

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Schmitz, Ralf

Modellierung von historisch aufgetretenen Sturmereignissen über der Ostsee mithilfe von Vorhersagen eines Ensemblesystems und eines Regionalmodells

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/20.500.11970/101625>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schmitz, Ralf (2009): Modellierung von historisch aufgetretenen Sturmereignissen über der Ostsee mithilfe von Vorhersagen eines Ensemblesystems und eines Regionalmodells. In: Die Küste 75. Heide, Holstein: Boyens. S. 9-20.

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.



Modellierung von historisch aufgetretenen Sturmereignissen über der Ostsee mithilfe von Vorhersagen eines Ensemblesystems und eines Regionalmodells

Von RALF SCHMITZ

Z u s a m m e n f a s s u n g

Das Ziel des vom deutschen Wetterdienst durchgeführten Teilprojektes von MUSE Ostsee war es, Sturmtiefs physikalisch konsistent zu modellieren, die das Potential haben, in hydrodynamisch-numerischen Modellen (HN-Modelle) extrem hohe Wasserstände an der deutschen Ostseeküste auszulösen. Hierzu wurde zunächst nach bestimmte Kriterien erfüllenden historischen Wetterereignissen über der Ostsee gesucht. Für die Suche nach entsprechenden Wetterereignissen wurden Windfelder in Datensätzen verschiedener meteorologischer Institutionen ausgewertet. So konnten für den Zeitraum zwischen 1958 bis 2006 über dem Großraum der Ostsee aufgetretene Wetterereignisse ausgewählt werden, die mit zwei Wettervorhersagemodellen nachgerechnet wurden. Die ausgesuchten Wetterereignisse wurden zunächst mit dem Ensemble Prediction System (EPS), dem globalen Wettervorhersagesystem des Europäischen Zentrums für mittelfristige Vorhersage (EZMW), modelliert. Mit dem EPS wurden im Rahmen dieses Projektes für 37 verschiedene Sturmereignisse mehr als 30.000 Prognosen mit einer Vorhersagelänge von wenigen Stunden bis zu zehn Tagen simuliert. Bei zwölf verschiedenen Sturmereignissen traten in rund 600 Vorhersagen des EPS Windgeschwindigkeiten von mindestens zehn Beaufort bei nördlichen bis östlichen Windrichtungen in der Nähe der deutschen Ostseeküste auf. Ungefähr 10 % der ca. 600 Prognosen wurden schließlich ausgewählt und als Antrieb für das operationelle, regionale Wettervorhersagemodell COSMO des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Die Daten aus den jeweils sechzig Vorhersagen des EPS und des höher aufgelösten COSMO wurden dann – im Rahmen anderer Projekte von MUSE Ostsee – in den HN-Modellen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und des Forschungs- und Technologiezentrums Westküste (FTZ) für Wasserstandsmodellierungen verwendet. Ausgewählte Vorhersagen wurden auch in anderen Projekten von MUSTOK verwendet, um die Wanderungsgeschwindigkeit der Tiefdruckgebiete noch weiter physikalisch konsistent zu verändern oder die räumliche Auflösung von vorhergesagten Windfeldern zu erhöhen.

S c h l a g w ö r t e r

Ostsee, Sturmtief, Sturmfluten, Wettervorhersage, Wettervorhersagemodell COSMO

S u m m a r y

The objective of this subproject within the MUSE Baltic Sea project was to model physically consistent storms which have the potential to cause storm surges at the German Baltic Sea coast in hydrodynamic-numeric models (HN-models). Datasets provided by different European institutions were used to identify suitable situations between 1958 and 2006 in the area of interest. Initially, selected periods were simulated using the Ensemble Prediction System (EPS), the global forecast system of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Within the framework of this project, more than 30.000 forecasts for 37 different weather situations were made, with forecasting ranges from several hours to ten days. For twelve of these situations, the EPS produced wind speeds increasing ten Beaufort with northern to easterly winds in nearly 600 forecasts close to Arcona. Approximately 10 % of the 600 forecasts were chosen to be used as forcing for the operational regional weather forecast model COSMO of the German Weather Service. The output of EPS and the higher resolved data of

COSMO resulting from these sixty episodes were used by the HN-models of the Federal Maritime and Hydrographic Agency and the Technology Centre for water level modelling within the framework of the MUSE Baltic Sea project. Some forecasts were also used within the framework of MUSTOK to modify the tracking of the cyclones physically consistent, or to increase the spatial resolution of the windfields.

Keywords

Baltic Sea, cyclone, storm surges, weather forecast, Ensemble Prediction System, weather forecast model COSMO

Inhalt

1. Einführung	10
2. Methode	11
3. Modelle	13
4. Ergebnisse	15
5. Schriftenverzeichnis	19

1. Einführung

Die für das Projekt MUSE Ostsee interessanten extremen Sturmhochwasserstände an der deutschen Ostseeküste hängen grundsätzlich von meteorologischen, ozeanographischen und küstenmorphologischen Faktoren ab. In diesem Teilprojekt wurden nur die meteorologischen Einflüsse berücksichtigt, die bereits in einigen Untersuchungen analysiert worden sind (KOHLMETZ, 1967; SCHMAGER, 1984; STIGGE, 1994; BAERENS, 1998; MEINKE, 1998; KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN, 2003).

