

# Eine Methode zur Variation sturmflutrelevanter Wetterlagen über der Ostsee

Von ANDREAS BENKEL, INSA MEINKE und HANS VON STORCH

## Zusammenfassung

Ziel dieser Studie ist es, Extremwetterlagen so zu modifizieren, dass an der südwestlichen Ostseeküste sehr hohe Sturmflutscheitelwasserstände entstehen können. Für diese Modifikationen wird das regionale Atmosphärenmodell COSMO-CLM eingesetzt. Als Antrieb dienen sowohl Originalantriebsdaten des Globalmodells als auch Analysen mit explizit verändertem zeitlichen Ablauf der Wetterlage. Es zeigt sich, dass dem Modell explizit die modifizierten dreidimensionalen Luftdruckverteilungen aus dem Antriebsdatensatz aufgezwungen werden müssen, um das Muster und die Verlagerungsgeschwindigkeit nennenswert ändern zu können. Die Modifikation der Sturmtiefzuggeschwindigkeit im regionalen Atmosphärenmodell COSMO-CLM hat zu einer Erhöhung der berechneten Scheitelwasserstände von 5–10 cm geführt.

## Schlagwörter

Ostsee, Sturmflut, Meteorologie, regionales Atmosphärenmodell, spectral nudging

## Summary

*The aim of this study is to modify extreme weather situations in order to generate storm surges with very high water levels in the south-western Baltic Sea. For these modifications the regional atmospheric model COSMO-CLM is used. As forcing extreme weather situations were used, which caused storm surges in the south western Baltic Sea in the past. These weather situations were simulated by a global atmospheric model. This study shows that storm surge generating wind fields are not sensitive to short-term perturbations. A modification of the weather situation simulated by the regional atmospheric model was achieved only by deriving the complete three dimensional field of the global model. These modifications raised the water level in the south western Baltic Sea by 5–10 cm.*

## Keywords

Baltic Sea, storm surge, meteorology, regional atmospheric model, spectral Nudging

## Inhalt

1. Einführung . . . . .	22
2. Experimentbeschreibung . . . . .	22
2.1 Konzeption . . . . .	22
2.2 Das Modell COSMO-CLM . . . . .	23
2.3 Spectral Nudging . . . . .	24
2.4 Modifikation der Zugeigenschaften von Sturmtiefs . . . . .	25
3. Ergebnisse . . . . .	25
3.1 Teil I: Klassifizierung von Zugbahnen und Verlagerungsgeschwindigkeiten von Sturmtiefs . . . . .	25
3.2 Teil II: Simulationen mit dem COSMO-CLM . . . . .	26
3.2.1 Validierung und Nutzen des Spectral Nudgings . . . . .	26
3.2.2 Sensitivitätsexperimente zur Spezifikation der großskaligen Konditionierung . . . . .	27

4. Zusammenfassung und Fazit . . . . .	35
5. Danksagung . . . . .	36
6. Schriftenverzeichnis . . . . .	36

## 1. Einführung

Ziel der vorliegenden Studie ist es herauszufinden, ob durch geringfügige Änderungen der Sturmtiefzugbahn eine nennenswerte Änderung des Wasserstandes eintritt, wenn diese Modifikation in einer bereits ausgeprägten stauwirksamen Wetterlage durchgeführt wird. Voraussetzung für Modifikationen von Sturmflutwetterlagen ist die Gewährleistung der physikalischen Konsistenz. Deshalb muss zunächst eine geeignete Methode zur Variation sturmflutrelevanter Wetterlagen über der Ostsee gefunden werden. Die in der Modellwelt eingetretene Realisation eines Sturmflutgeschehens wird künstlich beeinflusst im Sinne von „Was wäre, wenn das sturmfluterzeugende Tiefdruckgebiet nur etwas langsamer gezogen wäre und sich daraus eine längere Wirkdauer für den Windstau ergeben hätte?“. Die Ergebnisse dieser Analyse könnten einen Hinweis liefern, unter welchen nur leicht veränderten meteorologischen Randbedingungen sich Scheitelwasserstände wie 1872 ergeben können. Dazu werden mit dem regionalen Atmosphärenmodell COSMO-CLM numerische Simulationen durchgeführt. Die Antriebsdaten für das COSMO-CLM entstammen den Ensemble Prediction System (EPS)-Simulationen des DWD (SCHMITZ, 2009). Die Simulationsergebnisse des COSMO-CLM sind ihrerseits zum Antrieb des Ostseemodells des BSH verwendet worden.

## 2. Experimentbeschreibung

### 2.1 Konzeption

Zunächst wurden Wetterlagen ausgewählt, die bereits unmodifiziert zu einem möglichst hohen Wasserstand führten. Die Modifikation der Sturmtiefzugeigenschaften soll physikalisch weitgehend konsistent bleiben und erfolgt daher durch die Modifikation der Antriebsdaten des COSMO-CLM. Diese stehen in stündlicher Auflösung bereit. Sie werden linear in der Zeit interpoliert, um dem Modell zu jedem internen Zeitschritt die benötigten Randwerte bereitzustellen. Im Rahmen dieser zeitlichen Interpolation werden dem COSMO-CLM die Antriebsdaten in zeitlich verändertem Ablauf bereitgestellt. Ein eigentlich fünf Stunden dauernder Ablauf wird beispielsweise auf sechs Stunden gestreckt. Durch diese Modifikation wird in die Ausgestaltung (im weiteren „Realisation“) einer möglichen Wetterentwicklung eingegriffen. Diese neue, künstlich geschaffene Realisation wird zunächst nur zum Antrieb eines regionalen Atmosphärenmodells, dem COSMO-CLM, benutzt. Mit dem COSMO-CLM wird dann eine neue Wetterlage simuliert, die physikalisch konsistent aus den bereitgestellten Antriebsdaten gerechnet wird. Die Studie ist folgendermaßen durchgeführt worden:

1. Bestimmung der Sturmtiefzuggeschwindigkeit in realen Fällen
2. Identifikation von für die Modifikation geeigneten Terminen
3. Auswahl der Termine und Simulation der Wetterlage mit dem COSMO-CLM
4. Auswahl von Wetterlagen mit extremen Wasserständen bereits ohne Modifikation
5. Simulation von Extremwetterlagen mit zusätzlicher Modifikation

## 2.2 Das Modell COSMO-CLM

Die Wetterlagen werden mit dem regionalen Atmosphärenmodell COSMO-CLM simuliert. Eine umfassende Dokumentation zum COSMO-CLM findet sich auf der Homepage des COSMO-Konsortiums und bei DOMS et al. (2006a u. 2006b).

Das COSMO-CLM muss initialisiert werden und an den lateralen Rändern Informationen über den großskaligen Zustand der Atmosphäre erhalten. Beides ist erfolgt durch Antriebsdatensätzen aus Wetterlagen, die das Potential einer außergewöhnlich stauwirksamen Wetterlage hatten. Als Kriterium diente die maximale Windgeschwindigkeit in Kombination mit nordöstlicher Windrichtung über der südwestlichen Ostsee (SCHMITZ, 2009a). Die mit dem COSMO-CLM erzeugten meteorologischen Felder sind vom BSH zum Antrieb des BSH-Modellsystems verwendet worden, um die Scheitelwasserstände für die Pegel an der deutschen Ostseeküste zu berechnen. Abb. 1 zeigt die Land-See-Verteilung des COSMO-CLM in der 0,44°-Auflösung für den Ostseeraum. Tab. 1 verweist auf die generelle Konfiguration der Modellläufe.

