

# Bedeutung der Zyklonenzugbahnen auf die Sturmfluthöhe in der Ostsee

Dr. Andreas Benkel<sup>1</sup>, Dr. Insa Meinke<sup>1</sup> und Prof. Dr. Hans von Storch<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht, e-Mail: andreas.benkel@gkss.de

<sup>2</sup>Meteorologisches Institut der Universität Hamburg, Bundesstr. 55, Hamburg

## Kurzfassung

Zugbahnen und Zuggeschwindigkeiten von Sturmtiefs können einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände an der südwestlichen Ostseeküste haben.

Mit einem regionalen Klimamodell wird untersucht, inwieweit sich Verlagerungseigenschaften von Tiefdruckgebieten physikalisch konsistent modifizieren lassen. Ziel dabei ist es abzuschätzen, wie stark Sturmflutscheitelhöhen durch veränderte Zugbedingungen der Zyklonen erhöht werden können.

## 1 Einleitung

Im Gegensatz zum Sturmflutgeschehen in der Deutschen Bucht tragen zur Entstehung von Sturmfluten in der Ostsee neben den reinen Windstauwirkungen auch noch Eigenschwingungen des Wasserkörpers und der Füllungsgrad der Ostsee bei. Alle Faktoren (Windstau, Eigenschwingung, Füllungsgrad) sind eng an die Zugbahn und Verlagerungsgeschwindigkeit des den Ostseeraum überquerenden Sturmtiefs verbunden. Hohe Scheitelwasserstände entstehen, falls einzelne sturmfluterzeugende Faktoren besonders ausgeprägt ausfallen oder sich eine Wetterlage einstellt, die zu einer Überlagerung der einzelnen Faktoren führt.

Von besonderem Interesse sind Sturmfluten mit sehr hohen Scheitelwasserständen, weil hiervon Risiken für den küstennahen Raum ausgehen.

Mit dem regionalen Klimamodell COSMO (Klimaversion des Lokalmodells des Deutschen Wetterdienstes) werden Sturmflutwetterlagen simuliert. Mithilfe der numerischen Simulation mit dem COSMO wird die Frage geklärt, ob – in einer bereits ausgeprägten stauwirksamen Wetterlage – eine leichte Veränderung der

Zyklonenzuggeschwindigkeit zu einer Erhöhung des Scheitelwasserstandes an verschiedenen Pegeln der deutschen Ostseeküste führt. Dadurch, dass diese Untersuchung mit einem physikalischen Modell durchgeführt wird, wird zugleich die physikalische Konsistenz der meteorologischen Parameter in bodennähe erhalten.

## 2 Daten, Modelle und Methoden

### 2.1 Das regionale Klimamodell COSMO

Die im Rahmen dieser Untersuchung benutzte COSMO-Version ist die Klimaversion des regionalen numerischen Wettervorsagemodells COSMO bzw. vormals LM (Lokalmodell) (Doms et al., 2006a, Doms et al., 2006b) des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Die numerischen Simulationen wurden mit dem Regionalmodell COSMO durchgeführt, weil dieses die Möglichkeit des Spectral Nudging bietet. Diese Möglichkeit war in der seinerzeit verfügbaren Version des LM nicht implementiert.

Das Regionalmodell COSMO kann in verschiedenen horizontalen und vertikalen Auflösungen betrieben werden. Im vorliegenden Fall wurde es mit 32 hybriden Modellschichten und – wenn im Folgenden nicht explizit anders erwähnt – einer horizontalen Auflösung von 0,44° (ca. 49 km) betrieben.

### 2.2 Die verwendeten Antriebsdaten

Als Antriebsdaten standen zum einen die Re-Analysen des US-amerikanischen National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (NCEP Re-Analysen) sowie des europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) (ERA-40 Re-Analysen) zur Verfügung. Zum anderen wurden im Projekt MUSTOK vom Deutschen Wetterdienst (DWD) Ensemblevorhersagen des Ensemble Prediction System (EPS) des Europäischen Zentrums

für Mittelfristige Wettervorhersagen (EZMW) als Antriebsdaten bereitgestellt (Schmitz, 2007). Aus der Schar von EPS-Vorhersagen wurden durch den DWD jene als Antriebsdatensatz für das Regionalmodell COSMO ausgewählt, die das Potential einer außergewöhnlich stauwirksamen Wetterlage hatten. Als Kriterium diente die maximale Windgeschwindigkeit in Kombination mit der Windrichtung über der südwestlichen Ostsee (Schmitz, 2007).