An der deutschen Küste sind schwere bis sehr schwere Ostseesturmfluten (s.u.) in der Vergangenheit unter sehr heterogenen Wetterbedingungen entstanden. Charakteristisch war jedoch das Auftreten von Sturmtiefs, die bei ihrer Verlagerung über die Ostsee hinweg zu einem gewissen Zeitpunkt nördliche bis östliche Windrichtungen in der südwestlichen Ostsee ausgelöst haben. In einer Studie von SAGER u. MIEHLKE (1956) wird darüber hinaus auch ein bedeutender Einfluss der östlichen und zentralen Ostsee beim Auftreten einer Sturmflut in der westlichen Ostsee beschrieben. Eine im Rahmen von MUSTOK durchgeführte Studie zeigt außerdem, dass die Windverhältnisse über der zentralen Ostsee bei der Sturmflut aus dem Jahre 1872 bedeutend gewesen sind (ROSENHAGEN u. BORK, 2008).

Im Zeitraum von 1958 bis 2006 ist der größte Teil der schweren und sehr schweren Sturmfluten durch ein unmittelbar auftretendes, einzelnes Tiefdruckgebiet entstanden (BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT u. HYDROGRAPHIE, 2005). Schwere und sehr schwere Sturmfluten sind am Pegel Warnemünde durch Wasserstände von 134 bis 159 cm bzw. mehr als 160 cm über dem 19-jährigen Jahresmittel gekennzeichnet (MEINKE, 1998).

Die aufgetretenen Sturmfluten hätten nun mit einer gewissen, statistisch schwer einzuschätzenden Wahrscheinlichkeit einen wesentlich anderen Verlauf genommen, wenn die auslösenden Sturmtiefs andere physikalische Eigenschaften gehabt hätten oder mit einer anderen Zugbahn über die Ostsee hinweggezogen wären.

Diesen Ansatz verfolgt das Teilprojekt MUSE Ostsee vom Deutschen Wetterdienst. Das vornehmliche Ziel des Projektes war es, mit ausgereiften Modellen möglichst viele, physikalisch konsistente Wettervorhersagen zu berechnen, die das Potential hatten, in HN-Modellen

(BORK u. MÜLLER-NAVARRA, 2009; BRUSS et al., 2009) sehr hohe Wasserstände an der deutschen Ostseeküste zu erzeugen. Mit den modellierten Wasserstandsdaten konnten schließlich die bisher in der Vergangenheit aufgetretenen sehr hohen Wasserstände statistisch besser eingeordnet werden (MUDERSBACH u. JENSEN, 2009). Dies gilt vor allem für die legendäre Sturmflut aus dem Jahr 1872, deren statistische Eintrittswahrscheinlichkeit aufgrund der geringen Anzahl an derartig extremen Sturmfluten ($> +200$ cm NN) nur schlecht eingeschätzt werden kann. Bevor die meteorologischen Vorhersagen durchgeführt werden konnten, mussten jedoch zunächst geeignete, in der Vergangenheit tatsächlich aufgetretene Wetterereignisse gefunden werden, die dann durch die Modelle physikalisch konsistent modifiziert werden konnten. Sowohl die real aufgetretenen als auch die modellierten Wetterbedingungen wurden vor allem hinsichtlich der aufgetretenen Windgeschwindigkeiten und der zeitlichen Veränderung der Windrichtungen analysiert.

2. Methode

Für die Berechnung möglichst vieler, physikalisch konsistenter Vorhersagen ist das Ensemble Prediction System (EPS) des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) sehr gut geeignet (MOLTENI et al., 1996).

Das EPS ist ein globales Vorhersagesystem, das eine Erweiterung des globalen deterministischen Modells Integrated Forecast System (IFS) um eine stochastische Komponente darstellt (BUIZZA et al., 1999).

Da die räumliche Auflösung des EPS für die Verhältnisse für das Untersuchungsgebiet jedoch relativ grob ist (vgl. Kap. 3), wurde zusätzlich das Regionalmodell COSMO (Consortium for Small-scale Modeling) des Deutschen Wetterdienstes benutzt (DOMS et al., 2003). COSMO wurde in diesem Projekt mit stündlichen meteorologischen Daten von ausgewählten Vorhersagen (sogenannte Member; s. Kap. 3) des EPS angetrieben (Abb. 1). Um die Möglichkeit zu reduzieren, dass sich die Vorhersagen von EPS und COSMO signifikant von-

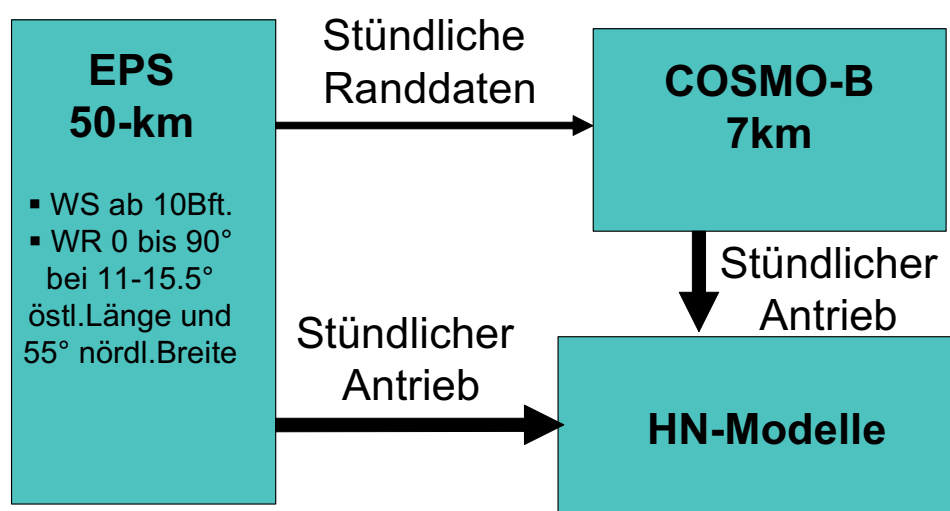


Abb. 1: Methode zur Erzeugung von modellierten extremen Wasserständen an der südwestlichen deutschen Ostseeküste für das Projekt MUSE Ostsee. WS ist die Abkürzung für die Windgeschwindigkeit und WR repräsentiert die Windrichtung. Die HN-Modellierungen wurden im Rahmen anderer Projekte von MUSE Ostsee bzw. MUSTOK durchgeführt