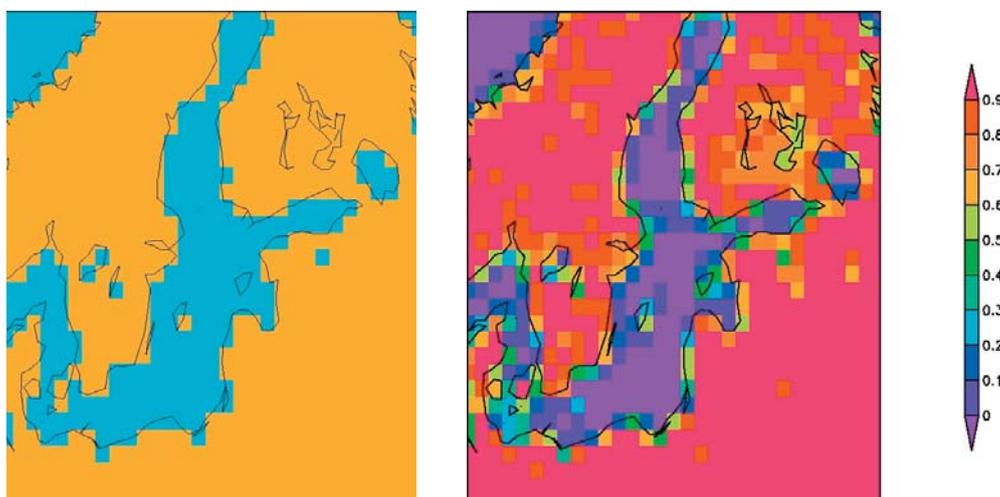


Abb. 1: Land-See-Maske (links) und fraktioneller Landanteil (rechts) des COSMO-CLM in der 0,44°-Version im Ostseeraum

Tab. 1: Kenngrößen zum Modellauf des COSMO-CLM, wie es in der vorliegenden Studie verwendet wurde

Gitterpunkte / Modellniveaus	80 (x), 79 (y) / 32 hybride Modellniveaus
Pol des rotierten Gitters	39,25° N / 162° W
Horizontale Auflösung	0,44° (ca. 49 km)
Eckpunkte des Modellgebietes	Nordwest: 32,02° W / 61,94° N Nordost: 49,26° O / 67,03° N Südwest: 7,52° W / 31,48° N Südost: 32,44° O / 34,14° N
Zeitschritt	300 s
Modellversion	CLM 3.21
Spongezone (lateraler Übergangsbereich zum Modellrand)	8 Gitterpunkte

### 2.3 Spectral Nudging

Das Modell wird in der vorliegenden Untersuchung mit Spectral Nudging betrieben (WALDRON et al., 1996; VON STORCH et al., 2000). Somit erhält das regionale Modell auch im Inneren des Modellgebietes fortlaufend Informationen über den großskaligen Zustand der Atmosphäre aus den Antriebsdaten. Diese werden auf kleinräumige Skalen übertragen („genudged“). Die Strenge des Nudgings nimmt im Allgemeinen zum Boden hin ab. Im Regelfall werden nur Informationen aus den großskaligen Eigenschaften an das Regionalmodell übertragen. So kann sich das Regionalmodell in kleineren Skalen frei entwickeln, ohne dass sich im Verlauf der numerischen Simulation die großskalige Zirkulation des Regionalmodells vollständig von jener der Antriebsdaten entfernt.

In den hier durchgeführten Simulationsläufen mit dem Regionalmodell COSMO-CLM sollte das Spectral Nudging anhand des Horizontalwindes (die  $u$ - und  $v$ -Komponenten des Windes) erfolgen. Dies ist die auch in der Literatur, z.B. in VON STORCH et al. (2000), üblicherweise verfolgte Vorgehensweise. Im Verlauf der Experimente stellte sich heraus, dass diese Form des Spectral Nudgings nicht geeignet war, dass COSMO-CLM hinreichend zur Übernahme der modifizierten Antriebsdaten zu zwingen, ohne dabei offensichtliche Störungen in den Berechnungen anderer prognostischer Variablen wie des Bodenluftdruckfeldes zu erhalten. Infolgedessen wurde das Spectral Nudging statt anhand der Variablen  $u$  und  $v$  mit den Variablen Luftdruck, Temperatur und spezifischer Feuchte (jeweils in allen Modellniveaus) durchgeführt.

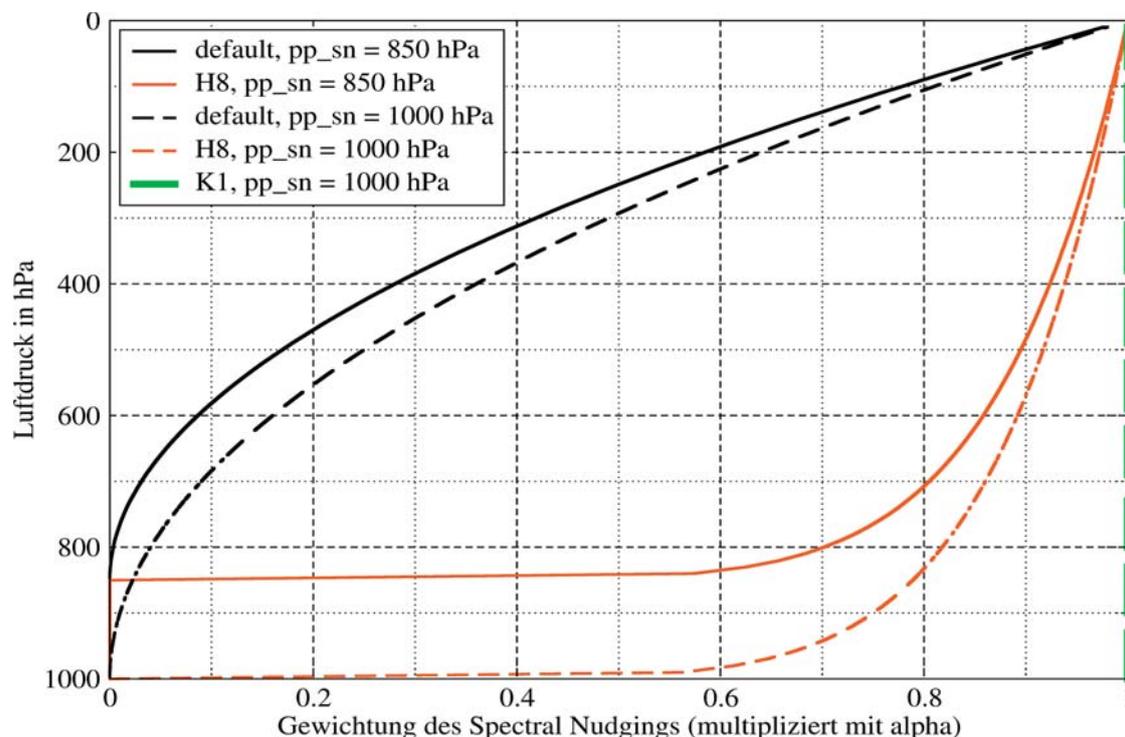


Abb. 2: Höhenabhängige Gewichtung des Spectral Nudgings im COSMO-CLM. Die schwarze Kurve zeigt den im Standard-Modell-Quellcode vorgegebenen Verlauf. Die roten Linien stehen für einen versuchsmäßig veränderten Verlauf (H8), die grüne Linie zeigt die Gewichtung 1 an (Versuchskonfiguration K1, mit K1 für Konstant Eins). Die Unterscheidung in die durchgezogene und die gestrichelte-Linie stellt sich wie folgt dar: durchgezogene Linie: Spectral Nudging ist wirksam oberhalb von 850 hPa (ca. 1,5 km Höhe), gestrichelte Linie: Spectral Nudging ist wirksam bis zum Boden

Der höhenabhängige Verlauf des Gewichts des Spectral Nudgings wird als:

$$\eta = \alpha \cdot \left( 1 - \frac{p}{pp\_sn} \right)^b$$

gewählt.  $\eta$  bezeichnet hierbei die Gewichtung (0...1) des Spectral Nudgings,  $\alpha$  ist ein vorgebarer Koeffizient,  $p$  bezeichnet das Druckniveau (z.B. in hPa),  $pp\_sn$  das unterste Druckniveau, bis zu dem das Spectral Nudging wirken soll.  $b$  ist üblicherweise 2, was zu den Verläufen „default“ in Abb. 2 führt. Die rote Linie in Abb. 2 ist mit  $b=1/8$  gerechnet, die grüne mit  $b=0$ , wodurch die Gewichtung des Spectral Nudging nur noch von  $\alpha$  abhängt.

Neben dem höhenabhängigen Verlauf kann auch noch die Strenge des Spectral Nudgings hinsichtlich der Wirksamkeit auf unterschiedliche horizontale Skalen eingestellt werden. Dies erfolgt durch die Wahl der maximalen Wellenzahl, auf die das Spectral Nudging wirken soll.