### 2.3 Spectral Nudging

Der klassische Antrieb eines regionalen Klimamodells erfolgt durch eine einmalige Initialisierung des angetriebenen regionalen Modells mit den benötigten Antriebswerten und durch die Bereitstellung und Übergabe von Randwerten durch die Antriebsdaten (z.B. von einem antreibenden Modell oder von Re-Analysedaten). D.h. nach erfolgter Initialisierung erhält das regionale Modell nur noch Informationen über die lateralen Ränder.

Beim Einsatz des Spectral Nudging (Waldron et al., 1996, von Storch et al., 2000) erhält das regionale Modell auch im Inneren des Modellgebietes Informationen aus den Antriebsdaten. Zum Antrieb des regionalen Modells im Inneren des Modellgebietes wird dem Regionalmodell die großskalige Eigenschaft bestimmter Variablen übertragen, d.h. es wird auf kleine Wellenzahlen „genudged“. Die Strenge des Nudging nimmt zum Boden hin ab. Dadurch, dass nur Informationen aus den großskaligen Eigenschaften an das Regionalmodell übertragen werden, kann sich das Regionalmodell in kleineren Skalen frei entwickeln. Gleichzeitig aber wird durch das „Nudgen“ der großen Skalen verhindert, dass sich im Verlauf der numerischen Simulation die großskalige Zirkulation des Regionalmodells vollständig von jener in den das Regionalmodell antreibenden Daten entfernt.

Aus diesen Gründen ist das „Spectral Nudging“ eine geeignete Methode insbesondere in der Hindcast-Sturmflutsimulation. Die Zyklonen werden auf diese Weise auch im Regionalmodell dort simuliert, wo sie sich in den Antriebsdaten befanden. Dies ist für die Simulation von hohen Sturmfluten eine wichtige Voraussetzung.

In den hier durchgeführten Simulationsläufen mit dem Regionalmodell COSMO erfolgte das Spectral Nudging anhand des Horizontalwindes (die u- und v-Komponenten des Windes).

### 2.4 Modifikation der Zyklonenverlagerungsgeschwindigkeit

Um den Einfluss zeitlich leicht veränderter Verlagerungseigenschaften der Sturmtiefs auf die Wind- und Luftdruckverhältnisse (und damit letztlich auch auf die Wasserstände) quantifizieren zu können, wurden Simulationen mit dem Regionalmodell COSMO mit modifizierten Antriebsdaten durchgeführt. Hierbei sind die Antriebsdaten dergestalt modifiziert, dass beispielsweise eine stauwirksame Wetterlage in den Antriebsdaten länger anhält. Über das Spectral Nudging erhält auch das Innere des Modellgebietes die Information über die großskalige Situation in den modifizierten Antriebsdaten. Dadurch wird das Modell gezwungen, nicht nur an den Rändern, sondern auch im Untersuchungsgebiet die Antriebsdaten zumindest teilweise zu übernehmen.

Gegenüber einem direkten Modifizieren jener meteorologischen Größen, mit denen die Wasserstandsmodelle angetrieben werden, hat das Zwischenschalten eines physikalischen Regionalmodells den Vorteil der physikalischen Konsistenz. Das Regionalmodell COSMO wird nur oberhalb der atmosphärischen Grenzschicht und an seinen lateralen Rändern zur Annahme der nicht physikalisch konsistent zeitlich variierenden Antriebswerte gezwungen. In der Grenzschicht über dem Untersuchungsgebiet stellt sich im Modell wieder ein – sich aus der numerischen Lösung der Modellgleichungen ergebender – physikalisch begründbarer Zustand ein. Die Modifikation der das CLM antreibenden Daten erfolgt zudem in einem Rahmen, durch den sichergestellt ist, dass keine Zyklonenverlagerungsgeschwindigkeiten entstehen, die außerhalb beobachteter Werte liegen.

