegen. Das gilt aber nicht in jedem Falle und ganz sicher nicht für jede schwere Sturmflut (MÜLLER-NAVARRA, 2008).

Dargestellt werden im Folgenden bewährte und neuere Verfahren zur Windstauermittlung, wobei hier deren automatische Verknüpfung im Vordergrund steht.

2. Verfahren und Informationsflüsse

In den letzten 15 Jahren haben sich die Möglichkeiten der Wasserstandsvorhersage radikal erweitert. Es stehen nicht nur erheblich mehr Wasserstandsdaten von vielen Gezeitenpegeln über die Wasserstandsdatenfernübertragung (WDFÜ) bereit, sondern auch Ergebnisse aus unterschiedlichen numerischen Modellketten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Damit ist eine rein manuelle Bearbeitung der riesigen Datenmengen nicht mehr mög-

lich, und es sind neue Verfahren der Informationsverknüpfung gefragt. Abb. 1 zeigt die Verfahren und Informationsflüsse, wie sie im BSH z. Zt. operationell genutzt, betrieben und angewandt werden. Im Folgenden werden diese Verfahren und deren Verknüpfung beschrieben. Wo bereits an anderer Stelle über die Einzelverfahren ausführlich berichtet wird, genügt hier eine kurze Beschreibung und der Verweis auf das entsprechende Literaturzitat. Der Übersichtlichkeit halber soll sich die Struktur dieses Aufsatzes an der Abb. 1 orientieren; die Quadrate im Flussdiagramm werden in einzelnen Abschnitten von oben (Abschn. 2.1–2.3) nach unten (Abschn. 2.11) abgehandelt.

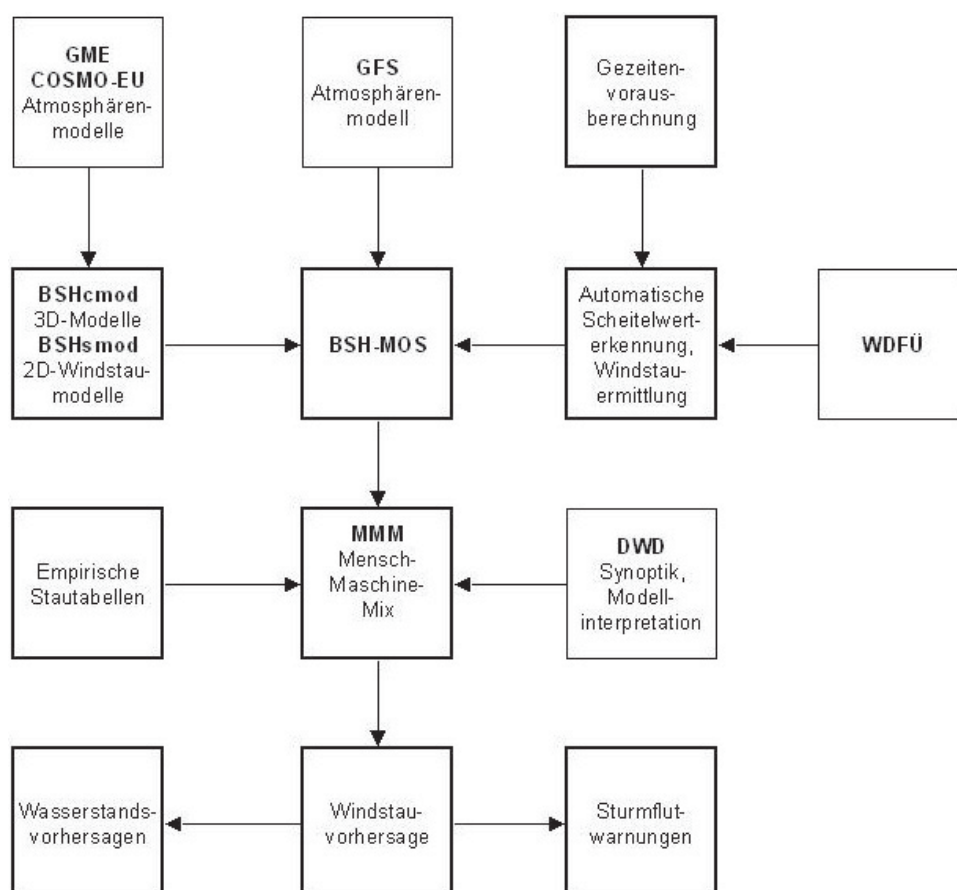


Abb. 1: Verfahren und Informationsflüsse zur Ermittlung des Windstaus

2.1 Die Atmosphärenmodelle GME und COSMO-EU

Jedes numerische Wasserstandsmodell benötigt an seinen Gitterpunkten zumindest Wind- und Luftdruckvorhersagen; in aller Regel werden diese von numerischen Atmosphärenmodellen bereitgestellt. Das BSH nutzt zum Antrieb seiner Schelfmeer-Modellkette (DICK et al., 2001) ausschließlich Ergebnisse der NWV des DWD (MAJEWSKI et al., 2002; STEPELER et al., 2003). Neben Wind- und Luftdruck erhält das 3D-Modell (BSHcmod) der BSH-Modellkette noch die Lufttemperatur, die spezifische Feuchte und die Gesamtbewölkung. Damit sind dann auch Berechnungen der Wärmeflüsse an der Meeresoberfläche möglich (MÜLLER-NAVARRA und LADWIG, 1997).