## 2.4 Modifikation der Zugeigenschaften von Sturmtiefs

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 modifizierten Antriebsdaten durchgeführt. Hierbei sind die Antriebsdaten dergestalt abgewandelt, dass beispielsweise eine stauwirksame Wetterlage in den Antriebsdaten länger anhält. Über das Spectral Nudging erhält auch das Innere des Modellgebiets die Information über die großskalige Situation in den geänderten Antriebsdaten. Dadurch wird das Modell gezwungen, nicht nur an den Rändern, sondern auch im Untersuchungsgebiet die Antriebsdaten zumindest teilweise zu übernehmen. Die Modifikation der Antriebsdaten erfolgt zudem in einem Rahmen, durch den sichergestellt ist, dass Verlagerungsgeschwindigkeiten von Sturmtiefs nicht außerhalb beobachteter Werte liegen. Dazu wurden in der Realität beobachtete Verlagerungsgeschwindigkeiten von Sturmtiefs analysiert.

## 3. Ergebnisse

### 3.1 Teil I: Klassifizierung von Zugbahnen und Verlagerungsgeschwindigkeiten von Sturmtiefs

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 Ermittlung der Häufigkeitsverteilung der Zuggeschwindigkeit wurde bei der Zuordnung des jeweiligen Ereignisses in eine Zuggeschwindigkeitsklasse zusätzlich unterschieden nach der zum Zeitpunkt des Auftretens vorhandenen großräumigen Zirkulationsform. Als Unterscheidungskriterium wurde die Phase der Nordatlantischen Oszillation (NAO) gewählt. Die Nordatlantische Oszillation stellt ein Maß für die Stärke des Luftdruckgegensatzes zwischen dem nördlichen Nordatlantik (typischerweise Island) und dem südlichen Nordatlantik (typischerweise Azoren) dar. Die positive Phase ist gekennzeichnet

durch einen ausgeprägt hohen Luftdruck über den Azoren (Azorenhoch) und einen ausgeprägt tiefen Luftdruck bei Island (Islandtief). Ausgeprägt meint in diesem Zusammenhang einen Luftdruck, der im Bereich Island tiefer ist als der im Mittel bereits tiefe Luftdruck, bzw. im Bereich der Azoren höher ist als der im Mittel bereits hohe Luftdruck. Dies führt über Nordwest- und Mitteleuropa zu einer starken westlichen Luftströmung (Westwindwetterlage). In der negativen Phase ist die Luftdruckdifferenz zwischen dem nördlichen Nordatlantik und dem südlichen Nordatlantik geringer als im Mittel, ggf. sogar negativ. Eine typische Wetterlage in der negativen Phase ist ein Hochdruckgebiet über Skandinavien, an dessen Südflanke über die Ostsee mit östlicher Strömung Luft nach Mitteleuropa gelangt. Je nach Phase des täglichen NAO-Index wurden untere und obere Grenzen für die Sturmtiefzuggeschwindigkeit festgesetzt, die auch im Falle einer vorgegebenen Erhöhung bzw. Verlangsamung der Verlagerungsgeschwindigkeit nicht über- bzw. unterschritten werden dürfen.

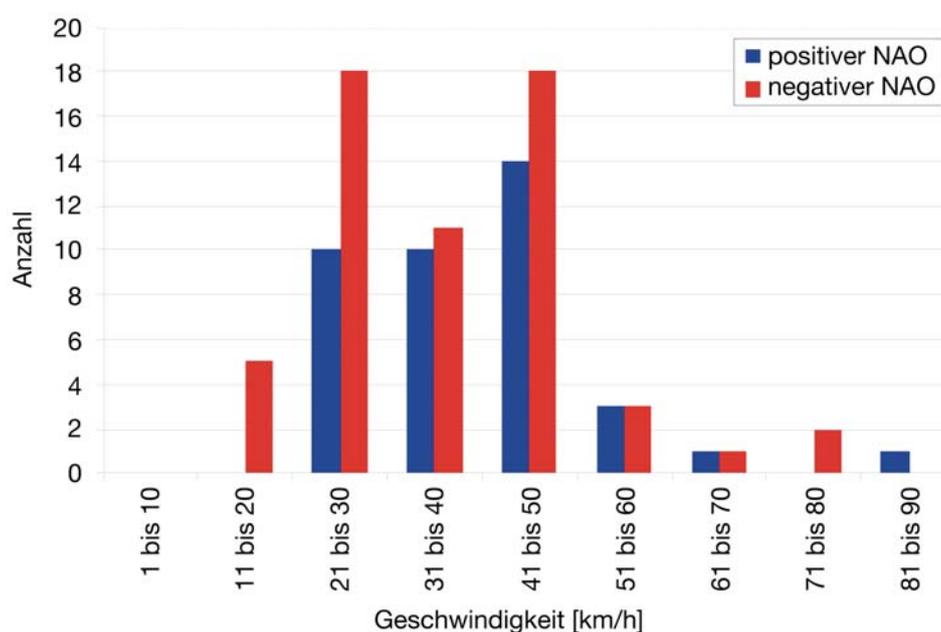


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung Zuggeschwindigkeiten sturmfluterzeugender Sturmtiefs bei positivem bzw. negativem NAO-Index (1953 bis 1997)

## 3.2 Teil II: Simulationen mit dem COSMO-CLM

### 3.2.1. Validierung des Luftdrucks und Nutzen des Spectral Nudging

Abb. 4 zeigt beispielhaft Simulationsergebnisse des COSMO-CLM mit und ohne eingeschaltetem Spectral Nudging. Dargestellt sind die Luftdruckverteilungen einer real eingetretenen Sturmflut, wie sie mit dem COSMO-CLM simuliert würde, wenn das COSMO-CLM mit NCEP-Reanalysedaten (NCEP: National Centers for Environmental Prediction) angetrieben wird. Das Spectral Nudging beschränkt sich in der der Abb. 4 zugrunde liegenden Simulation auf das Nudging der großen Skalen (Wellenzahl 4), der Wirksamkeit nur außerhalb der atmosphärischen Grenzschicht (gemäß der durchgezogenen schwarzen Kurve in Abb. 2), die sich bis etwa 1,5 km Höhe erstreckt. Es zeigt sich deutlich, dass durch die Spectral-Nudging-Technik die Lage der Druckgebilde in der COSMO-CLM-Simulation

deutlich ähnlicher dem Antriebsdatensatz ist als ohne Spectral Nudging. So werden die großskaligen Phänomene besser wiedergegeben. Der Antriebsdatensatz besteht aus einer extremen Realisation des Wettergeschehens. Ein Abweichen der Simulation im COSMO-CLM von den extremen Vorgaben aus der großräumigen Zirkulation ist nicht gewünscht, diese soll ja gerade eben wegen ihres Potenzials zur Erzeugung sehr hoher Sturmfluten erhalten bleiben.

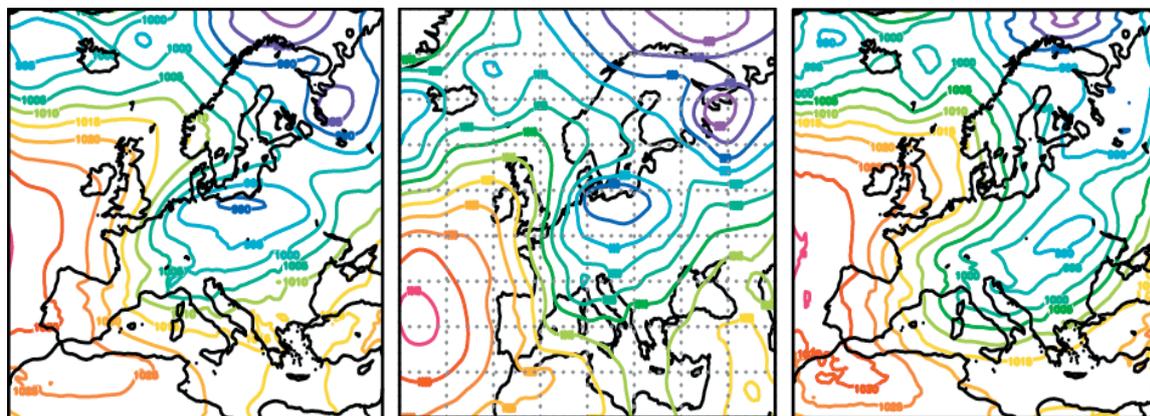


Abb. 4: Sturmflut vom 21.2.2002. Links mit Spectral Nudging, rechts ohne Spectral Nudging, Mitte: NCEP Re-Analyse. Dargestellt jeweils die Isobaren des Bodenluftdrucks