einander unterscheiden, wurde das ursprünglich für Mitteleuropa geltende Modellgebiet von COSMO für dieses Projekt deutlich verkleinert (vgl. Kap. 3). Im Folgenden wird die (inoffizielle) Bezeichnung COSMO-B für das Modell mit erhöhter, für die südwestliche Ostsee passender Auflösung verwendet. Die mithilfe des EPS und des COSMO-B erzeugten bodennahen meteorologischen Prognosen dienten jeweils als Antrieb für die HN-Modelle des BSH (BORK u. MÜLLER-NAVARRA, 2009) und des FTZ (BRUSS et al., 2009).

Die mit dem EPS produzierten Vorhersagen wurden aus praktischen Gründen (sehr große Datensätze) mit einem vergleichsweise einfachen Ansatz analysiert, um Wetterereignisse herausfiltern zu können, die möglicherweise sehr hohe Wasserstände in den HN-Modellen hätten auslösen können. Grundannahme bei diesem Ansatz war, dass eine gemittelte Windgeschwindigkeit mit einer Stärke von mindestens zehn Beaufort bei einer Windrichtung zwischen 0° und 90° in einer sensiblen Region (zwischen 11 bis 15° östlicher Länge, bei 55° nördlicher Breite) der deutschen Ostseeküste zu einem beliebigen Zeitpunkt als notwendige Bedingung auftreten musste. Zehn Beaufort entsprechen einer Windgeschwindigkeit von mindestens 24 m/s. Eine solche Windstärke ist nur selten an der Landstation Arkona gemessen worden. So liegt die Wiederkehrzeit hierfür in Arkona bei rund zehn Jahren, bezogen auf den zehnminütigen Mittelwert (BECKMANN, 1997). Der Grenzwert von zehn Beaufort – zur Auswahl bestimmter Wetterereignisse – wurde in MUSE Ostsee mit zunehmender Anzahl verfügbarer Wasserstände sukzessive aus den Ergebnissen der HN-Modelle bestimmt (vgl. BORK u. MÜLLER-NAVARRA, 2009; BRUSS et al., 2009).

Als zusätzliches Hilfsmittel für die Bewertung der mit dem EPS durchgeführten Vorhersagen diente die Windstauberechnung von Schmager (SCHMAGER, 1987). Diese Windstauberechnung hat den Vorteil, dass sie eine integrale Größe aus gegebener Windrichtung und Windgeschwindigkeit liefert und auf sehr große Datenmengen leicht anzuwenden ist.

Um zunächst geeignete Sturmereignisse aus der Vergangenheit finden zu können, an denen die Vorhersagen gestartet werden konnten, wurden die Bodenluftdruck- und Windfelder im Datensatz von ERA40 (40 Year European Re-Analysis Data Archive; KALLBERG et al., 2005) und der Bodenluftdruckdatensatz des britischen Wetterdienstes (UK METEOROLOGICAL OFFICE, 2005) auf bestimmte Muster hin untersucht. Der ERA40-Datensatz enthält einige meteorologische Parameter aus dem Zeitraum 1958 bis 2002, die mithilfe von Messungen und Simulationen mit einem globalen Wettervorhersagemodell erstellt wurden.

Aus den Werten des Bodenluftdrucks aus beiden Datensätzen wurden Windgeschwindigkeiten mithilfe der geostrophischen Approximation errechnet. Detaillierte Beschreibungen zu der Methodik der ausgewählten Sturmereignisse und zum ERA40-Datensatz finden sich in dem Abschlussbericht von SCHMITZ (2007).

Aber nicht nur die Messungen bzw. die Analysen wurden untersucht, sondern auch die am EZMW archivierten Vorhersagen im Zeitraum von 1994 bis 2006. Schließlich wurden nach eingehender Untersuchung 37 Sturmereignisse ausgewählt, an denen mehr als 30.000 Vorhersagen mit dem EPS durchgeführt wurden. Mit den gleichen Methoden, mit denen die historischen Wetterereignisse zunächst ausgesucht wurden, erfolgte schließlich auch die Analyse der Vorhersagen. Eine Auswahl der EPS-Vorhersagen diente unmittelbar als Antrieb für die HN-Modelle. Schließlich wurden 60 der globalen EPS-Vorhersagen auch als stündlicher Antrieb für das rund 50-fach (EPS: 2500 km²; COSMO: 49 km²) höher aufgelöste Regionalmodell COSMO-B ausgewählt. Dessen Vorhersagen wurden ebenso in den HN-Modellen des BSH und FTZ genutzt.

Außerdem wurden ausgewählte Sturmtiefdruckgebiete im Rahmen anderer Projekte von MUSTOK noch weiter physikalisch konsistent verändert (BENKEL u. MEINKE, 2008) oder die räumliche Auflösung spezieller Windfelder noch weiter erhöht (GANSKE et al., 2007).