2.2 Das Atmosphärenmodell GFS

Das von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) betriebene Global Forecast System (GFS) (KALNAY et al., 1990) kommt hier als unabhängige Alternative zur DWD-Modellkette über BSH-MOS (Abschn. 2.5) ins Spiel. Die Ergebnisse des GFS sind weltweit über Internet frei verfügbar und erfahren dadurch eine breite Anwendung. Die hier benutzte GFS-Version hat eine horizontale Auflösung von 1° meridional und longitudinal und rechnet wie GME/COSMO-EU viermal täglich. GFS liefert im BSH-MOS-Verfahren die meteorologischen Größen als Eingangsgrößen für die MOS-Prädiktoren.

2.3 Gezeitemvorausberechnung

Wasserstanddaten von mehr als 150 gezeitenbeeinflussten Pegeln werden im BSH analysiert und astronomische Gezeitemvorausberechnungen erstellt. Dieses geschieht jeweils für das gesamte nachfolgende Jahr im Voraus. Die Vorausberechnungen werden in den Gezeitentafeln und im Gezeitenkalender veröffentlicht (ANONYMUS, 2009) und stehen zusätzlich als digitale Daten zur Verfügung. In diesen Datensätzen enthalten sind Hoch- und Niedrigwasserhöhen sowie deren Eintrittszeiten. Diese sehr präzisen Datensätze sind das unverzichtbare Gerüst für jede Wasserstandsvorhersage, und es ist auch wegen der ausgeprägten morphodynamischen Prozesse an der deutschen Nordseeküste notwendig, dass die Analysen und Vorausberechnungen jährlich auf der Basis aktueller Messdaten erfolgen.

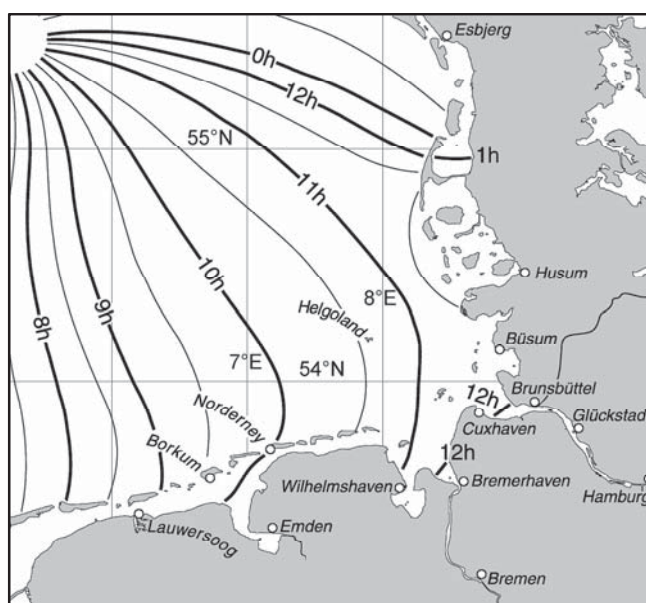


Abb. 2: Linien gleichen mittleren Hochwasserzeitunterschiedes gegen den Durchgang des Mondes durch den Nullmeridian. Aus: Gezeitentafeln für das Jahr 2010

Die mittleren Hochwasserintervalle – das sind die Zeiten, die zwischen einer Mondkulmination und den örtlichen Hochwasserzeiten im Mittel verstreichen – nehmen in der Deutschen Bucht Werte zwischen 9 h 46 min (Borkum, Fischerbalje) und 16 h 29 min (Geesthacht, Wehr Unterpegel) an. Das bedeutet, dass ein Hochwasserscheitel fast 7 h benötigt, um von der westlichsten ostfriesischen Insel bis zum am weitesten stromauf an der Elbe liegenden

Gezeitenpegel zu laufen. Bei Sturmfluten sind die Eintrittszeiten vereinzelt um bis zu 3 h verschoben. Letzteres und die langen Laufzeiten stellen bei einer automatisierten Wasserstandsvorhersage für die deutsche Nordseeküste eine enorme Komplikation dar. Nur eine strenge astronomische Zuordnung zu den durchnummerierten Mondkulminationen schafft Abhilfe (MÜLLER-NAVARRA, 2009b).