### 3.2.2. Sensitivitätsexperimente zur Spezifikation der großskaligen Konditionierung

An der deutschen Ostseeküste traten in der Realität keine vergleichbaren Scheitelwasserstände wie 1872 ein. Zur künstlichen Erzeugung extremer Ostseesturmflutwetterlagen wählte SCHMITZ (2009) Wetterlagen aus, welche das Potenzial zu sehr hohen Sturmflutscheitelwasserständen an der deutschen Ostseeküste hatten. Für diese Wetterlagen wurde durch Variation der Anfangsbedingungen ein Ensemble von Simulationen erstellt. Damit wurde eine Schar möglicher Wetterabläufe erhalten. Aus diesen ca. 30.000 Realisationen selektierte SCHMITZ (2009) diejenigen, welche über der südwestlichen Ostsee zu einem starken Wind aus Nordost führten. Ausgehend von jener Wetterlage, aus der sich eine reale Sturmflut am 3.11.1995 mit einem Scheitelwasserstand von 158 cm am Pegel Warnemünde entwickelte, konnte mit einem extremen EPS Member ein Scheitelwasserstand von über 220 cm am Pegel Warnemünde simuliert werden (SCHMITZ, 2009). Mit diesem extremen EPS-Member vom 3.11.1995 wird das COSMO-CLM angetrieben. Im Referenzlauf mit üblichem Spectral Nudging traten deutlich geringere Scheitelwasserstände an der deutschen Ostseeküste auf als beim EPS-Lauf. Dies steht im Einklang mit den deutlich geringeren maximalen Windgeschwindigkeiten, die im COSMO-CLM für diese Sturmsituation über der südwestlichen Ostsee auftraten.

Im nächsten Schritt wird mit dem COSMO-CLM in der oben beschriebenen Spectral-Nudging-Konfiguration die Simulation einer von 5 h auf 6 h gestreckten Verweildauer des Sturmhöhepunktes durchgeführt. Hierzu werden, wie schon zuvor beschrieben, die EPS-Antriebsdaten in geeigneter Form dem COSMO-CLM bereitgestellt. Im Ergebnis dieses Versuchs zeigt sich, dass es praktisch keine Änderung des Scheitelwasserstands gab. Das grundsätzliche Potenzial einer verlängerten Wirkdauer unter dieser Wetterlage zeigt sich,

wenn die modifizierten Daten des EPS nicht zum Antrieb des COSMO-CLM, sondern direkt zum Antrieb der Wasserstandssimulation dienen. Wird mit den zeitlich gestreckten EPS-Daten das hydrodynamische BSH-Modell direkt angetrieben, so ergeben sich höhere Scheitelwasserstände (zwischen Flensburg und Stralsund von + 2,4 cm bis + 8,0 cm).

Das COSMO-CLM ist mit dem nur sehr schwach eingestellten Spectral Nudging für den Horizontalwind nicht in der Lage, die über die Antriebsdaten erzwungene Verlangsamung der Änderung des synoptisch-skaligen Wettergeschehens zu simulieren. Das COSMO-CLM scheint sich ohne sehr starken Zwang nicht im Sinne einer unnatürlich aufgeprägten Störung zu entwickeln. Deshalb wurden Simulationen mit dem COSMO-CLM durchgeführt, bei denen die zeitliche Dehnung des Wettergeschehens nicht nur um 1 h von 5 h auf 6 h gedehnt wurde, sondern um 3 h von 12 h auf 15 h um den Zeitpunkt der maximalen Windstauwirkung. Eine eindeutige Wasserstandserhöhung wie beim Antrieb des BSH-Modells mit den direkt modifizierten EPS-Daten (zwischen Flensburg und Stralsund + 4,5 cm bis + 11,3 cm) ergab sich jedoch nicht. Die Änderungen der Scheitelhöhen lagen hier zwischen - 1,3 cm bis + 2,1 cm (Abb. 5). Zu Vergleichszwecken wurde auch die Ausgabe des COSMO-CLM-Laufs aus unmodifizierten Antriebsdaten zum Antrieb des Wasserstandsmodells direkt geändert (analog zu den EPS-Daten). Auch hier zeigte sich keine eindeutige Wasserstandserhöhung (- 1,3 cm bis + 3,6 cm) (Abb. 5). Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass bei den geringeren bodennahen Windgeschwindigkeiten (im Vergleich zum EPS), die im COSMO-CLM simuliert werden, die für diese Wettersituation (und Windgeschwindigkeit)

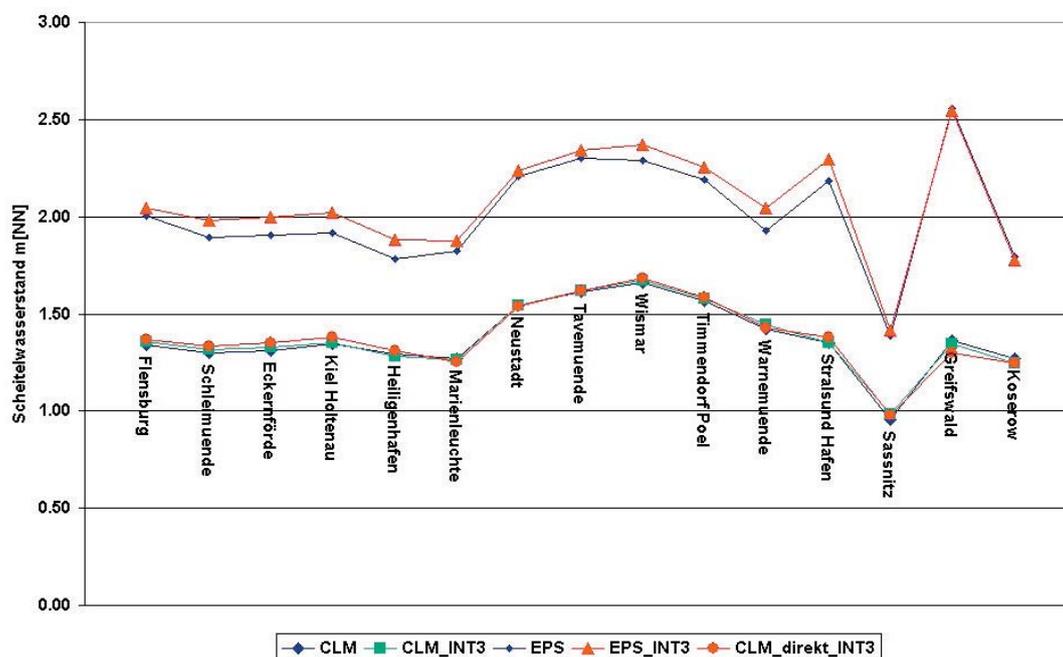


Abb. 5: Simulierte Scheitelwasserstände an der deutschen Ostseeküste. Simuliert mit dem Ostseemodell des BSH, das mit verschiedenen meteorologischen Daten („Antriebsdaten“) angetrieben wurde. Ausgangslage: Extremes EPS-Member zum 3.11.1995. Die Legende bedeutet Folgendes: CLM: Atmosphärendaten aus COSMO-CLM; CLM\_INT3: Atmosphärendaten aus COSMO-CLM, jedoch seinerseits mit um drei Stunden verlangsamt abgelaufener Antriebsdaten angetrieben; EPS: Atmosphärendaten aus EPS; EPS\_INT3: Atmosphärendaten aus EPS, diese aber um drei Stunden gestreckt ins Ostseemodell des BSH eingelesen; CLM\_direkt\_INT3: Atmosphärendaten aus dem COSMO-CLM, diese aber um drei Stunden gestreckt in das Ostseemodell des BSH eingelesen. Simulationsdaten der BSH-Simulation und Abbildung: BORK (2007)

erzielbare Wasserstandserhöhung bereits nahezu erreicht wurde und eine längere Wirkdauer kaum noch eine Wirkung auf den Scheitelwasserstand hat. Bei einer höheren bodennahen Windgeschwindigkeit – wie im EPS – hingegen könnte die längere Wirkdauer die Scheitelwasserstandserhöhung bewirkt haben.

