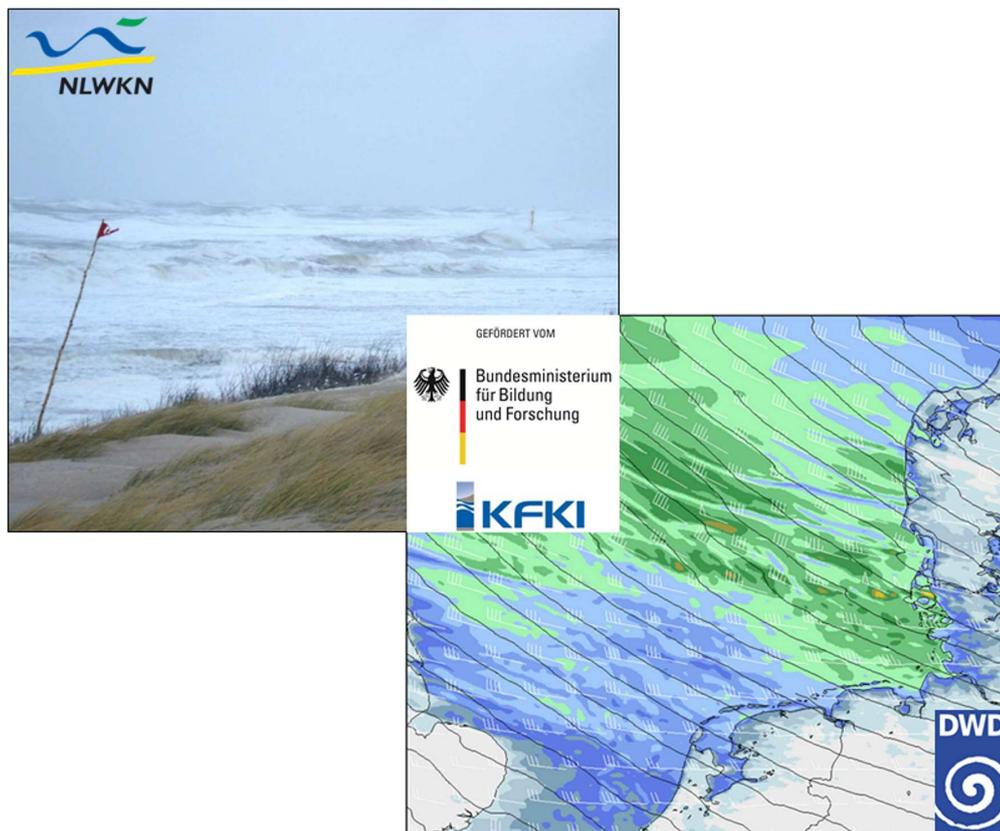


## Schlussbericht

# OptempS-MohoWif

Optimierung empirischer Sturmflutvorhersagen und  
Modellierung hoch auflösender Windfelder

Teilprojekt B: Modellierung hoch auflösender Windfelder an der deutschen Nordseeküste



Autoren: Benedict Brecht und Dr. Helmut Frank

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Förderkennzeichen des BMBF: 03KIS098

Laufzeit des Vorhabens: 2011 – 2014

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren  
Offenbach, den 21. Oktober 2014

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1	Aufgabenstellung . . . . .	2
1.2	Voraussetzungen . . . . .	2
1.3	Planung und Durchführung . . . . .	2
1.4	Stand der Forschung . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1	Reanalysen . . . . .	6
2.2	Die Modellkette des DWD . . . . .	6
2.3	Simulationsmethodik . . . . .	10
2.3.1	Nudging . . . . .	13
2.3.2	Datenverfügbarkeit Nudging . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Verifikation der Ergebnisse</b>	<b>18</b>
3.1	Hamburg-Sturmflut, 1962 . . . . .	19
3.2	Betrachtung von Sturm Tilo, 2007 . . . . .	21
3.3	Allgemeine Ergebnisse . . . . .	24
3.4	Untersuchung der Unterschiede des mittleren Fehlers von COSMO-eu und COSMO-de im 10m-Wind . . . . .	28
3.5	Untersuchung der Nudging-Simulationen älterer Stürme . . . . .	30
3.6	Sturmzugbahnen . . . . .	31
3.7	Sturm Index . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Sensitivitätsuntersuchungen</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>41</b>
5.1	Datensatz . . . . .	42
5.2	Veröffentlichungen . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Anhang A - Verzeichnisstruktur der Daten</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>Anhang B - Abbildungen</b>	<b>46</b>
	<b>Literatur</b>	<b>62</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war die Erstellung eines Kataloges von 30 bis 40 zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Vorhersagen von Sturmzyklonen, die in den Jahren 1960 bis 2011 zu Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste geführt hatten. Die numerischen Simulationen sollten bestmöglich die zeitliche Entwicklung des bodennahen Windfeldes und die Zugbahn und Intensität der Sturmzyklonen bereitstellen. Diese Windfelder dienen zur Kalibrierung als meteorologische Eingangsdaten eines neuen Wasserstandsvorhersagemodells des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN).