3. Modelle

Für die Berechnung der numerischen Wettervorhersagen wurden zwei verschiedene Modelle verwendet, die auch heute noch operationell bei verschiedenen Wetterdiensten eingesetzt werden (Abb. 2). Als Basismodell für MUSE Ostsee wurde das EPS des EZMW verwendet. Mithilfe des EPS können jeweils fünfzig verschiedene Vorhersagen zu verschiedenen Zeitpunkten eines Tages berechnet werden (Abb. 3). Die horizontale räumliche Auflösung des EPS betrug – in der zwischen 2005 und 2007 für dieses Projekt verwendeten Version – 50 Kilometer, bei 62 vertikalen Schichten. Das verwendete Regionalmodell COSMO besaß eine höhere räumliche Auflösung von sieben Kilometern. Das Modellgebiet von COSMO wurde so reduziert, dass ein für das Projekt MUSE Ostsee interessierendes Gebiet abgedeckt wird (Abb. 4). Operationell wird COSMO für ein größeres Gebiet in Mitteleuropa verwendet und entsprechend als COSMO-EU bezeichnet (DOMS et al., 2003).

Bezeichnung	EPS	„COSMO-B“
Modellgebiet	Global	Ostsee
Gitterweite	T399 / ~50km	7km
Gitterpunkte	204.000	57.600
Atmosphärische Schichten	62	40
Zeitschritt [s]	1800	40

Abb. 2: Ausgewählte Eigenschaften der verwendeten meteorologischen Vorhersagemodelle (EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS, 2005; DOMS et al., 2003)

Das EPS besteht aus fünfzig verschiedenen Wettervorhersagen, die jeweils Member genannt werden und zusammen Teil einer Ensemblevorhersage sind. Jeder Member startet zu Beginn der Simulationen mit jeweils leicht veränderten Analysen, d.h. verschiedenen Anfangswerten von physikalischen Parametern, die aus Messungen und Modellierungen gewonnen wurden (bis zum Jahr 2002 mit Analysen aus dem ERA40-Datensatz, ab dem Jahr 2003 mit operationellen Analysen). Außerdem wird bei jedem Member die Modellphysik so variiert, dass schließlich pro Startzeitpunkt fünfzig verschiedene meteorologische Vorhersagen berechnet werden (BUIZZA et al., 1999). Für MUSE Ostsee wurde ein Sturmereignis zunächst ausgewählt, das zu einem gewissen Zeitpunkt aufgetreten ist und unter Umständen auch zu einer realen Sturmflut an der deutschen Ostseeküste geführt hat. In Abb. 3 ist beispielhaft ein EPS mit Startzeitpunkt, Vorhersagelänge und Zieltermin für die sehr schwere Novembersturmflut aus dem Jahr 1995 dargestellt. Das verwendete EPS-Modell wurde operationell mit einer Vorhersagelänge von zehn Tagen verwendet, d.h. es wäre möglich gewesen,

das EPS zehn Tage vor dem Zieltermin (4.11.1995 um 0 UTC) mit 50 Mitgliedern zu starten. Das EPS kann grundsätzlich für den Zeitraum zwischen 1958 und 2002 mithilfe des Datensatzes ERA40 für Vorhersagen verwendet werden. Der ERA40-Datensatz hat eine zeitliche Auflösung von sechs Stunden, beginnend mit jeweils 0 UTC eines Tages.

Somit besteht die Möglichkeit, im Abstand von sechs Stunden pro Tag jeweils ein Ensemble zu berechnen. Damit ist es möglich, einige hundert Vorhersagen für einen einzigen Zieltermin durchzuführen. Da die Experimente mit dem EPS grundsätzlich jedoch sehr rechenintensiv sind, wurde für MUSE Ostsee – in Abhängigkeit des Starttermins – mit unterschiedlichen Vorhersagelängen modelliert. COSMO-EU bzw. COSMO-B beruhen dagegen auf einer einzigen deterministischen Vorhersage. Für MUSE Ostsee wurde COSMO jeweils mit Daten eines ausgesuchten Members aus dem EPS angetrieben.