Offenbar wird zudem der Zeitverzug in den Antriebsdaten nicht in den Modellausgaben des COSMO-CLM umgesetzt, wie Abb. 6 zeigt. Selbst ein versuchsweise eingeführtes direktes Konstanthalten der Antriebsdaten für eine Stunde (rote Linie in Abb. 6) führt zu keiner beobachtbaren Verzögerung des zeitlichen Ablaufs (vgl. rote Linie in Abb. 6 mit der dicken schwarzen Linie, die aus der unverzögerten Simulation stammt). Auch die Wirksamkeit des Spectral Nudging bis zum Boden führte nicht zur beabsichtigten Verzögerung. Erst in Kom-

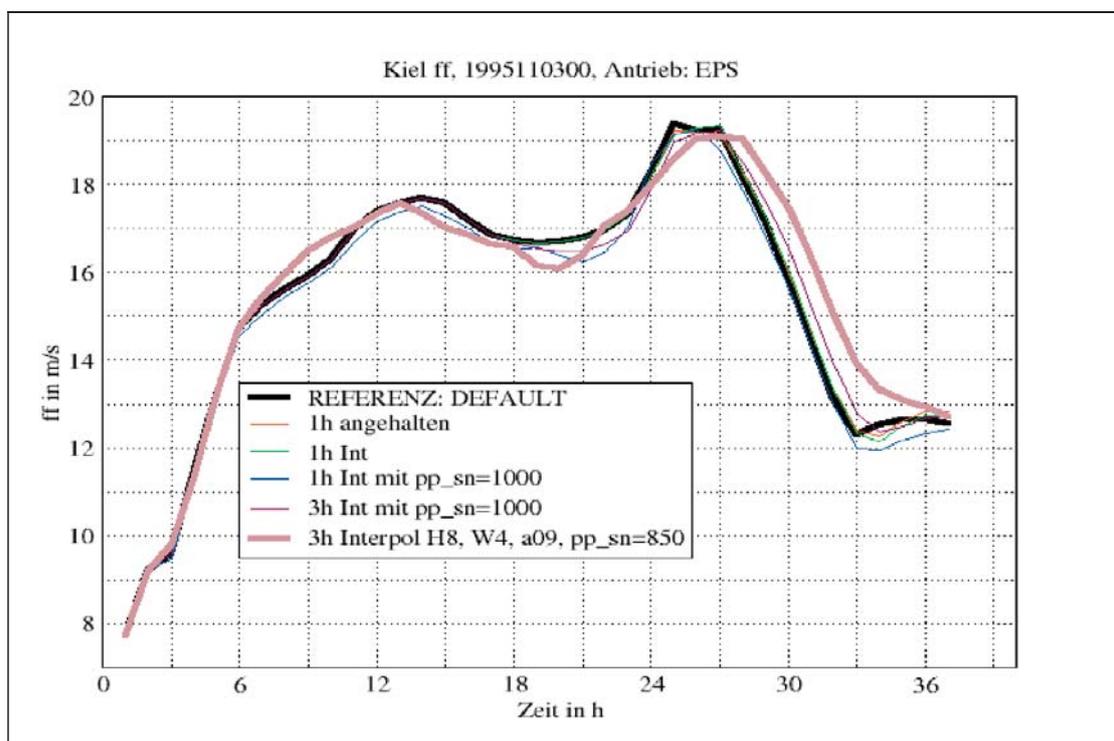


Abb. 6: Zeitreihe der simulierten Windgeschwindigkeit (ff) am Gitterpunkt „Kieler Bucht“ des COSMO-CLM. Antriebsdaten: Extremer EPS-Member für Sturmflut am 3.11.1995. Dicke schwarze Linie: zeitlicher Verlauf für den Fall der Verwendung von unveränderten Antriebsdaten, zudem COSMO-CLM-Lauf mit Standardeinstellung des Spectral Nudging; rote Linie: COSMO-CLM-Lauf mit Standardeinstellung des Spectral Nudging, Antriebsdaten für eine Stunde konstant gehalten, danach um eine Stunde versetzt in das COSMO-CLM eingelesen; grüne Linie: COSMO-CLM-Lauf mit Standardeinstellung des Spectral Nudgings, Antriebsdaten zeitlich gestreckt (um eine Stunde) linear interpoliert in das COSMO-CLM eingelesen; blaue Linie: COSMO-CLM-Lauf mit Standardeinstellung des Spectral Nudgings, jedoch mit Wirksamkeit bis in das bodennahe 1000 hPa Luftdruckniveau ( $pp\_sn=1000$ ), Antriebsdaten zeitlich gestreckt (um eine Stunde) linear interpoliert in das COSMO-CLM eingelesen; violette Linie: COSMO-CLM-Lauf mit Standardeinstellung des Spectral Nudgings, jedoch mit Wirksamkeit bis in das bodennahe 1000 hPa Luftdruckniveau ( $pp\_sn=1000$ ), Antriebsdaten zeitlich gestreckt (um drei Stunden) linear interpoliert in das COSMO-CLM eingelesen; dicke braune Linie: COSMO-CLM-Lauf mit strengem Spectral Nudging, mit H8 als Höhenabhängigkeit des Nudgings gemäß Abb. 2, W4 verweist auf die Übernahme der 4 größten Wellenzahlen, a09 auf eine Gewichtung von 0,9,  $pp\_sn=850$  auf eine Beschränkung des Spectral Nudgings auf die Modellniveaus oberhalb des 850 hPa Druckniveaus (ca. 1,5 km), Antriebsdaten zeitlich gestreckt (um drei Stunden) linear interpoliert in das COSMO-CLM eingelesen

bination mit einem um 3 Stunden gestreckten Antriebsdatensatz kommt es nach einem Simulationszeitraum von etwa 18 Stunden zu einer Verzögerung im Bereich von ca. 30 Minuten (violette Linie in Abb. 6). Bei einem zusätzlich deutlich stärkeren Eingriff in die Autonomie der Berechnung im Inneren des Modellgebiets (durch ein stärkeres Spectral Nudging) kommen von den 3 Stunden Streckung in den Antriebsdaten nach etwa 27 Stunden Simulationszeitraum ca. 1 Stunde als Signal im bodennahen Wind an. Abb. 6 zeigt dies beispielhaft für ein Spectral Nudging, das weiterhin auf großskalige Phänomene beschränkt bleibt (Wellenzahl 4), aber das Spectral Nudging oberhalb von 850 hPa deutlich stärker gewichtet (anderer Verlauf der Höhenabhängigkeit und maximaler Gewichtungsfaktor von 0,9 anstelle von 0,05).

Es bleibt die geringe Veränderung des zeitlichen Ablaufs des Wettergeschehens. Es zeigt sich insbesondere, dass das Spectral Nudging vor allem am Oberrand des COSMO-CLM zu einer Übernahme der aus den Antriebsdaten generierten Verzögerung führt. So wird bei jener COSMO-CLM-Simulation (H8, W4,  $\alpha = 0,9$ ,  $pp\_sn = 850$  hPa, vgl. Abb. 7) am Oberrand der Atmosphäre der volle Zeitversatz aus den Antriebsdaten angenommen. In einer Reihe von Sensitivitätsexperimenten wurde herausgefunden, dass nur bei voller Strenge des Spectral Nudgings für den Horizontalwind (d.h. komplettes Ersetzen der im COSMO-CLM berechneten Horizontalwindkomponenten durch die entsprechend interpolierten Horizontalwindkomponenten des Antriebs) die zeitliche Modifikation des Windfeldes auch am Boden im COSMO-CLM jenem der Antriebsdaten entspricht. Diesen Fall zeigt die blaue Linie in Abb. 7. Dies stellt einen nicht mehr tolerierbaren Eingriff in die Physik des Simulationsablaufs im COSMO-CLM dar. Insbesondere stehen das ohne Spectral Nudging gerechnete Luftdruckfeld und die Windfelder nicht mehr im Gleichgewicht, was zu einem völlig unrealistischen Bodenluftdruckfeld führt (vgl. Abb. 8).