2.4 Numerische Modelle – 2D-Windstaumodelle, 3D-Schelfmeermodele

Zweidimensionale Wasserstandsmodelle haben eine sehr lange Tradition. Bereits in den 1950er Jahren standen „Nachhersageverfahren“ zur Verfügung (HANSEN, 1956). Aber erst ab Mitte der 1990er Jahre erreichten sie im Vorhersagemodus (FISCHER, 1978) die Qualität von empirischen Verfahren. Das hing natürlich auch unmittelbar mit der Entwicklung in der Meteorologie zusammen, wo einige Jahre vorher die Modellverfahren eine ernsthafte Konkurrenz zur synoptischen Meteorologie geworden waren (BALZER, 2002).

Heute besteht die Modellfamilie des BSH (DICK et al., 2001) in der Version 4 aus einem dreifach geschachtelten 3D-Modell (BSHcmod) und einem zweifach geschachtelten 2D-Modell (BSHsmod). Beide Modelle erhalten als Randbedingung für den Nordrand der Nordsee bzw. den Westrand des Ärmelkanals Wasserstandsdaten aus einem 2D-Nordostatlantik-Modell mit ca. 10 km Maschenweite. BSHsmod überdeckt mit einer horizontalen Auflösung von ca. 5,5 km nur den Bereich der Nordsee, BSHcmod bei gleicher Auflösung Nord- und Ostsee. In das 3D-Modell BSHcmod ist noch ein Küstenmodell der Deutschen Bucht und Westlichen Ostsee mit einer Auflösung von 0,9 km eingebettet.

Das aufwendige 3D-Modell errechnet zwar alle wesentlichen physikalischen Größen des Meeres, benötigt dafür aber viel Rechenzeit. Effizienter im Sinne einer Wasserstandsvorhersage sind schnelle 2D-Modelle, die alsbald nach den Simulationsläufen der Atmosphärenmodelle Windstauberechnungen bieten. Im BSH läuft zur Zeit das 2D-Modell BSHsmod viermal täglich mit Antriebsdaten der Modellkette des DWD (GME/COSMO-EU), jeweils startend mit den meteorologischen Analysefeldern 0, 6, 12 und 18 Uhr. Im Falle der 0- und 12-Uhr-Läufe handelt es sich um 168-h-Vorhersagen, im Falle der 6- und 18-Uhr-Läufe um 48-h-Vorhersagen.

Weil sich die Modellfamilie des BSH so sehr in der Praxis der Wasserstandsvorhersage bewährt hat, liegt es nahe, diese durch Ästuarmodelle zu ergänzen. In einer Nachrechnung der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 in der Elbe zeigte sich bereits der Wert eines hochaufgelösten Elbmodells (MÜLLER-NAVARRA et al., 2006). Ein solches in operationeller Version, eingebettet in die bestehende BSH-Modellkette, wird zur Zeit im Rahmen des KFKI-Projekts OPTTEL (Windstaustudien und Entwicklung eines operationellen TideElbmodells) entwickelt. Mit einer zunächst auf etwa 90 m festgelegten horizontalen Auflösung wird es nicht nur der Wasserstandsvorhersage von Nutzen sein, sondern auch nautische oder umweltbezogene Anwendungsmöglichkeiten bieten.

2.5 BSH-MOS (Model Output Statistics)

Die statistische Nachbearbeitung der Ergebnisse der numerischen Wettervorhersage (MOS) zur Verbesserung der Vorhersage einzelner Wetterelemente ist in der Meteorologie schon lange erfolgreich (GLAHN und LOWRY, 1972). BSH-MOS ist nun die erste Anwendung

eines bewährten MOS-Systems (MSWR-MOS, KNÜPFER, 1996) auf Wasserstände in Gezeitengewässern.

In der ersten Ausbaustufe ist BSH-MOS zur Vorhersage des Windstaus am Pegelstandort Cuxhaven zu den Hoch- und Niedrigwasserzeiten eingerichtet (MÜLLER-NAVARRA und KNÜPFER, z. Veröff. eingereicht). Als Prädiktoren gehen Wetterelemente aus dem GFS-System, bereits eingetretene Windstauwerte am Vorhersageort Cuxhaven und anderen Orten (Borkum, Aberdeen) sowie Windstauvorhersagen für Cuxhaven aus dem numerischen 2D-Modell (BSHsmod) ein. BSH-MOS läuft z. Zt. prä-operationell und wird nach erfolgreicher Erprobung voraussichtlich im Jahre 2010 in den Wirkbetrieb gehen und stündlich aktualisierte Windstauvorhersagen für Cuxhaven liefern.