## 1.2 Voraussetzungen

Voraussetzung zur Durchführung der hochaufgelösten Simulationen war ein leistungsfähiger Großrechner, ein Archiv zur Speicherung der großen Datenmengen und entsprechende Modelle zur Vorhersage der meteorologischen Felder, sowie historische Anfangsdaten auf denen die Simulationen aufbauen. Die Vorhersagen wurden auf dem Großrechner des Europäischen Zentrums für Mittelfristvorhersage (EZMW) in Reading gerechnet und die Daten in dessen Benutzerarchiv ECFS abgelegt. Die Wettervorhersagemodelle des Deutschen Wetterdienstes (DWD), bestehend aus dem Globalmodell GME und dem Regionalmodell COSMO (Consortium for Small Scale Modelling; Europamodell COSMO-EU und hochaufgelöstes Deutschlandmodell COSMO-DE), sind auch auf dem Großrechner des EZMW installiert. Als Anfangsdaten der Modellrechnungen dienten die Reanalysen des EZMW, ERA-40 (verfügbar von 1958 bis 2011) und die höher auflösende ERA-Interim (verfügbar von 1979 bis 2011).

## 1.3 Planung und Durchführung

Der Arbeitsplan gliederte sich in drei Abschnitte. Zuerst sollten die Simulationen der vom NLWKN ausgewählten Stürme mit der Modellkette des DWD (GME, COSMO-EU und COSMO-DE) auf der Grundlage der EZMW-Reanalysen gerechnet werden. Nach Abschluss dieser Arbeiten sollten alle Ereignisse zusätzlich in den COSMO-Modellen unter Hinführung der Vorhersagen an die zur Verfügung stehenden Beobachtungen (Observational Nudging) wiederholt gerechnet werden. Damit wurde eine weitere Verbesserung der Vorhersagequalität der simulierten Windfelder erwartet. Danach sollten die Modellergebnisse mit Beobachtungen verifiziert werden und Sensitivitätsuntersuchungen bezüglich der Turbulenzparametrisierung, vor allem der Parametrisierung des Impulsflusses an der Ozeanoberfläche, durchgeführt werden.

Die Übergabe der Daten an das NLWKN sollte im neuen GRIB2-Format stattfinden (dies

wurde operationell Mitte 2014 beim DWD eingeführt), damit der NLWKN die operationellen Produkte des DWD in Zukunft ohne weiteren Arbeitsaufwand übernehmen kann. Der NLWKN benötigte für die Berechnungen des Wasserstandes folgende meteorologische Felder aus den Vorhersagen: den auf Meereshöhe reduzierten Druck (PMSL), den Horizontalwind in 10m Höhe (U\_10m und V\_10m) und die Bodenrauigkeitslänge  $z_0$  der Oberfläche, die über Wasser von der Windgeschwindigkeit abhängt.

Die Ergebnisse sollten auf einer Fachveranstaltung, vornehmlich zunächst auf dem Seminar zur Küstenforschung des Kuratoriums für Küsteningenieurwesen (KFKI) vorgestellt werden und in anerkannten wissenschaftlichen Fachzeitschriften publiziert werden. Zuletzt sollte ein Projektbericht geschrieben werden, sowie eine gemeinsame Veröffentlichung mit dem NLWKN in der Fachzeitschrift "Die Küste" stattfinden.