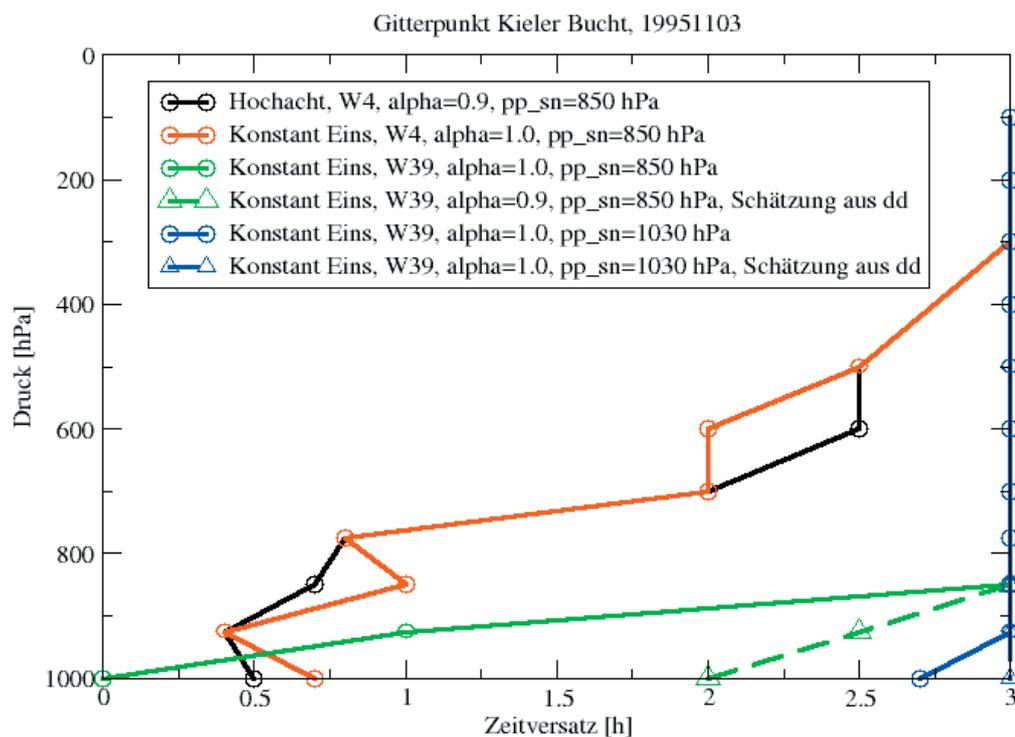


Abb. 7: Höhenabhängigkeit der zeitlichen Streckung der COSMO-CLM-Simulation bei einem um 3 Stunden gestreckten Antriebsdatensatz aus einem extremen EPS-Member. Spectral Nudging wirkt auf den Horizontalwind

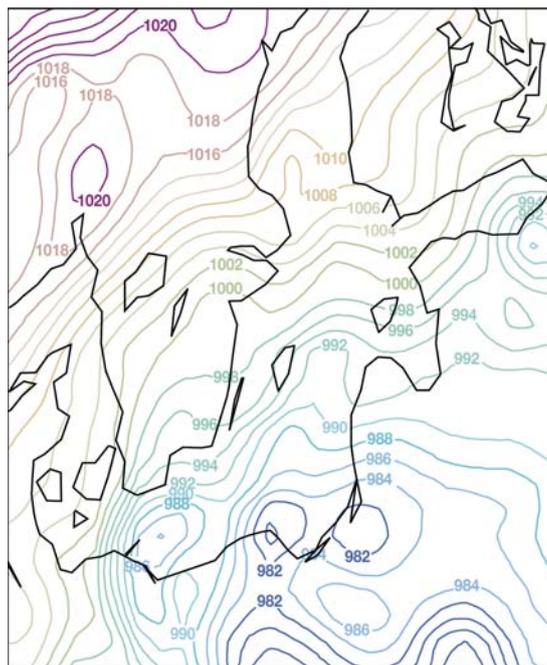


Abb. 8: Bodennahes Luftdruckfeld im untersten Modelllevel des COSMO-CLM bei maximalem Spectral Nudging des Horizontalwindes

Aus diesem Grund wurde der Ansatz gewählt, das Spectral Nudging statt über den Horizontalwind über die dreidimensionale Druck- und damit die dreidimensionale Massenverteilung durchzuführen. Hierbei wird dem Modell zu einem zu spezifizierenden Anteil explizit die 3D-Massenverteilung der Antriebsdaten vorgegeben. Aus Gründen der physikalischen Konsistenz wurde gleichzeitig auch das 3D-Temperaturfeld dem Spectral Nudging unterzogen. Anderenfalls hätte sich ein Widerspruch zum Aufbau der synoptisch-skaligen Druckgebilde ergeben. Beispielsweise bestimmt die Lage der Fronten die Lage des warmen bzw. kalten Sektors bei einem Tiefdruckgebiet. In Hochdruckgebieten erwärmt sich die Luft der freien Atmosphäre adiabatisch durch Absinken.

### 3.11.1995: Simulation mit dem COSMO-CLM und Nudging in PP (Druck) und T (Temperatur)

Es wurden drei verschiedene Simulationsläufe mit dem COSMO-CLM durchgeführt: Ein Lauf ohne Spectral Nudging, ein Lauf mit maximalem Nudging des Horizontalwindes in allen Modellschichten und ein Lauf mit maximalem Spectral Nudging der Temperatur und des Luftdrucks in allen Modellschichten (vgl. Abb 9). Es entstehen beim Nudging mit PP und T keine vergleichbar unbalancierten Felder wie im Falle des maximalen Nudgings für den Horizontalwind. Damit erweist sich das Nudging in PP und T als geeigneter als das des Horizontalwindes. Nachdem sich das Spectral Nudging über den Luftdruck und die Temperatur als – im Falle eines sehr starken Nudgings – geeignet gezeigt hat, wurde sukzessive die Strenge des Spektral Nudgings reduziert.

Im Falle des Nudgings über PP und T genügt bereits die Einschränkung auf das „Nudgen“ sehr großskaliger Druck- und Temperaturgebilde, um das COSMO-CLM zur Annahme der durch die Antriebsdaten aufgeprägten zeitlichen Verzögerung zu zwingen. Dazu muss noch nicht einmal mit maximaler Strenge „genudged“ werden, wie der Gewichtungsfaktor  $\eta$  mit Werten unter 1 zeigt (Abb. 10).

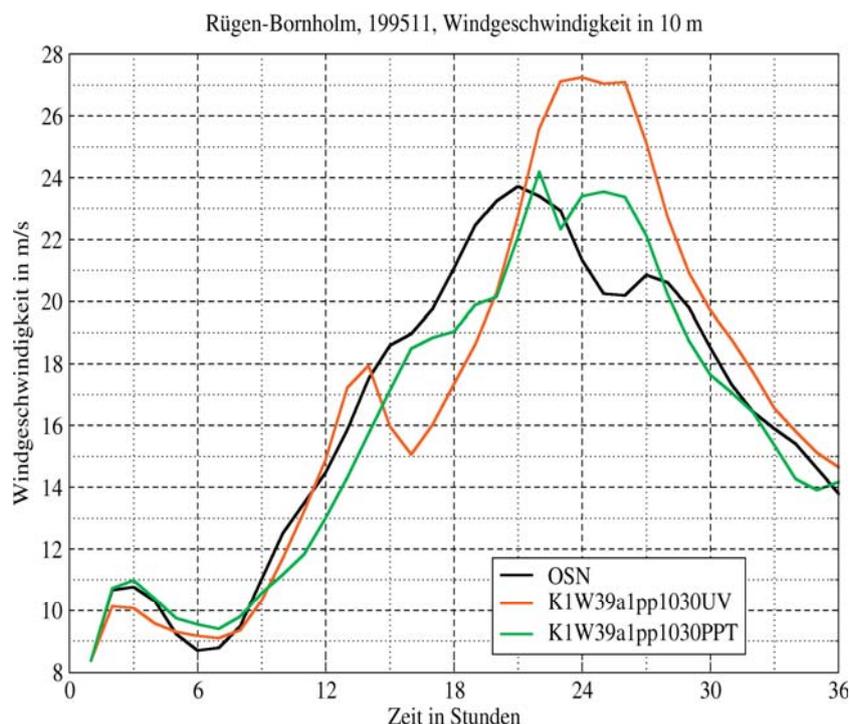


Abb. 9: Zeitreihe der Windgeschwindigkeit am Wassergitterpunkt zwischen Rügen und Bornholm. Simulation mit dem COSMO-CLM, ohne Spectral Nudging (OSN – schwarze Linie), maximales Spectral Nudging des Horizontalwindes (rote Linie), maximales Spectral Nudging des Luftdrucks und der Temperatur (grüne Linie)