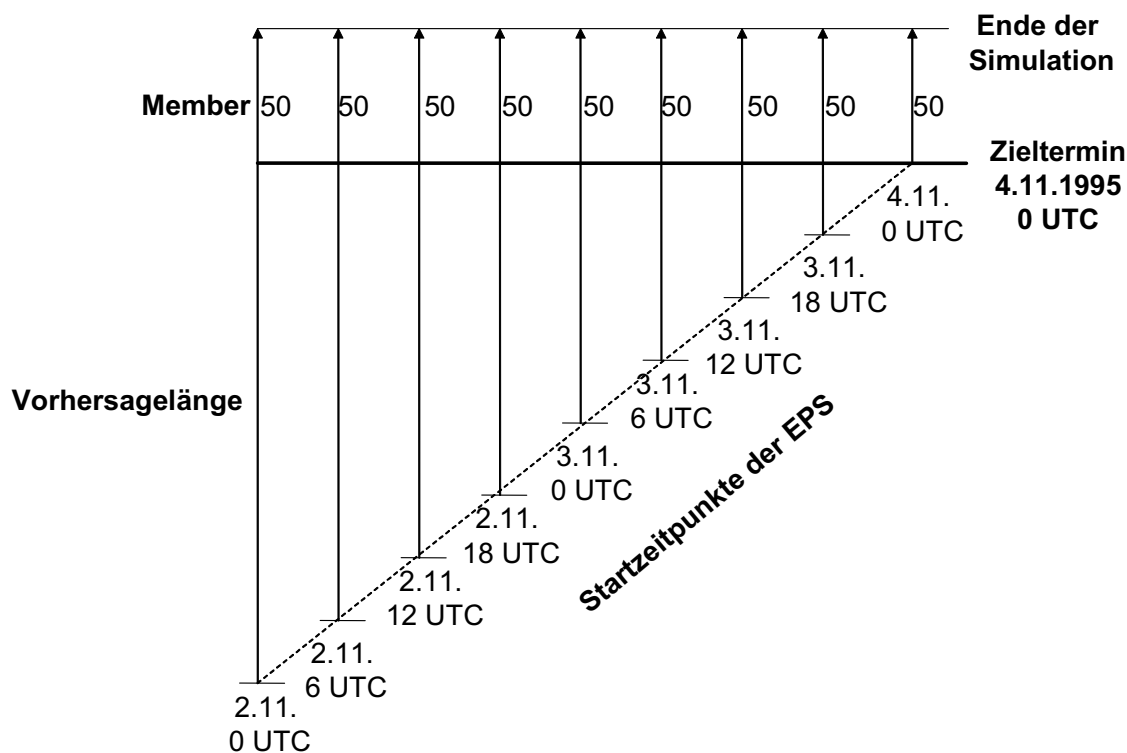


Abb. 3: Schematische Abbildung eines sogenannten Super-Ensembles. Es besteht aus mehreren EPS-Simulationen mit jeweils 50 Mitgliedern, deren Vorhersagelängen jeweils mindestens den Zieltermin erreichen

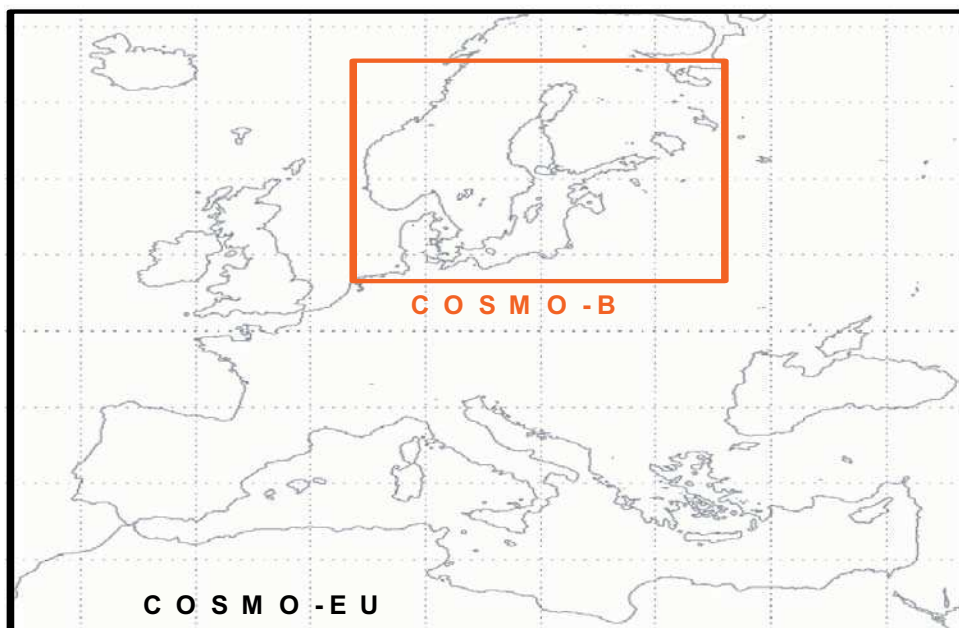


Abb. 4: Modellgebiet des operationellen COSMO-EU und des für MUSE Ostsee neu konfigurierten COSMO-B

4. Ergebnisse

In dem Zeitraum zwischen 1958 und 2006 wurden für dieses Projekt 37 Wetterereignisse ausgewählt, an denen mithilfe des EPS 31.800 Vorhersagen durchgeführt wurden. Tab. 1 listet alle Vorhersagen der 37 verschiedenen Zieltermine auf. Beispielsweise traten bei sieben Sturmereignissen in den Analysen des ERA40-Datensatzes oder in den operationellen Analysen keine Winde aus nördlichen oder östlichen Windrichtungen in den untersuchten Regionen der Ostseeküste auf. Trotzdem sind die Wetterereignisse mit dem EPS nachgerechnet worden, da die aufgetretenen Tiefdruckgebiete über der Ostsee zu sehr hohen Windgeschwindigkeiten geführt haben. In den mit dem EPS nachgerechneten Vorhersagen für die sieben Sturmereignisse gab es dann tatsächlich bestimmte Member, in denen die Wanderung der Sturmtiefs im Vergleich zur Messung so modifiziert wurde, dass andere Windrichtungen in der südwestlichen Ostsee auftraten. Aus Tab. 1 wird deutlich, dass die Vorhersagen jeweils höhere maximale Windgeschwindigkeiten produzierten, was jedoch mit der stündlichen Auflösung der Vorhersagen zusammenhängen kann. So enthält der ERA40-Datensatz grundsätzlich nur sechsstündige Werte, dagegen wurden die Vorhersagen mit einer zeitlichen Auflösung von nur einer Stunde erstellt.

In weniger als 600 der insgesamt 31.800 Vorhersagen traten bei zwölf verschiedenen Wetterereignissen Windgeschwindigkeiten (vgl. Tab. 1) von mehr als zehn Beaufort auf, bei nördlichen bis östlichen Windrichtungen in der südwestlichen Ostseeküste (rot markierte Zahlen in Abb. 5). In Abb. 5 sind lediglich solche Vorhersagen prozentual berücksichtigt worden, bei denen Windrichtungen zwischen 0 und 90° aufgetreten sind. Jede Vorhersage wurde nur jeweils einmal gezählt, unabhängig von der entsprechenden Anzahl der Stunden, in denen die nördlichen bis östlichen Windrichtungen vorhergesagt wurden. So traten z.B. in 387 verschiedenen Vorhersagen Windgeschwindigkeiten von zehn Beaufort bei einer Windrichtung zwischen 0 und 90° in der Nähe von Arkona auf. Dies entspricht einem Anteil von