Der NLWKN erstellte einen Katalog mit 39 Sturmflutereignissen anhand von Wasserstandsmessungen am Pegel Norderney (siehe Tabelle 1). Die Auswahl der Stürme erfolgte nach folgenden Kriterien. Zuerst wurden alle Ereignisse zwischen 1960 und 2011, die einen Stau größer gleich 2m verursachten in den Katalog aufgenommen. Danach wurden, auf Grund einer höheren Messdatenbasis, zeitlich aktuellere Ereignisse bevorzugt und zuletzt eine Sommersturmflut in den Katalog mit hinein genommen. Die Stürme wurden vom DWD mit dem GME (Maschenweite 30 km, 60 vertikale Schichten), COSMO-eu (7 km, 40 Schichten) und COSMO-de (2,2 km, 65 Schichten) simuliert. Als Anfangsfelder für das GME wurden bis 1979 die ERA-40 und ab 1979 die ERA-Interim Reanalysen verwendet. Es wurde, ausgehend von vier Reanalysezeitpunkten am Tag (00, 06, 12 und 18 UTC), jeweils eine 18-stündige Vorhersage gestartet, daraus 6-stündige Abschnitte herausgeschnitten und zu einer durchgehenden Zeitreihe über einen ganzen Sturm aneinander gehängt. Danach wurden zusätzlich die COSMO-Modelle im Nudging-Modus gerechnet, das heißt unter Miteinbeziehung der im Archiv des DWD zur Verfügung stehenden Beobachtungsdaten. Zur Verifizierung der Modellergebnisse wurden alle beim DWD im Archiv verfügbaren Beobachtungen an der dänischen, deutschen und niederländischen Nordseeküste oder Stationen in der Nordsee hinzugezogen und die Standardabweichung (Root Mean Square Error, RMSE) und der mittlere Fehler (systematischer Fehler, bias) zwischen den Modelldaten und Beobachtungen gebildet. Außerdem wurden Beobachtungsdaten der Station Scharhörn hinzugezogen, die nicht aus dem Archiv des DWD stammen, sondern von der Hamburg Port Authority (HPA) zur Verfügung gestellt wurden. Es wurde die Zugbahn jeden Sturmes dargestellt und ein Sturmindex konzipiert, der Hinweise auf die Stärke eines Sturmes geben könnte. Außerdem wurden die Sensitivitätsuntersuchungen des Windfeldes in Abhängigkeit von der Turbulenzparametrisierung vorgenommen, in dem einige Parameter im Turbulenzschema des COSMO-Modells verändert wurden.

## 1.4 Stand der Forschung

Numerische Wettervorhersagemodelle (NWV-Modelle) beruhen auf einer mathematisch-physikalischen Beschreibung der Atmosphäre und der in ihr ablaufenden Prozesse wie Strahlung, Turbulenz, Wolken- und Niederschlagsbildung. Basierend auf einem durch Beobachtungen gestützten Anfangszustand (Datenassimilation) können NWV-Modelle die Dynamik einer Sturmentwicklung und -verlagerung in guter Näherung mehrere Tage im Voraus beschreiben. Die Vorhersagegüte der NWV-Modelle hängt von mehreren Parametern ab, vor allem von der Qualität des Anfangszustandes, der Detailliertheit der physikalischen Prozesse, der Genauigkeit der numerischen Lösungsverfahren und der räumlichen Auflösung (horizontale Maschenweite und Anzahl der vertikalen Schichten) des Modells.

Der DWD hat sich in den letzten Jahren an drei größeren Forschungsprojekten mit den operationellen NWV-Modellen zur Simulation extremer Stürme beteiligt. Die Projekte MUSE (Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit, 2002 bis 2005) und MUSTOK (Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste, 2005 bis 2008), sowie ein Projekt zur Verbesserung der Grundlagen für den Sturmflutvorhersagedienst im Emsästuar 2006. Hierbei beauftragte der NLWKN den DWD, Windfelder 22 historischer Stürme (siehe Tabelle 1, grau hinterlegte Ereignisse) von 1962 bis 2002 entlang der niedersächsischen Nordseeküste in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zur Verfügung zu stellen. Dazu verwendete der DWD seine damalige Modellkette GME, COSMO-Q und COSMO-DE, um ausgehend von der Reanalyse ERA-40 des EZMW, hoch aufgelöste Windfelder mit einer Maschenweite von 2,8 km über der Nordsee und norddeutschen Küste zu berechnen. Um möglichst gute Vorhersagen des bodennahen Windfeldes zu erhalten wurde jede Periode, die typischerweise zwei bis drei Tage dauerte, durch eine Kette von 12-stündigen Vorhersagen abgedeckt. Die Vorhersagen wurden jeweils von den ERA-40 Reanalysen für 00 und 12 UTC gestartet. Die Reanalysen wurden als Anfangswerte auf das Gitter des operationellen Globalmodells GME mit einer Maschenweite von 40 km und 40 Schichten interpoliert. GME stellte die Anfangs- und Randwerte für das Regionalmodell COSMO-Q bereit, was mit 333x333 Gitterpunkten einem Ausschnitt des heutigen Regionalmodells COSMO-EU entspricht. COSMO-Q lieferte wiederum die Anfangs- und Randwerte für das hoch auflösende Regionalmodell COSMO-DE (Frank & Majewski, 2006).