### 2.5 Klassifizierung von Wetterlagen und zugehörigen Zyklonzugbahnen und –verlagerungsgeschwindigkeiten

Ein wichtiges Kriterium bei der Simulation von Sturmtiefs ist die physikalische Konsistenz. Diese muss auch nach Modifikation der Zugeigenschaften gewährleistet sein. In diesem Zusammenhang sind verschiedene Untersuchungen und Überlegungen durchgeführt worden. Zunächst wurden Zuggeschwindigkeiten bisheriger Ostseesturmfluten analysiert. Die Zuggeschwindigkeiten, mit denen Sturmtiefs über die Ostsee ziehen, liegen zwischen 10 und 90 km/h. Bei der Klassifikation der Zyklonenzugbahn zeigte sich, dass die vier sturmflutrelevanten Zyklonenzugbahnen (vgl. Meinke, 1998) bei 21 von 29 verschiedenen Groß-

wetterlagen nach Hess und Brezowski (1977) auftraten. Eine überschaubare Klassifizierung ist damit nicht möglich. Als geeignetes Unterscheidungskriterium wurde daher die Phase der Nordatlantischen Oszillation (NAO) gewählt. Je nach Phase des täglichen NAO Index wurden untere und obere Grenzen für die Zyklonzuggeschwindigkeit festgesetzt, die auch im Falle einer vorgegebenen Erhöhung bzw. Verlangsamung der Verlagerungsgeschwindigkeit nicht über- bzw. unterschritten werden dürfen. Simulationen, in denen nach explizitem Eingriff in die Verlagerungsgeschwindigkeit der in natura beobachtete Bereich verlassen würde, blieben folglich in den Analysen unberücksichtigt.

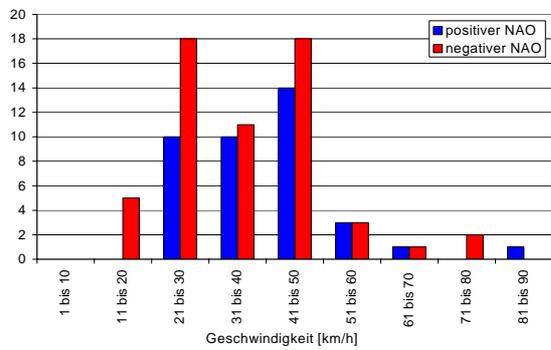


Abbildung 1: Zyklonzuggeschwindigkeiten sturmflutzeugender Zyklogen bei positivem und negativem NAO-Index (1953 bis 1997).

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Validierung des Luftdruckfeldes in den CLM Simulationen

In den Abbildungen 2-4 ist deutlich der Effekt des Spectral Nudgings zu erkennen. Mit Spectral Nudging werden die großräumigen Zirkulationsmuster der Re-Analysedaten deutlich besser wiedergegeben. Die Simulationen von Sturmflutwetterlagen in der südwestlichen Ostsee können durch das Spectral Nudging also deutlich verbessert werden. Für die Wiedergabe stauwirksamer Windrichtungen ist insbesondere die Lage der modellierten Druckgebilde wichtig. Insbesondere wenn EPS-Vorhersagen mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten als Antriebsdaten verwendet werden, ist das Spectral Nudging somit eine wirksame Methode, um sturmflutwirksame Eigenschaften dieser Vorhersage (u.a. Verteilung und Zuggeschwindigkeit der Druckgebilde, Windrichtung und -stärke) zu erhalten. Dies ist im Hinblick auf die Zielsetzung des Projektes wichtig, da möglichst hohe Sturmflutscheitelwasserstände simuliert werden sollen.