ungefähr 1,3 %, bezogen auf insgesamt 23.863 Vorhersagen. In den restlichen, rund 15.000 der insgesamt 31.800 Vorhersagen, traten in den betrachteten Regionen überhaupt keine Windrichtungen zwischen 0 und 90° auf. Die rund 600 Vorhersagen mit dem EPS, in denen eine Windgeschwindigkeit von mehr als zehn Beaufort simuliert wurde, wurden einzeln pro Vorhersagelänge hinsichtlich ihres Bodenluftdruckfeldes visuell betrachtet. 60 dieser Vorhersagen, also rund 10 %, wurden dann zum Antrieb für das COSMO-B ausgewählt, um eine höhere räumliche Auflösung für das Gebiet der Ostsee zu erhalten. Bei den Vorhersagen mit COSMO traten in den bodennahen Windgeschwindigkeiten deutliche Unterschiede im Vergleich mit den Members aus dem EPS auf. So lag – von einer Ausnahme abgesehen – die bei Arkona prognostizierte Windgeschwindigkeit in zehn Meter Höhe des jeweiligen Members immer deutlich über den Vorhersagen mit COSMO (Abb. 6). Dies ist insofern verwunderlich, da das höher aufgelöste Modell mit stündlichen Randdaten des Members angetrieben wurde! Die Unterschiede in der Windgeschwindigkeit sind – in Abhängigkeit des Sturmergebnisses – mit bis zu 14 m/s sehr groß. Über die Ursachen kann nur spekuliert werden, da im Rahmen dieses Projektes keine ausreichende Zeit gegeben war, die Ursachen für die auftretenden Unterschiede in den Modellen hinlänglich zu prüfen.

Das EPS und COSMO sind beide in der täglichen Wettervorhersage erprobte Modelle. Mit dem EPS wurden in der Vergangenheit bereits einige sehr intensive Stürme (FROUDE, 2006; JUNG et al., 2004), unter anderem auch der Hurrikan Katrina (EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE FORECAST, 2006), erfolgreich vorhergesagt. Da die Luftdruckgradienten in beiden Modellen für die verschiedenen Sturmereignisse in den beobachteten Regionen relativ ähnlich sind, kann vermutet werden, dass die unterschiedlichen Parametrisierungen in der Grenzschicht für die Differenzen verantwortlich sind. Die großen Unterschiede in den bodennahen Windgeschwindigkeiten beider Modelle wurden schließlich auch in dem Vorgängerprojekt MUSE Nordsee beobachtet (KOZIAR u. RENNER, 2005). Für dieses Projekt wurden außerdem für bestimmte Ereignisse die Höhenwinde in beiden Modellen untersucht. Hierbei stellte sich heraus, dass die Unterschiede in den Windgeschwindigkeiten nur in der unteren atmosphärischen Grenzschicht, bis ungefähr in eine Höhe von 350 Meter, auftreten. Dieses Phänomen spricht auch dafür, dass die Unterschiede in den bodennahen Windgeschwindigkeiten auf die verschiedenen Grenzschichtparametrisierungen in beiden Modellen zurückzuführen sind. Da in diesem Projekt nun nicht abschließend geklärt werden konnte, welches Modell realistischere Windgeschwindigkeiten modelliert hat, wurden die Daten beider Modelle für den Antrieb in den HN-Modellen verwendet. Die Ergebnisse der entsprechenden Wasserstandsanalysen – unter Verwendung des in diesem Bericht dargestellten meteorologischen Antriebs – sind in BORK u. MÜLLER-NAVARRA (2009) u. in BRUSS et al. (2009) bzw. in diesem Sonderheft dargestellt.

Tab. 1: Anzahl der für MUSE Ostsee für 37 verschiedene Wetterereignisse mit den Membern aus dem EPS durchgeführten Vorhersagen. Der Zieltermin ist das Datum, an dem die meisten Member eines Ensembles die höchsten Windgeschwindigkeiten bei nördlichen bis östlichen Windrichtungen im Bereich der südwestlichen Ostseeküste für einen nachgerechneten Sturm prognostizierten. In der Regel stimmt dieses Datum ungefähr mit dem Zeitpunkt überein, an dem eine reale Sturmflut aufgetreten ist. Die dritte Spalte der Tabelle kennzeichnet die maximale Windgeschwindigkeit im ERA40-Datensatz, die vierte Spalte die maximale Windgeschwindigkeit in der Simulation jeweils in der Nähe von Arkona (gemittelt zwischen 13 und 15° östlicher Länge, bei 55° nördlicher Breite). In der Tabelle wurden lediglich Winde zwischen 0 und 90° berücksichtigt. Bei sieben Sturmereignissen traten in den Analysen keine solchen Windrichtungen auf, entsprechend sind an diesen Zielterminen keine Werte für die Windgeschwindigkeit aus dem ERA40-Datensatz angegeben

Zieltermin	Anzahl Vorhersagen	ERA40 Beaufort	Simulation Beaufort
13.01.1960	1050	7	9
15.01.1963	1050	7	10
06.02.1964	1400	6	12
12.01.1968	850	7	11
16.02.1969	700	7	10
11.01.1970	450	4	13
08.12.1971	850	6	11
20.11.1973	650	xx	8
04.01.1976	750	7	11
28.12.1978	1900	8	9
13.02.1979	950	8	10
24.11.1981	350	xx	7
06.01.1982	250	6	9
18.01.1983	600	xx	11
02.02.1983	250	xx	8
07.02.1983	1050	7	10
12.10.1985	500	4	10
07.04.1986	800	7	10
19.12.1986	700	6	13
12.01.1987	550	7	9
29.11.1988	550	4	11
17.01.1992	950	3	10
21.02.1993	800	6	10
03.01.1995	1750	6	10
08.04.1995	2300	4	10
04.11.1995	600	7	11
17.11.1995	1300	5	12
20.02.1996	650	7	12
11.04.1997	2950	4	10
01.11.2001	550	xx	9
02.01.2002	250	6	9
21.02.2002	1050	7	9
25.10.2003	250	6	11
06.12.2003	300	7	10
18.11.2004	750	xx	10
23.11.2004	250	xx	10
27.01.2005	900	7	10
	31800		