Um die Vorhersagen zu erweitern und zu verbessern wurde hier die Anzahl der zu simulierenden Sturmflutereignisse von 22 auf 39 erweitert und deren Dauer auf 4-5 Tage durch eine längere Vorlaufzeit erhöht. Um die besten bodennahen Windfelder zu erhalten wurde die Frequenz von zwei 12-stündigen Vorhersagen pro Tag auf vier 6-stündige Vorhersagen mit den Anfangszeiten um jeweils 00, 06, 12 und 18 UTC erhöht. Die Vorhersagen für die Stürme ab 1979 wurden mit den neueren ERAInterim- anstatt den zuvor benutzten ERA40 Reanalysen gestartet. Die horizontale Maschenweite des GME wurde auf 30 km verringert und

dessen Schichtenanzahl auf 60 erhöht. Das vom GME angetriebene COSMO-Q wurde durch das COSMO-eu (COSMO-EU, abgeschnitten im Osten und Süden) ersetzt und COSMO-DE lief als COSMO-de mit geringerer Maschenweite, horizontal erweitert nach Süden, Westen und Norden sowie höherer vertikaler Auflösung.

## 2 Grundlagen

Im folgenden wird der Datensatz zur Berechnung der Sturmflutereignisse gezeigt, die Reanalysen des EZMW und die Modellkette des DWD genauer beschrieben, sowie die Methoden zur Simulation der Stürme dargestellt.

Der vom NLWKN zusammengestellte Katalog (siehe Tabelle 1) umfasst Sturmflutereignisse der Jahre 1962 bis 2011. Angefangen mit der Hamburg-Sturmflut 1962 sind alle Ereignisse dieses Zeitraums dabei, die am Pegel Norderney einen Windstau von mindestens 2m verursachten. Des weiteren wurden einige aktuellere Fälle und eine Sommersturmflut (August 1990) ausgewählt, da diese nur selten auftreten.

### 2.1 Reanalysen

Als Anfangsdaten zur Berechnung der Stürme dienten die Reanalysen des EZMW. Die ERA-40 Reanalyse (Uppala *et al.* , 2005) überdeckt die Periode von Mitte 1957 bis 2001, die höher auflösende ERAInterim Reanalyse (Dee *et al.* , 2011) reicht von 1979 bis heute, so dass die ERAInterim-Reanalyse für Ereignisse von 1979 bis 2011 und die ERA-40 Reanalyse für Stürme bis 1979 verwendet wurde.

Für die ERA-40 Reanalyse wurde das Spektralmodell IFS des EZMW mit der horizontalen Auflösung T159 (vergleichbar mit 125 km Maschenweite auf einem reduzierten Gausschen Gitter) verwendet. Als Datenassimilationsschema wurde eine dreidimensionale variationelle Analyse (3D-Var) mit einem 6-stündigen Assimilationszyklus verwendet. Vertikal besitzt die ERA-40 Reanalyse 60 Schichten mit dem Oberrand bei 0,1 hPa (Uppala *et al.* , 2005).

Die ERA-Interim Reanalyse hat eine höhere horizontale Auflösung (Spektralmodell mit der Auflösung T255, entspricht einer Maschenweite von circa 79 km auf einem reduzierten Gausschen Gitter) und besitzt eine 12-stündige vierdimensionale variationelle Analyse (4D-Var), die alle Beobachtungen innerhalb eines 12-stündigen Fensters zur tatsächlichen Beobachtungszeit nutzt. Die Schichteneinteilung sind die gleichen geblieben wie bei der ERA-40 Reanalyse (Dee *et al.* , 2011).