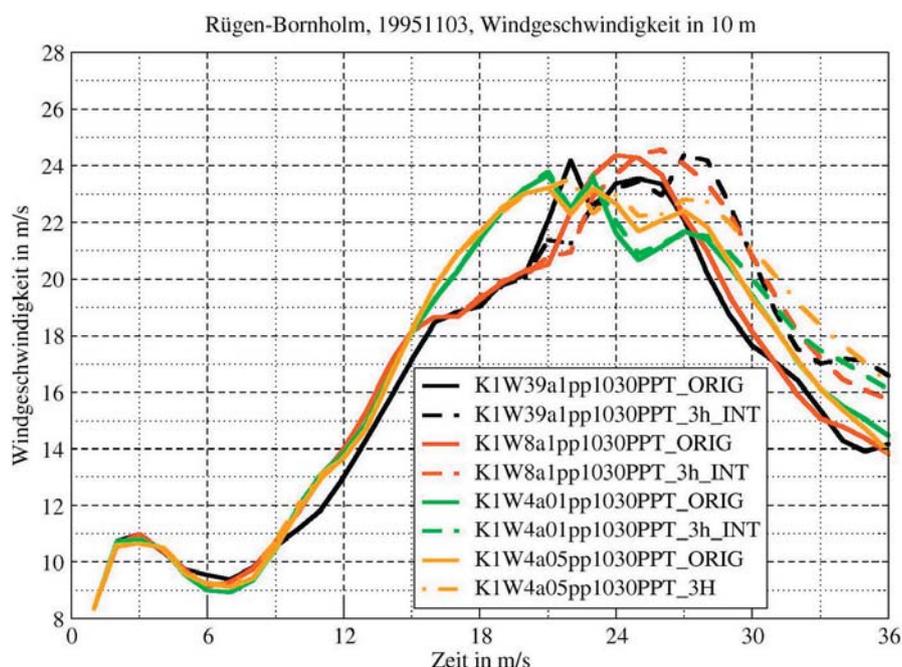


Abb. 10: Zeitreihe der Windgeschwindigkeit am Wassergitterpunkt zwischen Rügen und Bornholm. Simulation mit dem COSMO-CLM, jeweils mit Spectral Nudging des Luftdrucks und der Temperatur. In der Legende bedeuten die Kürzel Folgendes: K1: „Konstant Eins“ (Spectral Nudging nicht höhenabhängig, insbesondere keine abnehmende Gewichtung in Richtung Erdboden); W39 bzw. W8 oder W4: Anzahl der Wellenzahlen, die per Nudging aus dem Antriebsdatensatz übernommen werden (W4: nur

große Wellen, W39 fast alle Wellen, somit die fast gesamte Information aus dem Antriebsdatensatz); a1 bzw. a05 oder a01: a steht für  $\alpha$  und gibt dabei den Gewichtungsfaktor für die Übernahme der Antriebsdaten in die Modellausgabe an (a1:  $\alpha = 1$ , a05:  $\alpha = 0,5$ , a01:  $\alpha = 0,1$ ); pp1030: das Spectral Nudging ist wirksam bis hinunter zum 1030 hPa-Niveau, faktisch also bis zum unteren Modellrand; PPT: das Nudging erfolgte in Druck (PP) und Temperatur (T); ORIG bzw. 3h\_INT gibt an, ob das COSMO-CLM mit dem originalen Datensatz angetrieben wurde oder mit einem, in dem der zeitliche Ablauf um drei Stunden gestreckt wurde

### 27.1.2005: Simulation mit dem COSMO-CLM und Spectral Nudging in Druck (PP) und Temperatur (T)

In diesem Experiment wurde das COSMO-CLM erneut mit einem extremen EPS-Member angetrieben. Dieses Mal zur Sturmflutsituation am 27.1.2005. Abb. 11 zeigt die Luftdruck und Windsituation zum Höhepunkt des Sturms in der COSMO-CLM-Simulation. Um ein deutlicheres Signal in den Wasserstandsänderungen in den COSMO-CLM-Simulationen beobachten zu können, wurde in diesem Experiment mit einer zeitlichen Streckung der Antriebsdaten von 6 Stunden gearbeitet. Damit wird eine Sturmsituation von 12 auf 18 Stunden gestreckt. Beginn der Streckung: 27.1.2005, 09 UTC, Ende: 27.1.2005, 21 UTC. Damit wird das Ende der gestreckten Zeit nach der Streckung zu 28.1.2005, 03 UTC.

Abb. 12 zeigt den zeitlichen Verlauf der Windgeschwindigkeit und -richtung über der südlichen Ostsee zum Zeitraum des Höhepunktes des Sturms. Bei einer Wellenzahl von 8 im Spectral Nudging wird bereits ab einer Gewichtung von 0,1 eine deutliche Verlangsamung in der COSMO-CLM-Simulation übernommen (noch ca. 5 Stunden Streckung). Mit jener

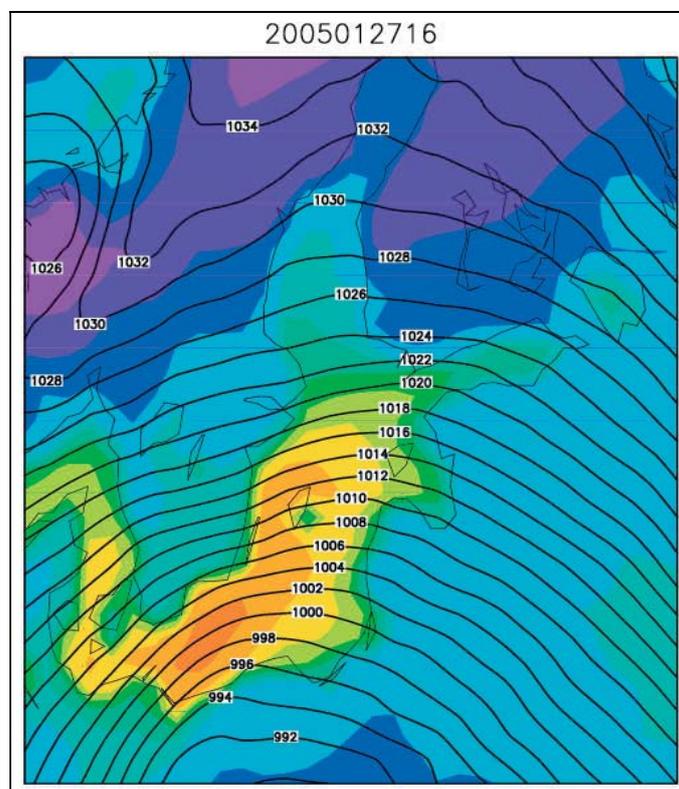


Abb. 11: COSMO-CLM-Simulation einer Sturmflutsituation an der deutschen Ostseeküste. Antriebsdatensatz: Extremer Member der EPS-Simulation zur Sturmflut am 27.1.2005

oben beschriebenen Spectral-Nudging-Variante (grüne Linie in Abb. 12) wurde das BSH-Modell angetrieben. Auffällig ist vor allem die längere Andauer von Wasserständen von über 1,50 m über NN. Ebenso zeigt sich, dass mithilfe des COSMO-CLM mit manipulierten Antriebsdaten ein atmosphärisches Feld erzeugt werden kann, welches entlang der deutschen Ostseeküste zu höheren Scheitelwasserständen führt.

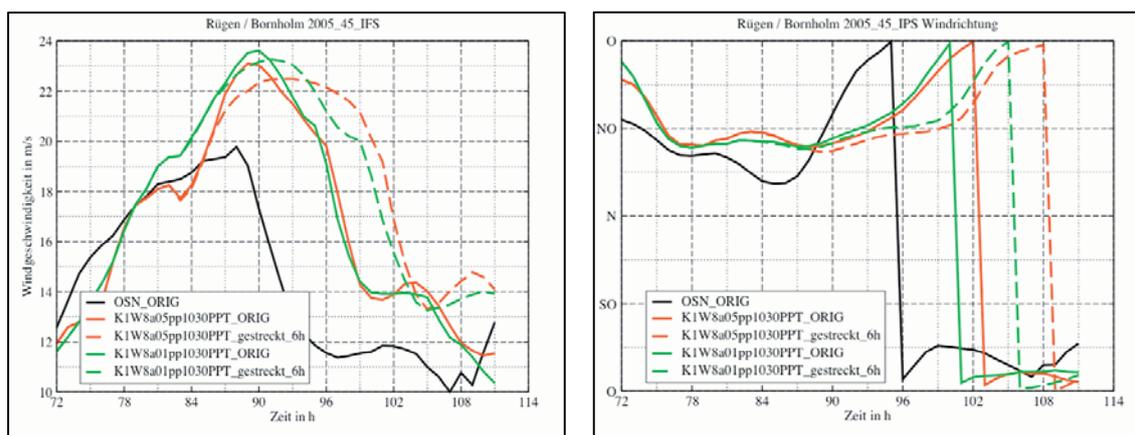


Abb. 12: Windgeschwindigkeit und -richtung aus der COSMO-CLM-Simulation einer Sturmflut-situation an der deutschen Ostseeküste. Antriebsdatensatz: Extremes Mitglied der EPS-Simulation zur Sturmflut am 27.1.2005. Schwarze Linie: Simulation ohne Spectral Nudging; rote Linie: Spectral Nudging mit Luftdruck und Temperatur mit Wellenzahl 8, Gewichtung 0,5; grüne Linie: Spectral Nudging mit Luftdruck und Temperatur mit Wellenzahl 8, Gewichtung 0,1; gestrichelt (rot und grün): Antriebsdaten aus dem EPS um 6 Stunden gestreckt in das COSMO-CLM eingelesen

Der zeitliche Verlauf des Wasserstands in Wismar ist in Abb. 13 dargestellt. Auffällig ist vor allem die längere Dauer von Wasserständen von über 1,50 m NN (5 h länger und damit vergleichbar verlängert wie das Sturmereignis selbst [vgl. Abb. 12]). Ebenso zeigt sich, dass das COSMO-CLM mit manipulierten Antriebsdaten entlang der deutschen Ostseeküste zu etwa 5–10 cm höheren Scheitelwasserständen führt.