In Entwicklung ist nun als zweite Ausbaustufe von BSH-MOS die Kurzfristvorhersage der Tideganglinie im Minutenabstand. Mit jedem aus der Wasserstandsdatenfernübertragung (WDFÜ, s. Abschn. 2.6) neu eintreffenden Minutenwert gibt es dann eine neue Vorhersage. Dazu werden als weitere Prädiktoren astronomische Terme und die Ganglinie selbst verwendet. Man kann dieses Vorgehen auch als Gesamtansatz bezeichnen, weil die einschränkende Annahme der linearen Überlagerung von astronomischen Gezeiten und Windstau nun nicht mehr nötig ist.

2.6 Wasserstandsdatenfernübertragung (WDFÜ)

Eine der größten Errungenschaften für die Wasserstandsvorhersage ist die zuverlässige minütliche Datenfernübertragung der Wasserspiegellage von vielen Pegelstandorten an der deutschen Küste zu den Nutzern. Als optimal haben sich bisher Schwimmerpegel mit geeigneten Querschnitten von Schacht und Zulaufrohr herausgestellt, die noch Wasserstandsänderungen mit Zeitskalen größer als Dünungsperioden zeigen. Vorbeifahrende Schiffe, Hafenseiches, die Wirkung von Böen auf den Wasserstand etc. stören Kurzfristvorhersagen und Scheitelwerterkennung nicht.

Die Minutendaten bestehen aus der Uhrzeit (MEZ) und dem Wasserstand in Metern mit drei Stellen hinter dem Komma bezogen auf Pegelnull. Mit der letzten mitgelieferten Stelle scheinen die Daten eine Genauigkeit von einem Millimeter zu haben; Häufigkeitsverteilungen zeigen aber, dass die Null weit überdurchschnittlich oft vertreten ist und somit die WDFÜ-Daten lediglich auf einen Zentimeter genau sind. Da manche Pegel gelegentlich länger als eine halbe Stunde auf ein und demselben Pegelstand verharren, bereitet die numerische Feststellung der Scheitelwerte Schwierigkeiten. Es ist daher im Sinne weiterer Automatisierung der Pegeldatenauswertung, eine wirkliche Millimeter-Genauigkeit der übertragenen Wasserstände anzustreben.

2.7 Automatische Scheitelwerterkennung und Windstauermittlung

Die Scheitelwerte (Niedrigwasser und Hochwasser) in Pegelzeitreihen werden bisher noch manuell, IT-gestützt festgestellt und der für die weitere Bearbeitung benötigte Windstau durch Vergleich mit den astronomisch vorausgerechneten Höhen berechnet. Die Windstauermittlung sofort nach dem Eintritt des Scheitels an möglichst vielen Pegeln ist notwendig, da sich der „Wasserstandsvorhersager“ beim Vorhersageverfahren zunächst ein synoptisches Bild von der Windstaulage in der Deutschen Bucht erarbeiten muss.

Auch BSH-MOS benötigt zeitnah den Windstau von denjenigen Pegeln, die in den MOS-Gleichungen auftauchen. Da eine stündliche Aktualisierung der Scheitelwertvorhersagen angestrebt wird, werden die aktuellen Pegeldaten von z. Zt. 31 Pegeln nunmehr automatisch (MÜLLER-NAVARRA, 2009b) viertelstündlich nach neuen Scheitelwerten durchsucht und der zugehörige Windstau festgestellt.

Es ist vorgesehen, ab 2010 die manuelle Methode nur noch nach Bedarf einzusetzen, wenn die aktuellen Pegeldaten aus der WDFÜ zu große Lücken aufweisen oder die Daten augenscheinlich fehlerbehaftet sind.

2.8 Empirisch-statistische Verfahren

Empirische Windstauformeln können ganz einfache Zusammenhänge zwischen den Wind- und Luftdruckverhältnissen auf See und dem lokalen Windstau sein (ORTT, 1897). Mit größerem Rechenaufwand lassen sich per multipler Regression kompliziertere Zusammenhänge zwischen vielerlei (zumeist meteorologischen) Prädiktoren und dem Prädiktanden Windstau ableiten (MÜLLER-NAVARRA und GIESE, 1999). Mehr noch als bei den MOS-Verfahren, bei denen das numerische Modell überragende Bedeutung hat, besteht bei den rein messwertbasierten, statistischen Verfahren die Gefahr, dass Persistenzterme und einbezogene Wasserstände von Nachbarpegeln die Vorhersagequalität im Einzelfall – insbesondere bei schmalen Windstrichen – stark beeinträchtigen können.