### 2.2 Die Modellkette des DWD

Die Modellkette des DWD besteht aus dem Globalmodell GME (Majewski *et al.* , 2002) und dem Ausschnittsmodell COSMO (Doms *et al.* , 2014), aufgeteilt in das Europamodell COSMO-EU und das Deutschlandmodell COSMO-DE.

Das Globalmodell GME ist ein hydrostatisches Modell, basierend auf einer ikosaedrisch-hexagonalen Gitterstruktur, wodurch das Polproblem (Konvergenz der Meridiane bei Annäherung an den Pol) umgangen wird. Das GME wurde am 1. Dezember 1999 eingeführt und war der Nachfolger des Globalmodells GM. Nach anfangs 60 km mittlerer horizontaler Ma-

Nr	Start	Max. Wasserstand	Ende	max. THW/cm	Stau/cm
1	1962-02-14	1962-02-16 20:10	1962-02-17	906	297
2	1966-11-28	1966-11-30 23:47	1966-12-01	815	206
3	1967-02-21	1967-02-23 21:10	1967-02-24	837	228
4	1967-02-26	1967-02-01 01:03	1967-03-01	815	206
5	1973-11-10	1973-11-19 17:03	1973-11-20	863	255
6	1973-12-04	1973-12-06 19:04	1973-12-07	849	241
7	1973-12-11	1973-12-14 00:03	1973-12-14	843	235
8	1976-01-01	1976-01-03 11:59	1976-01-04	886	275
9	1976-01-18	1976-01-21 00:40	1976-01-22	886	275
10	1977-12-28	1977-12-31 00:16	1977-12-31	862	248
11	1981-11-21	1981-11-24 08:10	1981-11-25	855	237
12	1983-01-30	1983-02-02 01:06	1983-02-02	842	223
13	1988-12-02	1988-12-05 06:48	1988-12-05	775	159
14	1989-02-11	1989-02-14 14:46	1989-02-15	775	159
15	1990-01-23	1990-01-25 23:22	1990-01-27	798	182
16	1990-02-24	1990-02-26 23:24	1990-02-28	866	250
17	1990-08-18	1990-08-20 22:33	1990-08-21	733	117
18	1991-12-17	1991-12-20 09:00	1991-12-21	814	197
19	1993-01-20	1993-01-22 22:34	1993-01-23	830	213
20	1993-12-07	1993-12-09 17:32	1993-12-10	704	147
21	1993-12-17	1993-12-20 00:57	1993-12-20	809	192
22	1994-01-25	1994-01-28 10:34	1994-01-31	864	247
23	1994-03-11	1994-03-13 22:08	1994-03-14	788	171
24	1994-12-30	1995-01-01 22:29	1995-01-02	819	201
25	1995-01-07	1995-01-10 04:56	1995-01-11	846	228
26	1996-10-27	1996-10-29 23:18	1996-10-30	783	165
27	1999-02-02	1999-02-05 02:23	1999-02-06	839	220
28	1999-11-30	1999-12-03 18:00	1999-12-04	821	201
29	2000-01-27	2000-01-30 03:54	2000-01-30	843	223
30	2002-10-25	2002-10-28 02:05	2002-10-28	769	146
31	2006-10-29	2006-11-01 04:27	2006-11-01	877	255
32	2007-01-09	2007-01-12 02:27	2007-01-12	821	199
33	2007-01-16	2007-01-18 20:13	2007-01-19	751	129
34	2007-03-16	2007-03-18 21:33	2007-03-20	838	216
35	2007-11-07	2007-11-09 09:45	2007-11-10	877	255
36	2007-11-23	2007-11-25 10:05	2007-11-26	769	147
37	2008-03-10	2008-03-13 01:30	2008-03-13	755	133
38	2010-11-09	2010-11-12 13:48	2010-11-13	777	155
39	2011-02-02	2011-02-04 23:17	2011-02-05	755	133

*Tabelle 1:* Katalog der 39 historischen Sturmflutereignisse. Die grau hinterlegten Ereignisse wurden bei dem in Abschnitt 1.4 genannten Projekt 2006 simuliert. Ein Ereignis beginnt etwa 3 Tage vor dem höchsten Wasserstand und endet ein oder zwei Niedrigwasser danach. Die Simulationen starten um 00 UTC und enden um 24 UTC des letzten Tages. Alle Zeitangaben in UTC.

schenweite läuft es im operationellen Betrieb mittlerweile mit 20 km (seit dem 29.02.2012). In diesem Projekt wurde mit einer horizontalen Maschenweite des GME von 30 km gearbeitet, da dies zu Projektbeginn im operationellen Betrieb Standard war und GME hier im wesentlichen als Zwischenschritt von der groben ERA-Reanalyse zu den feinen COSMO-Maschenweiten dient. Das GME hat 60 Schichten mit der Obergrenze bei 10 hPa.