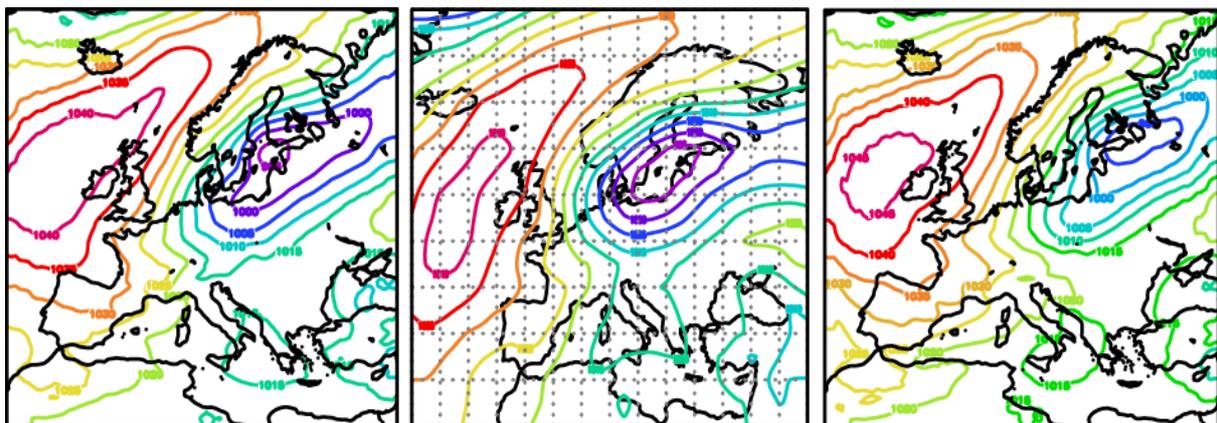


Abbildung 2: Sturmflut vom 03.01.1954. Links mit Spectral Nudging, rechts ohne Spectral Nudging, mitte: NCEP Re-Analyse.

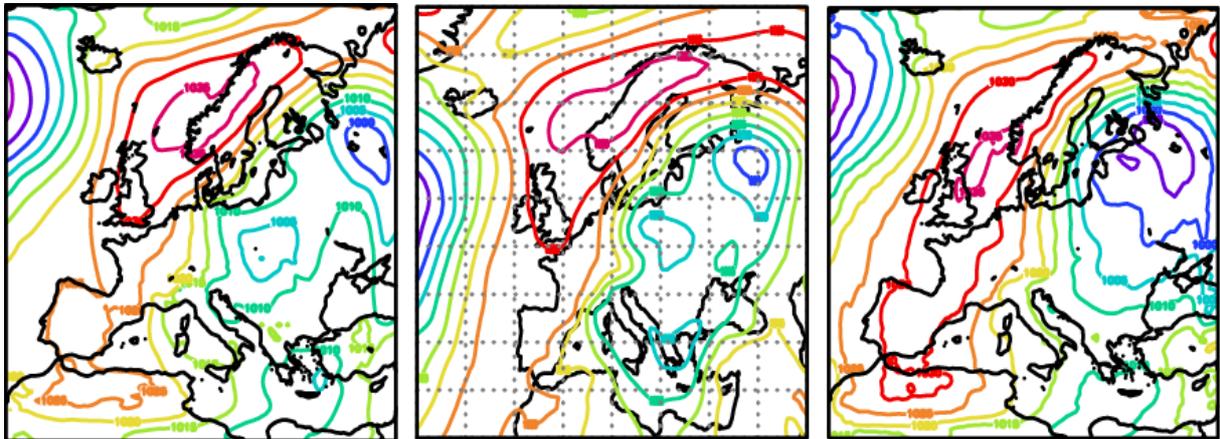


Abbildung 3: Sturmflut vom 04.11.1995. Links mit Spectral Nudging, rechts ohne Spectral Nudging, mitte: NCEP Re-Analyse.