Als Ergänzung zu den hier beschriebenen numerischen und anderen Verfahren eignen sich empirisch-statistische Methoden mit kleinräumiger Gültigkeit, wie für Nordfriesland herausgearbeitet und im hier vorliegenden Band geschildert (DIBBERN und MÜLLER-NAVARRA, 2009). Damit können im Sturmflutfall bei geeigneter Wahl eines Bezugsortes regionale Stauunterschiede berechnet werden. Aber auch hier muss zunächst der Wasserstand am Bezugsort richtig vorhergesagt werden, um zu absoluten Scheitelwasserständen zu gelangen.

Heute verbleibt den empirisch-statistischen Verfahren jedenfalls die wichtige Rolle einer Rückfallposition für einen erfahrenen „Windstauer“, besonders, wenn die numerischen Modellketten ausfallen oder offensichtliche Fehlvorhersagen produzieren. Letzteres zu beurteilen, erfordert die intensive Zusammenarbeit mit synoptisch versierten Meteorologen.

2.9 Synoptik, Modellinterpretation

Mittlerweile stehen für die Windvorhersagen an der deutschen Nordseeküste Vorhersagen aus mehreren Atmosphärenmodellen zur Verfügung. In aller Regel unterscheiden sich die Ergebnisse dieser Modelle im hier relevanten Vorhersagebereich von bis zu 3 Tagen nicht sonderlich. Durch Visualisierungswerkzeuge wie z.B. NINJO-Workstation, das im Rahmen eines internationalen Projekts mit Beteiligung des DWD entwickelt wurde, ist der Meteorologe in die Lage versetzt, die Vorhersagen mehrerer Atmosphärenmodelle (GFS, GME/COSMO-EU, ECMWF, HIRLAM usw.) gleichzeitig mit Stationsmeldungen zu vergleichen. Ergebnis eines solchen Vergleichs kann im Einzelfall sein, dass der Meteorologe sich bei seiner Beratung des „Windstauvorhersagers“ auf ein anderes Modell als GME/COSMO-EU festlegt und damit auch die beschriebene automatisierte Kette zu verwerfen ist. Im seltenen Extremfall greift die klassische Synoptik, und es kommen ausschließlich die alten Windstautabellen zur Anwendung. Meist genügt es aber schon, die numerische Vorhersage

des Windes in der Deutschen Bucht um wenige Knoten nach oben oder unten zu korrigieren. Letzteres ist bei Sturmflutwetterlagen gängige Praxis und hat sich bei der Zusammenarbeit zwischen BSH und DWD/Seewetteramt gut bewährt.

2.10 Mensch-Maschine-Mix (MMM), Windstauvorhersage

Nicht nur bei der Bewertung von Sturmflutwetterlagen wird ein Mensch-Maschine-Mix (MMM) praktiziert, sondern auch bei der täglichen Wasserstandsvorhersage. Als Maschine kommt hier das Verfahren BSHsmo in der aktuellen Version 4 zum Einsatz (DMO-2Dv4). Rechenergebnisse von numerischen Modellen werden im Kontext mit MOS-Verfahren im Englischen mit „direct model output“ (DMO) bezeichnet.

Aber wie erfolgreich kann ein „Windstauvorhersager“ die Vorhersage eines über viele Jahre gut kalibrierten numerischen Modells verbessern? Oder besteht die Gefahr der „Verschlimmbesserung“? Eine Statistik über die Vorhersagen von 1412 Ereignissen (HW u. NW) des Jahres 2008 zeigt ein überraschendes Ergebnis (Abb. 3). In Kenntnis des DMO gelingt es dem Menschen nur im Vorhersagezeitraum bis zu 14 Stunden, den DMO signifikant zu verbessern.