## Domains COSMO-EU and COSMO-DE

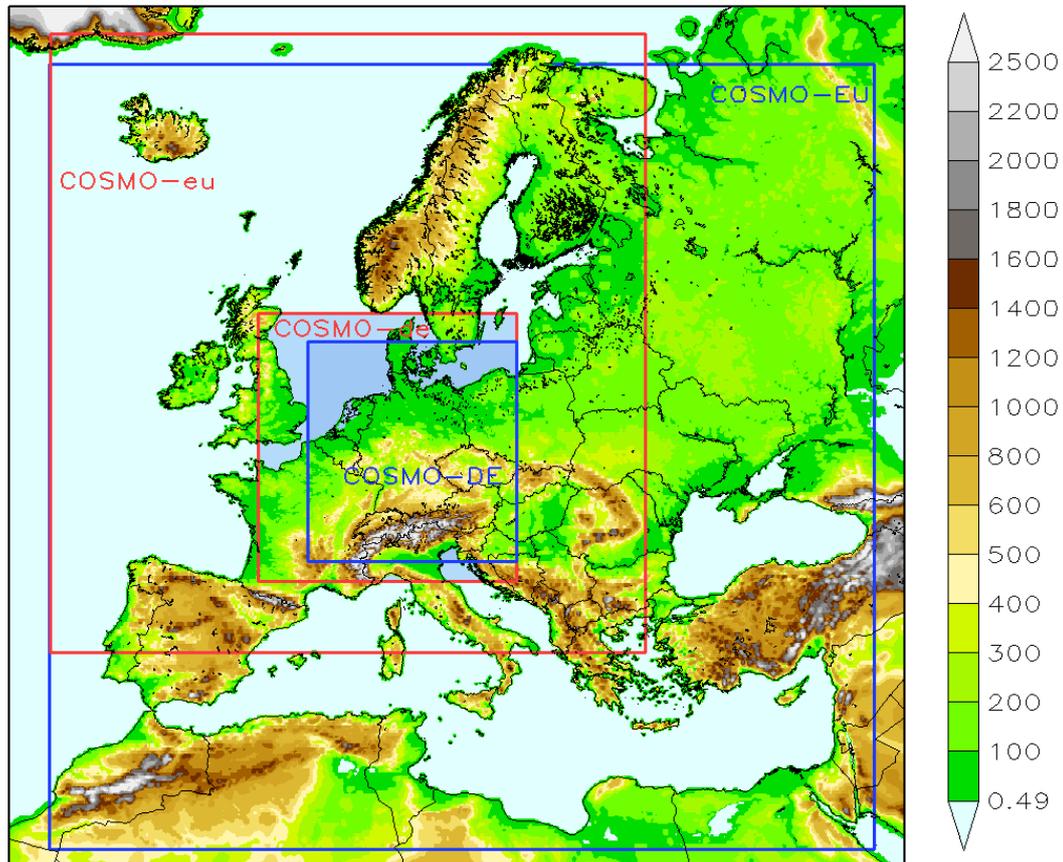
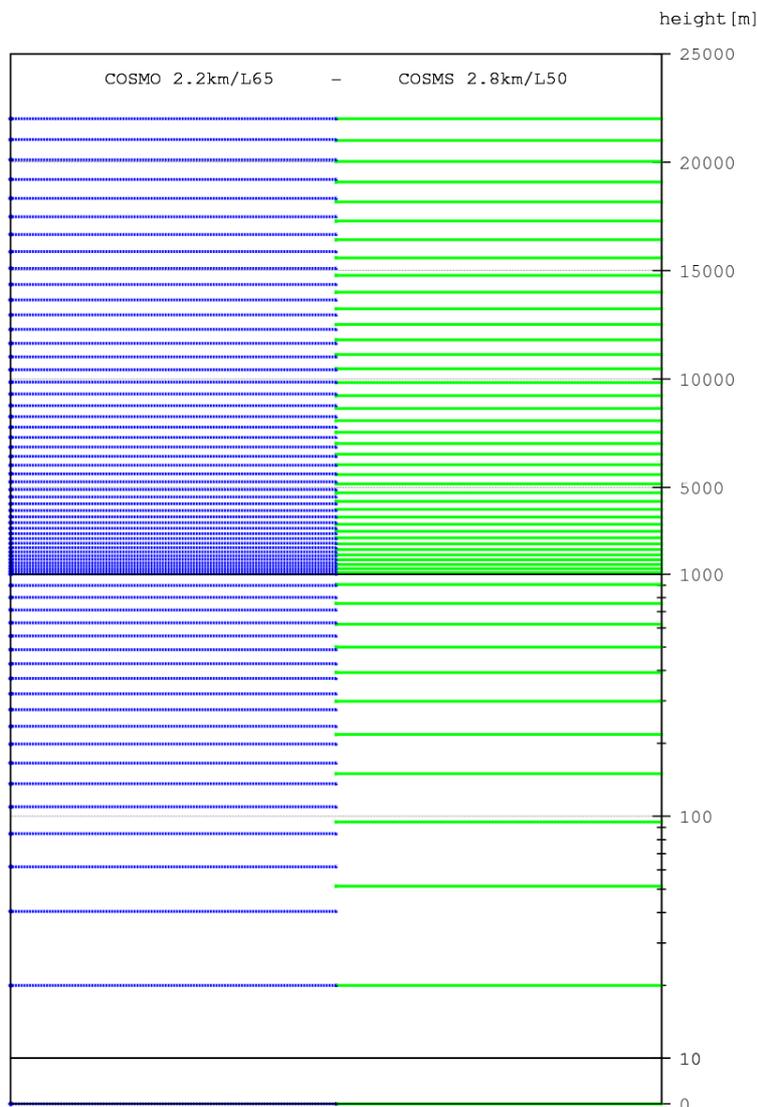