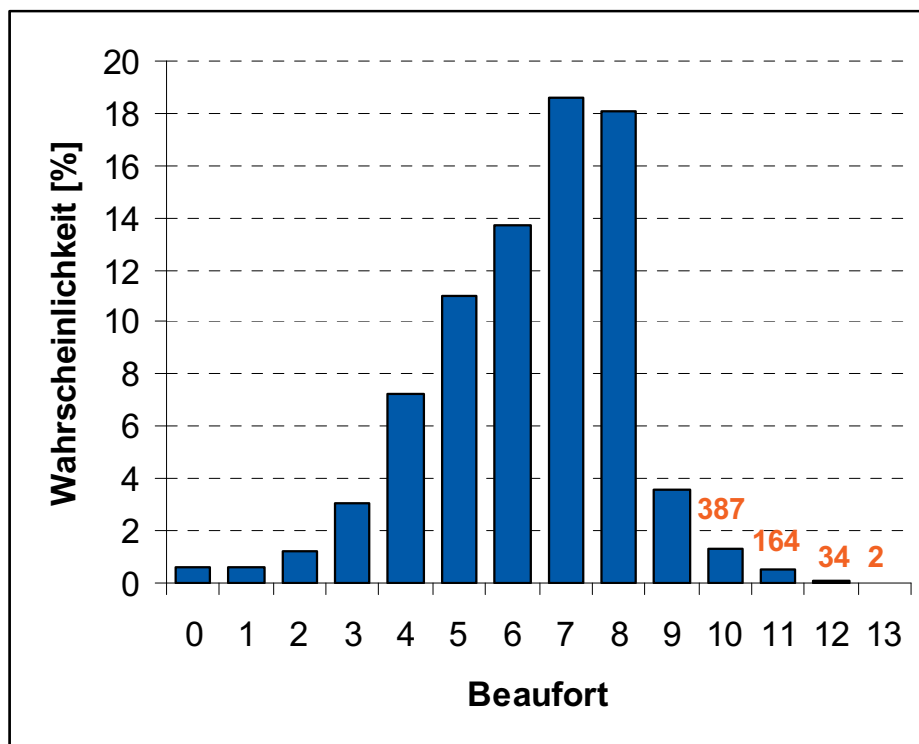


Abb. 5: Häufigkeitsverteilung der mit dem EPS prognostizierten Windstärken, gemittelt über ein Gebiet zwischen 13° und 15° östlicher Länge, bei 55° nördlicher Breite. Die rot markierten Zahlen entsprechen der Anzahl der Vorhersagen, bei denen Windstärken von mehr als zehn Beaufort simuliert wurden

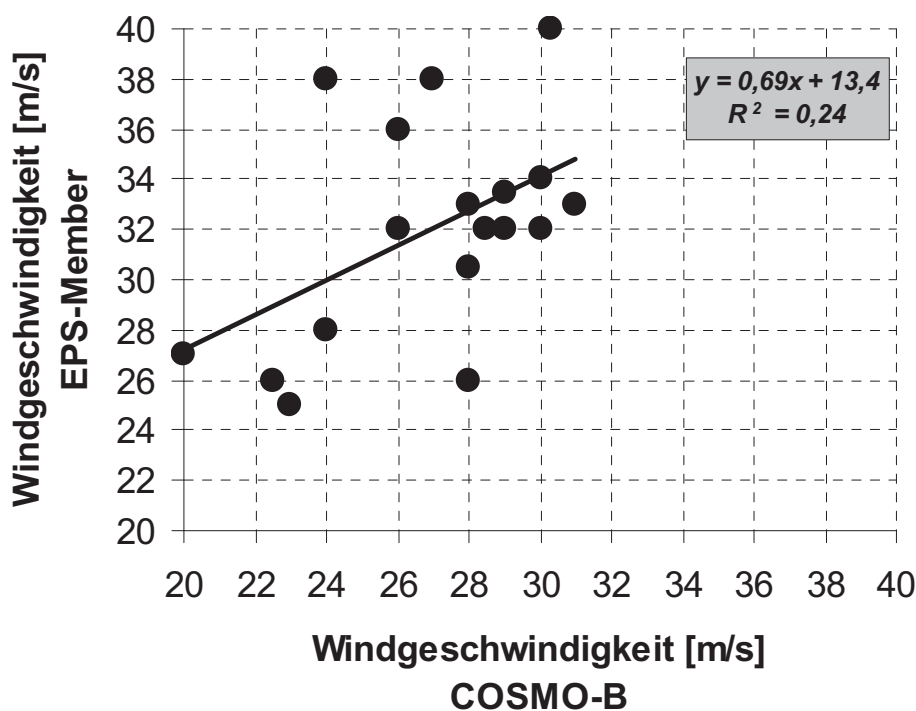


Abb. 6: Simulierte maximale Windgeschwindigkeiten in zehn Meter Höhe aus Vorhersagen des EPS und COSMO für ausgewählte Sturmereignisse. Berücksichtigt wurde das Gebiet zwischen 13 und 15° östlicher Länge und 55° nördlicher Breite, in dem die Windgeschwindigkeit gemittelt wurde