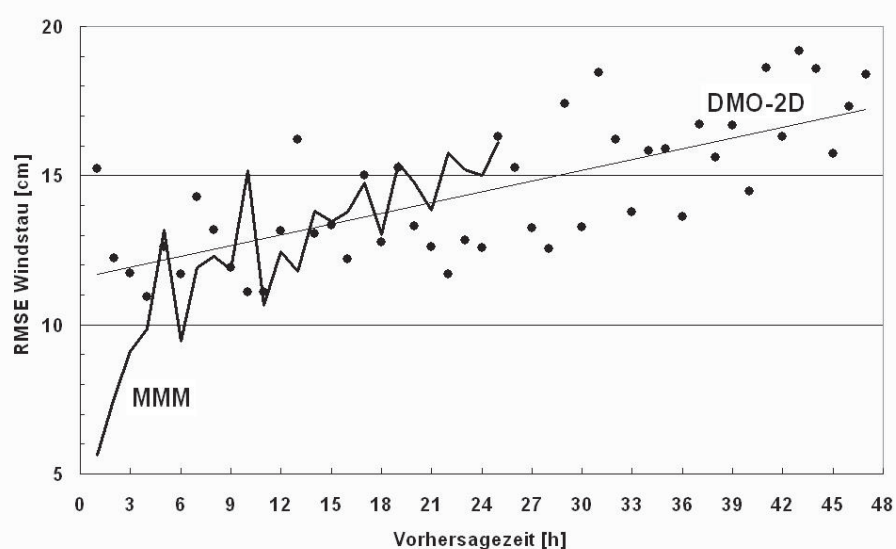


Abb. 3: Standardabweichung der Windstauvorhersage des 2D-Modells (Punkte und dazugehöriger linearer Trend) und des Mensch-Maschine-Mixes (MMM, durchgezogene fette Line) 1.1.2008 bis 31.12.2008 in Abhängigkeit der Vorhersagelänge (MMM: ~225 Fälle je Vorhersagezeit, DMO-2D: ~114 Fälle)

Es lohnt sich ein genauerer Blick auf diese Statistik. 2008 startete das Modell (DMO-2Dv4) nur zu den 0 und 12-UTC-Terminen, die Ergebnisse mit Vorhersagezeitraum von 48 h standen jeweils gut 7 Stunden später dem menschlichen Vorhersager (MMM) zur Verfügung. Dieser aktualisierte viermal täglich seine Vorhersagen für einen Zeitraum bis zu 25 h im Voraus (um 8:00, 14:00, 20:00 und 0:00 MEZ bzw. MESZ). Beim DMO ist hier mit Vorhersagezeit die Zeit zwischen dem Analysezeitpunkt und dem Zieltermin gemeint, beim MMM ist es der Zeitraum zwischen dem Termin der Vorhersage und dem Zieltermin.

Der DMO erreicht einen RMSE (Standardabweichung, root mean square error) von 12 cm bei Kürzestfristvorhersagen und bis zu 17 cm bei 48-h-Vorhersagen. In den ersten 3 h der Vorhersage gibt es ein Initialisierungsproblem, welches wegen fehlender Pegelstände auf offener See nicht leicht zu lösen ist. Das Modell startet jeweils den neuen Lauf mit dem von dem vorangegangenen Lauf vorhergesagten Wasserstand zum Startzeitpunkt, also im hier betrachteten Falle mit einer 12-h-Vorhersage. Offensichtlich gelang es dem Menschen, diesen Initialisierungsfehler unter Kenntnis bereits eingetretener Pegelstände – auch von Nachbarpegeln – deutlich zu kompensieren. Zwischen 3 und 14 h Vorhersagezeitraum ist nur eine geringfügige Verbesserung der Modellvorhersagen durch MMM feststellbar. Aber beginnend mit den 15-h-Vorhersagen gelingt es dem menschlichen Bearbeiter nicht mehr, die Windstauvorhersagen des Modells zu verbessern. Es besteht sogar die Gefahr, dass im Einzelfall durch menschliche Einflussnahme ein an sich gutes Modellergebnis durch Mensch-Maschine-Mix in ein leicht schlechteres Resultat verwandelt wird.

Es kommt also ganz wesentlich darauf an, aus dem statistischen Befund zum DMO und MMM die richtigen Schlüsse zu ziehen und die Rolle des Menschen im Mensch-Maschine-Mix weiterzuentwickeln.

2.11 Wasserstandsvorhersage, Sturmflutwarnung

Nachdem nun die Windstauvorhersage durch Mensch-Maschine-Mix für die nächsten Hoch- und Niedrigwasserzeitpunkte für alle relevanten Küstenorte in der Deutschen Bucht und die angrenzenden Schifffahrtsreviere festgestellt wurde, werden diese Werte den astronomisch vorausberechneten Wasserständen hinzuaddiert. Im Jahre 2008 lagen am Pegel Cuxhaven 86 % der Windstauwerte im Intervall ± 50 cm, während für das gleiche Jahr der mittlere Tidenhub dort mit 2,98 m, der mittlere Nipptidenhub mit 2,49 m und der mittlere Springtidenhub mit 3,31 m vorausberechnet war. Eine auf das mittlere Hochwasser bezogene Wasserstandsvorhersage besteht also ganz wesentlich aus einer guten Gezeitenvorausberechnung!

Die Vorgehensweise des BSH bei Sturmfluten und auch das Geschäft des Warnens sind kürzlich eingehend beschrieben worden (JENSEN und MÜLLER-NAVARRA, 2008). Deshalb reicht an dieser Stelle der Hinweis darauf, dass die viermal täglich aktualisierten Wasserstandsvorhersagen nicht nur der Schifffahrt und den Behörden der Küstenländer zur Verfügung gestellt werden, sondern auch im Internet unter www.bsh.de abgerufen werden können. Bei Sturmfluten ist ein Telefondienst rund um die Uhr besetzt (Tel.: 040 3190-3190).