Abbildung 1: Modellgebiete von COSMO: Die roten Umrandungen zeigen die Gebiete des hier verwendeten 7 km COSMO-eu und des 2.2 km COSMO-de. Die blauen Umrandungen stellen die Gebiete der operationellen Versionen von COSMO-EU (7 km) und COSMO-DE (2,8 km) dar.

COSMO ist ein nicht-hydrostatisches Regionalmodell, das operationell als COSMO-EU und COSMO-DE betrieben wird. COSMO-EU hat eine Maschenweite von  $0,0625^\circ$  (circa 7 km) und 40 Schichten. Es hat  $665 \times 657$  Gitterpunkte und reicht im Nordwesten von Island bis Marokko im Südwesten, sowie Nordägypten im Südosten und dem Ural im Nordosten. Da für Sturmflutvorhersagen an der Nordsee große Teile des Gebiets im Süden und Osten nicht gebraucht werden und um die Rechenzeit zu verringern, wurde das Gebiet für dieses Projekt in diesen Richtungen verkleinert. Im Osten wurde darauf geachtet, dass es noch die ganze Ostsee umfasst, so dass aus dem entstandenen Datensatz in Zukunft auch Informationen für

die Ostsee verfügbar sind. Im Süden wurde es bei 40°N abgeschnitten, in Anlehnung an das ehemalige LMQ (Frank & Majewski, 2006). Im Norden wurde gerade soweit erweitert, dass das neue Modellgebiet die ganze Landmasse Skandinaviens enthält. Das neue COSMO-eu hat somit noch 480x518 Gitterpunkte.



*Abbildung 2:* Vertikale Struktur des COSMO-Modells mit 65 Schichten (blau, links, in Planung und im Projekt verwendet) und 50 Schichten (grün, rechts, zur Zeit operationell beim DWD). Die unteren 10-10000m sind logarithmisch dargestellt, darüber ist die Skala linear. Dargestellt sind die Schichtgrenzen.