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

- BAERENS, C.: Extremwasserstandsereignisse an der deutschen Ostseeküste. Dissertation, Freie Universität Berlin, 1998.
- BECKMANN, B.-R.: Veränderungen in der Windklimatologie und in der Häufigkeit von Sturmhochwassern an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns. Dissertation, Universität Leipzig, 1997.
- BENKEL, A. u. MEINKE, I.: Variation von sturmfluterzeugenden Tiefdruckgebieten oder Sturm-
wetterlagen. Abschlussbericht 1.2 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Geesthacht, 2008.
- BORK, I. u. MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Simulation und Analyse extremer Sturmhochwasser an der Deutschen Ostseeküste. Abschlussbericht 1.3 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Hamburg, 2009.
- BRUSS, G.; JIMENEZ, N.; MAYERLE, R. u. EIBEN, H.: Seegangbelastung Ostseeküste – Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgeblicher Bemessungsparameter für Küstenschutzbauwerke. Abschlussbericht 2.2 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Kiel, 2009.
- BUIZZA, R.; MILLER, M. u. PALMER, T. N.: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. In: Q. J. R. Meteorol. Soc. 125, 2887–2908, 1999.
- BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT u. HYDROGRAPHIE (Hrsg.): Sturmfluten in der südlichen Ostsee (westlicher und mittlerer Teil). In: Berichte des BSH 39, Hamburg, 2005.
- DOMS, G.; SCHÄTTLER, U. u. SCHULZ, J. P.: Kurze Beschreibung des Lokal-Modells LM und seiner Datenbanken auf dem Datenserver (DAS) des DWD. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2003.
- EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE FORECAST: Newsletter 105. Internet: <http://www.ecmwf.int/publications/newsletters/pdf/105.pdf> (18.9.2009), 2005.
- EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE FORECAST: NEWSLETTER 108. Internet: <http://www.ecmwf.int/publications/newsletters/pdf/108.pdf> (18.9.2009), 2006.
- FROUDE, L. S. R.: The Prediction of Extratropical Storm Tracks by the ECMWF and NCEP Ensemble Prediction Systems. Dissertation, Universität Reading, 2006.
- GANSKE, A.; ROSENHAGEN, R. u. SCHMIDT, H.: Windfelder für SEBOK. Abschlussbericht 2.1 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Hamburg, 2007.
- JUNG, T.; KLINK, E. u. UPPALA, S.: Reanalysis and reforecast of three major European storms of the twentieth century using the ECMWF forecasting system. Part II: Ensemble forecasts. In: Meteorological Applications 12, pp 111–122, Cambridge, 2004.
- KALLBERG, P.; BERRISFORD, P.; HOSKINS, B.; SIMMONS, A.; UPPALA, S.; LAMY-THEPAUT, S. u. HINE, R. (Eds.): ERA-40 Atlas. ECMWF-Re-Analysis Project Report Series 2005, Reading, UK, 2005.
- KOHLMETZ, E.: Zur Entstehung, Verteilung und Auswirkung von Sturmfluten an der deutschen Ostseeküste. In: Petermanns Geographische Mitteilungen 2, 89–96, Gotha, 1967.
- KOZIAR, C. u. RENNER, V.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste (MUSE). Teilbericht 1: Numerische Berechnung physikalisch konsistenter Wetterlagen mit Atmosphärenmodellen – Abschlussbericht des KFKI-Forschungsvorhabens (03KI039), Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2005.
- KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN (Hrsg.): Die Wasserstände an der Ostseeküste. Entwicklung – Sturmfluten – Klimawandel. Die Küste, Heft 66, 2003.
- MEINKE, I.: Das Sturmflutgeschehen in der südwestlichen Ostsee – dargestellt am Beispiel des Pegels Warnemünde. Diplomarbeit, Philipps Universität Marburg, 1998.
- MOLTENI, F.; BUIZZA, R.; PALMER, T. N. u. PETROLIAGIS, T.: The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and validation. In: Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 122, 73–119, 1996.

- MUDERSBACH, C. u. JENSEN, J.: Statistische Extremwertanalyse von Wasserständen an der Deutschen Ostseeküste. Abschlussbericht 1.4 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Universität Siegen, 2009.
- ROSENHAGEN, G. u. BORK, I.: Rekonstruktion der Sturmweatherlage vom 13. November 1872. Abstract zum Workshop „Sturmflutgefährdung der Ostseeküste“, MUSTOK Workshop 2008. Internet: http://kfki.baw.de/fileadmin/projects/MUSTOK/Tag_2_Beitrag_ROSENHAGEN_BORK.pdf (18.9.2009), 2008.
- SAGER, G. u. MIEHLKE, O.: Untersuchungen über die Abhängigkeit des Wasserstandes von der Windverteilung über der Nordsee. In: *Ann. Hydr.* 4, 11–43, 1956.
- SCHMAGER, G.: Ein Beitrag zur Dynamik der aperiodischen Wasserstandsschwankungen und ihrer Vorhersage im Übergangsgebiet zwischen Nordsee und Ostsee. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, 1984.
- SCHMITZ, R.: Vorhersage von historisch aufgetretenen Stürmen über der Ostsee mithilfe des Ensemble Prediction System und COSMO. Abschlussbericht 1.1 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Offenbach, 2007.
- STIGGE, H.-J.: Die Wasserstände an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns. In: *Die Küste*, Heft 56, 1–24, 1994.
- UK METEOROLOGICAL OFFICE: Northern Hemisphere Mean Sea Level Pressure (MSLP) fields (1873–2005). British Atmospheric Data Centre. Internet: <http://badc.nerc.uk/data/mslp> (18.9.2009), 2005.