3. Weitere Möglichkeiten und Ausblick

Zwei aktuelle Themen bleiben noch offen bzw. haben noch keinen überzeugenden Weg in die Sturmflutvorhersage gefunden. Es sind Datenassimilation und Ensemble-Vorhersagen.

Umfangreiche Analysen zur Datenassimilation von Wasserständen in 2D-Modellen der Nordsee haben gezeigt, dass allenfalls eine kleine Verbesserung der Vorhersagen bis 6 h voraus durch Einbeziehung von Pegelständen im Umkreis von 200 km erwartet werden kann (VERLAAN et al., 2005). Noch ungünstigere Voraussetzungen für Datenassimilation finden sich in der Deutschen Bucht, wo der Windstau sehr lokal in den reich gegliederten Flachküsten-Gewässern entsteht. Wegen der längeren Verarbeitungszeiten von Altimeterdaten

werden diese auf absehbare Zeit auch keine operationelle Verwertung bei Sturmflutwarnungen finden. Die Strategie einer nachgeschalteten Korrektur durch MOS (Model Output Statistics) erscheint erfolgversprechender, da so auch Platz für eine unabhängige Beurteilung der eingetretenen Pegelstände, Modellergebnisse und statistischen Verfahren durch den menschlichen „Sturmflutvorhersager“ ist. Allerdings erfordert das vom Einzelnen auch detaillierte Kenntnisse der zur Verfügung stehenden Verfahren.

Im Forschungsprojekt MUSE ist reichlich Gebrauch von Ensemble-Verfahren der numerischen Wettervorhersage (Ensemble Prediction System, EPS) gemacht worden (JENSEN et al., 2006), dieses geschah aber ausschließlich zum Auffinden von extremen, noch nicht eingetretenen Extremsturmfluten, was für die Nordsee und speziell die Deutsche Bucht erfolgreich war. Um zu einer 2- bis 5-tägigen probabilistischen Sturmflutvorhersage zu gelangen, könnten EPS-Simulationen zukünftig durchaus von Nutzen sein (DE VRIES, 2009). Ein Vorteil solcher Verfahren ist darin zu sehen, dass damit vor Wochenenden und Feiertagen Einsatzkräfte vorgewarnt werden können. Eine öffentliche Sturmflutvorhersage der Art „Übermorgen besteht eine Sturmflutwahrscheinlichkeit von 20 %“ würde wohl nur für Verwirrung sorgen.

Nach allen neueren Erfahrungen ist es letztlich am effektivsten, die Atmosphärenmodelle weiterzuentwickeln und deren Rechenzeit so weit zu reduzieren, dass nachgeschaltete Wasserstandsmodelle zeitnah versorgt werden. Besondere Obacht ist auf die Analysemodelle und auf die daraus resultierenden atmosphärischen Anfangsverteilungen zu legen, wobei hier Fernerkundungsverfahren zum vertikalen Aufbau der Atmosphäre einen weiteren Fortschritt bringen könnten. Von Seiten der Wasserstandsvorhersage wären in naher Zukunft meteorologische Vorhersageläufe zu den Terminen 0, 3, 6, ..., 21 UTC wünschenswert, da schon der Schritt von 12-stündlichen auf 6-stündliche Läufe nützlich war. Vorhersagen für 7 Tage im Voraus ausgehend von den Hauptterminen 0 und 12 UTC sind ausreichend, die Läufe dazwischen sollten mindestens 24 h Vorhersagelänge haben.

Die Weiterverarbeitung von Resultaten aus einem EPS und die Nutzung neuer Ergebnisse aus deterministischen Atmosphärenmodellen im 3-Stunden-Rhythmus stellen für eine nachgeschaltete Wasserstandsvorhersage einen gewaltigen informationstechnologischen Aufwand dar. Dem ist nur durch konsequente Automation beizukommen. So bleibt dann auch noch ausreichend Zeit für einen bei Sturmfluten unverzichtbaren Mensch-Maschine-Mix.

4. D a n k s a g u n g

An dieser Stelle muss all jenen gedankt werden, die tagaus, tagein – auch an Feiertagen – die meteorologischen und ozeanologischen Messapparaturen in Gang halten und die Datenflüsse sicherstellen, sowie denjenigen, die sich um den zuverlässigen Betrieb der numerischen Modellketten kümmern.

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

ANNUTSCH, R.: Über das empirisch-statistische Sturmflutvorhersageverfahren des Deutschen Hydrographischen Instituts. *Promet*, 8, 12–15, 1978.

ANONYMUS: Gezeitentafeln 2010 Europäische Gewässer. BSH Hamburg, 246 S., 2009.

ANONYMUS: Seeaufgabengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. Juli 2002 (BGBl. I S. 2876), zuletzt geändert durch Artikel 319 der Verordnung vom 31. Oktober 2006 (BGBl. I S. 2407).