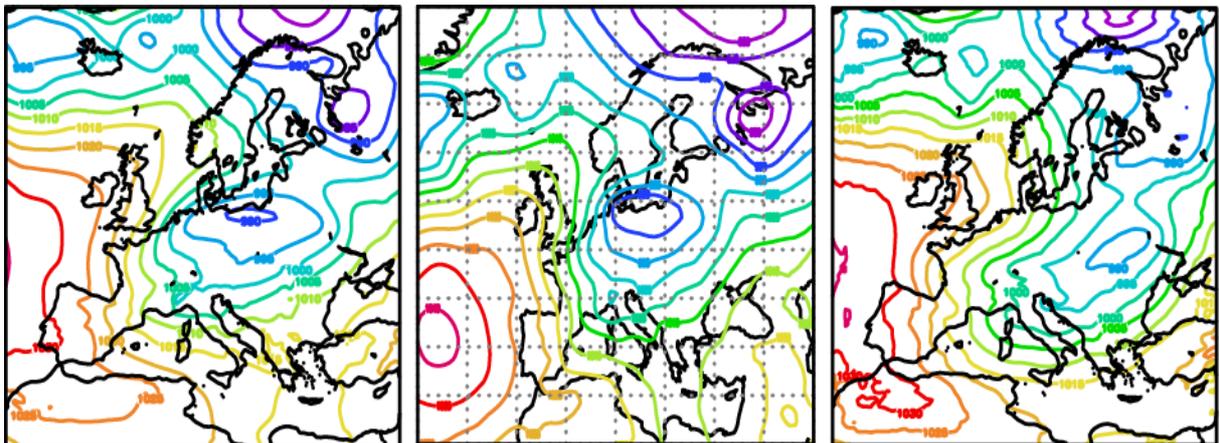


Abbildung 4: Sturmflut vom 21.02.2002. Links mit Spectral Nudging, rechts ohne Spectral Nudging, mitte: NCEP Re-Analyse.

### 3.2 Auswirkungen einer veränderten Zyklonenverlagerungsgeschwindigkeit

Am Beispiel der Sturmflut vom 04.11.1995 konnte in hydrodynamischen Simulationen nachgewiesen werden, dass die Scheitelwasserstände an der deutschen Ostseeküste höher ausfallen, wenn die stauwirksame Windrichtung in der Nacht vom 03.11.1995 auf den 04.11.1995 (vgl. Abbildung 3) eine Stunde länger anhält (Bork, 2007). Dazu wurden die EPS-Vorhersagen, die zuvor eine Zeitspanne von 5 Stunden abdeckten auf 6 Stunden ge-

streckt. Eine hydrodynamische Simulation mit entsprechend modifizierten EPS-Daten führte zu Scheitelwasserständen zwischen Flensburg und Warnemünde, die 5-10 cm höher ausfielen, als wenn das Modell mit den originalen EPS-Vorhersagen angetrieben wurde (Bork, 2007), vgl. Abbildung 5.



ge „genügend“ werden musste, damit sich die Modifikation der EPS-Antriebsdaten auch in COSMO-Windfeld durchsetze.

Deshalb werden jetzt folgende weitere Untersuchungen unternommen: Es wird eine dem Problem angepasste optimale Nudging-Strategie entwickelt. Mit dieser werden mit dem Regionalmodell COSMO weitere extreme Wettersituationen im Hinblick auf potentiell noch höhere Wasserstände simuliert und modifiziert. Dabei werden neben einer Erniedrigung der Zyklonenverlagerungsgeschwindigkeit auch Fälle gerechnet, in denen die sturmfluterzeugende Zyklone in ihrer Verlagerung beschleunigt wird.

## Literatur

Bork, I. (2007): Persönliche Mitteilung.

Doms, G., J. Förstner, E. Heise, H.-J. Herzog, M. Raschendorfer, R. Schrodin, T. Reinhardt und G. Vogel (2006a): The nonhydrostatic limited-area model LM (Lokal-Modell) of DWD. Part II: Physical Parameterizations. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 146S.

Doms, G., U. Schättler und C. Schraff (2006b): The nonhydrostatic limited-area model LM (Lokal-Modell) of DWD. Part VII: User's guide. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 132S.

Hess, P. und H. Brezowski (1977). Katalog der Großwetterlagen Europas, Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 15, Seiten 1-14.

Meinke, I. (1999): Sturmfluten in der südwestlichen Ostsee – dargestellt am Beispiel des Pegels Warnemünde. Marburger Geographische Schriften, 134, 1-23.

Schmitz, R. (2007): Vorhersage von historisch aufgetretenen Stürmen über der Ostsee mithilfe des Ensemble Prediction Systems und

COSMO. Abschlussbericht des Projekts MUSTOK.

von Storch, H., H. Langenberg, F. Feser (2000): A Spectral Nudging technique for dynamical downscaling purpose. Mon. Wea. Rev. 128, 3664-3673.

Waldron, K. M., J. Peagle und J. D. Horel (1996): Sensitivity of a spectrally filtered and nudged limited area model to outer model options. Mon. Wea. Rev., 124, 529-547.