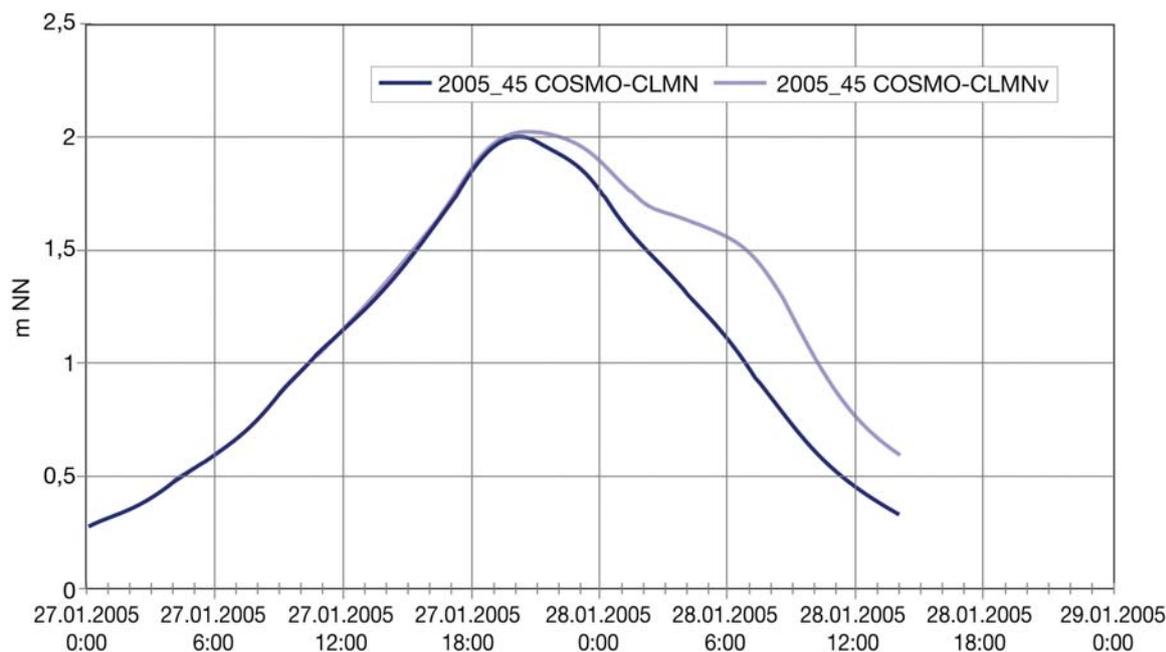


Abb. 13: Zeitlicher Verlauf des simulierten Wasserstands am Pegel Wismar. Blaue Linie: Wasserstandsmodell angetrieben mit COSMO-CLM unmodifiziert; rote Linie: Wasserstandsmodell angetrieben mit COSMO-CLM mit seinerseits verlangsamten Antrieb (analog zu den grünen Linien aus Abb. 12). Wasserstandsrechnung und Erstellung der Abbildung: BORK (2008)

#### 4. Zusammenfassung und Fazit

Mit dem regionalen Atmosphärenmodell COSMO-CLM wurden sturmflutrelevante Wetterlagen simuliert. Dabei zeigte sich der Nutzen der sogenannten Spectral-Nudging-Technik darin, dass in extremen Sturmflutwetterlagen die großskalige Zirkulation, insbesondere die Lage der sturmfluterzeugenden Tiefdruckgebiete, besser wiedergegeben werden konnte als in Simulationen ohne Spectral Nudging. Der Charakter der realen Wetterlage (falls der Antrieb des Modells mit Reanalysedaten erfolgte) blieb erhalten.

Der Versuch, die mit dem COSMO-CLM simulierte Sturmtiefzuggeschwindigkeit aus den Antriebsdaten zu variieren, scheiterte zunächst. Das Scheitern legt den Schluss nahe, dass eine Realisation einer ausgeprägten Sturmflutsituation durch leichte Änderungen nicht wesentlich geändert wird, sich sozusagen robust gegenüber Störungen verhält, die es im normalen unveränderten Ablauf der unmanipulierten Realisation nicht hatte geben können. Nach Abkehr des Spectral Nudgings vom Horizontalwind und der alternativen Verwendung des Luftdrucks und der Temperatur zum Spectral Nudging gelang die gewünschte Manipulation. Aus den Versuchen mit dem COSMO-CLM mit Spectral Nudging des Luftdrucks und der Temperatur konnten folgende Schlüsse gezogen werden:

Bei gleichem Luftdruckgradienten und damit gleichem geostrophischen Wind simuliert das COSMO-CLM über Wasser eine niedrigere bodennahe (10 m Höhe) Windgeschwindigkeit als das EPS des ECMWF. Eine unter sonst gleichen Bedingungen verlangsamte Verlagerung eines sturmfluterzeugenden Sturmtiefs bewirkt eine deutlich längere Verweilzeit eines stark erhöhten Wasserstands. Sturmflutscitellhöhen haben sich um etwa 5–10 cm erhöht.

## 5. D a n k s a g u n g

Die Autoren bedanken sich für die konstruktiven Vorschläge aus den Reihen der Gutachtergruppe im Projekt MUSTOK und der anderen Projektmitarbeiter. An dieser Stelle sei besonders herzlicher Dank an Frau I. Bork ausgesprochen, welche am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) die Wasserstandssimulationen für die vorliegende Studie durchgeführt hatte. Diese Studie wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Förderkennziffer BMBF 03KIS052 / KFKI 84 durchgeführt.

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

- BORK, I.: Persönliche Mitteilung, 2007.  
 BORK, I.: Persönliche Mitteilung, 2008.  
 DOMS, G.; FÖRSTNER, J.; HEISE, E.; HERZOG, H.-J.; RASCHENDORFER, M.; SCHRODIN, R.; REINHARDT, T. u. VOGEL, G.: The nonhydrostatic limited-area model LM (Lokal-Modell) of DWD. Part II: Physical Parameterizations. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 146 S., 2006a.  
 DOMS, G.; SCHÄTTLER, U. u. SCHRAFF, C.: The nonhydrostatic limited-area model LM (Lokal-Modell) of DWD. Part VII: User's guide. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 132 S., 2006b.  
 KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN (Hrsg.): Die Wasserstände an der Ostseeküste. Entwicklung – Sturmfluten – Klimawandel. Die Küste, Heft 66 (Sonderheft), 331 S., 2003.  
 MEINKE, I.: Sturmfluten in der südwestlichen Ostsee – dargestellt am Beispiel des Pegels Warnemünde. Marburger Geographische Schriften, 134, 1–23, 1999.  
 SCHMITZ, R.: Modellierung von historisch aufgetretenen Sturmereignissen über der Ostsee mithilfe von Vorhersagen eines Ensemblesystems und eines Regionalmodells, Die Küste, Heft 75, 2009.  
 STORCH, H. VON; LANGENBERG, H. and FESER, F.: A Spectral Nudging technique for dynamical downscaling purpose. Mon. Wea. Rev. 128, 3664–3673, 2000.  
 WALDRON, K. M.; PEAGLE, J. and HOREL, J. D.: Sensitivity of a spectrally filtered and nudged limited area model to outer model options. Mon. Wea. Rev., 124, 529–547, 1996.