- BALZER, K.: Zum Mensch-Maschine-Konflikt in der Wettervorhersage. *Promet*, 28, 46–54, 2002.
- DIBBERN, S. und MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Wasserstände bei Sturmfluten entlang der nordfriesischen Küste, Inseln und Halligen. *Die Küste*, 76, 2009.
- DICK, S.; KLEINE, E.; MÜLLER-NAVARRA, S. H.; KLEIN, H. and KOMO, H.: The Operational Circulation Model of BSH (BSHcmod) – Model description and validation. *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie*, 29, 49 S., 2001.
- FISCHER, G.: Ergebnisse der Sturmflutvorhersage-Modellierung im SFB 94. *Promet*, 8, 17–21, 1978.
- GLAHN, H. R. and LOWRY, D. A.: The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. *J. Appl. Meteor.*, 11, 1203–1211, 1972.
- JENSEN, J.; MÜLLER-NAVARRA, S. H.; RENNER, V.; MUDERSBACH, CH.; BORK, I. und KOZIAR, CH.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. *Die Küste*, 71, 123–167, 2006.
- JENSEN, J. and MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Storm surges on the German Coast. *Die Küste*, 74, 92–124, 2008.
- HANSEN, W.: Theorie zur Errechnung des Wasserstandes und der Strömungen in Randmeeren nebst Anwendungen. *Tellus*, 8, 287–300, 1956.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M. and BAKER, W. E.: Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71, 1410–1428, 1990.
- KNÜPFER K.: Methodical and predictability aspects of MOS systems, 13th Conference on Probability and Statistics in Atmospheric Sciences. San Francisco, USA, 190–197, 1996.
- MAJEWSKI, D.; LIERMANN, D.; PROHL, P.; RITTER, B.; BUCHHOLD, B.; HANISCH, T.; PAUL, G.; WERGEN, W. and BAUMGARDNER, J.: The Operational Global Icosahedral–Hexagonal Gridpoint Model GME: Description and High-Resolution Tests. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 319–338, 2002.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Zur Vorhersagbarkeit schwerer Sturmfluten an deutschen Küsten. *Mitteilungen DMG*, 9–10, 02/2008.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Sturmfluten in der Elbe und deren Vorhersage im Wandel der Zeiten. In: Ohlig, C.: *Hamburg – die Elbe und das Wasser sowie weitere wasserhistorische Beiträge*. Schriften der DWhG, 13, 77–95, 2009a.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Zur automatischen Scheitelpunktbestimmung gemessener Tidekurven in der Deutschen Bucht. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 53, 380–388, 2009b.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H. und LADWIG, N.: Über Wassertemperaturen an deutschen Küsten. *Die Küste*, 59, 1–26, 1997.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H. and GIESE, H.: Improvements of an Empirical Model to Forecast Wind Surge in the German Bight. *Dt. hydrogr. Z.*, 51, 385–405, 1999.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.; LANGE, W.; DICK, S. und SOETJE, K. C.: Über die Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage: Hydrodynamisch-numerische Modelle der Nord- und Ostsee und empirisch-statistisches Verfahren für die Deutsche Bucht. *Promet*, 29, 117–124, 2003.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.; BORK, I.; JENSEN, J.; KOZIAR, CH.; MUDERSBACH, CH. und RUDOLPH, E.: Modellstudien zur Sturmflut und zum Hamburg-Orkan 1962. *Hansa*, 143, 72–88, 12/2006.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H. and KNÜPFER, K.: Improvement of water level forecasts for tidal harbours by means of model output statistics (MOS). (*Meteorol. Z.*, zur Veröffentlichung eingereicht).
- ORTI, F. L.: The effect of wind and atmospheric pressure on the tides. *Nature*, 56, 80–84, London, 1897.
- SOETJE, K. C. and BROCKMANN, C.: An operational numerical model of the North Sea and the German Bight. In: J. Sündermann/W. Lenz (Ed.) *North Sea Dynamics*. Berlin u. a., 95–107, 1983.
- STEPELER, J.; DOMS, G.; SCHÄTTLER, U.; BITZER, H. W.; GASSMANN, A.; DAMRATH, U. and GREGORIC, G.: Meso-Gamma Scale Forecasts Using the Non-hydrostatic Model LM. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82, 75–90, 2003.
- VERLAAN, M.; ZIJDERVELD, A.; DE VRIES, H. and KROOS, J.: Operational storm surge forecasting: developments in the last decade. *Phil. Trans. R. Soc. A* 363, 1441–1453, 2005.
- DE VRIES, H.: Probability forecasts for water levels at the coast of The Netherlands. *Marine Geodesy*, 32, 100–107, 2009.