COSMO-DE hat operationell eine Maschenweite von 0,025° (circa 2,8 km) und 50 vertikale Level. Mit seinen 2,8 km Maschenweite liegt es in der Region, in der hochreichende Konvektion explizit aufgelöst werden kann (Baldauf *et al.*, 2011), deshalb wird hochreichende Konvektion hier nicht mehr parametrisiert. Es hat 421x461 Gitterpunkte und reicht im Westen bis zum Ostzipfel Englands, schneidet im Südwesten das Zentralmassiv, im Süden die Po-Ebene, reicht im Osten bis über die Mitte Tschechiens und schneidet im Norden Norddänemark. Aufgrund der Aufgabenstellung wurde das Gebiet im Norden und Westen erweitert, um einen größeren Teil der Nordsee zu überdecken und um weitere Beobach-

tungsdaten aus Großbritannien für die Nudging-Simulationen nutzen zu können. Das neue COSMO-de erstreckt sich bis zur Südspitze Norwegens im Norden, sowie den Highlands im Nordwesten. Im Westen reicht es fast bis zum Golf von Biskaya. Des weiteren wurde das Gebiet im Süden bis 40° Nord erweitert, um eine zukünftige operationelle Erweiterung des Gebietes im Süden, Westen und Norden zu testen. Zusätzlich zur Gebietserweiterung wurde die Maschenweite auf 0,02° verringert (circa 2,2 km). Die Gitterpunktsanzahl erhöhte sich hierbei auf 650x700. In Abbildung 1 sind die operationellen Modellgebiete COSMO-EU und -DE (blaue Umrandungen), sowie die hier verwendeten Gebiete COSMO-eu und -de (rote Umrandungen) zu sehen. Als weiterer Test für den DWD wurde auch die Anzahl der vertikalen Schichten von 50 auf 65 erhöht. Es ist zur Zeit in Planung dies operationell einzuführen (Stand: September 2014) und soll mit der Verringerung der Maschenweite auf 0,02° eine bessere Auslösung der Konvektion bewirken. So erhöht sich die Zahl der Schichten in den unteren 1000m des Modells von 11 auf 19. Die unterschiedliche Schichteneinteilung von COSMO-DE und COSMO-de ist in Abbildung 2 dargestellt.

## 2.3 Simulationsmethodik

Um die stündlichen Randwerte für die Sturmflutvorhersagen mit COSMO zu erzeugen wurde alle 6 Stunden (00, 06, 12 und 18 UTC) ein 18-stündiger GME-Lauf, basierend auf den EZMW Reanalysen, gestartet. Die GME-Felder dienten als Anfangs- und Randdaten für COSMO-eu, mit dem auch alle 6 Stunden eine 18-stündige Vorhersage gestartet wurde. Für COSMO-de wiederum bildeten die Felder von COSMO-eu die Anfangs- und Randwerte. Da der Anfangszustand nur durch Interpolation aus einem großskaligen Modell entstand, benötigten die atmosphärischen Felder eine Einschwingphase von mehreren Stunden, damit sich feinere Strukturen bilden können. Um eine kontinuierliche Zeitreihen zu erhalten mussten 6-stündige Abschnitte aus den 18-stündigen Vorhersagen heraus geschnitten werden, möglichst ohne große Sprünge von einem Vorhersagelauf zum nächsten. Tests, die nach der Berechnung der ersten vier simulierten Stürme (Sturm 1, Hamburg-Sturmflut 1962; Sturm 31, Britta 2006; Sturm 35, Tilo 2007; Sturm 39, der aktuellste Sturm 2011) durchgeführt wurden, sollten zeigen welche Zeitintervalle dafür am besten geeignet waren. Die Auswahl wurde nach der minimalen mittleren quadratischen Differenz des auf Normal Null (NN) reduzierten Bodendrucks (PMSL) getroffen, der zu einem Vorhersagezeitpunkt zwischen zwei Rechnungen mit unterschiedlichen Startzeiten (Reanalysen) entstand. Dies wurde sowohl für COSMO-eu und für COSMO-de untersucht, sowie für eine Zeitdifferenz von 6 Stunden und 12 Stunden (dabei würden die Läufe nur zweimal am Tag gestartet, um 00 und 12 UTC). Das bedeutet es wurde der geringste Sprung des auf NN reduzierten Bodendrucks für folgenden Zeitpunkt gesucht: “ $INI + X$  Stunden –  $(INI + fh) + Y$  Stunden“, mit  $INI = 00, 06, 12$  oder  $18$  UTC,  $fh = 6$  oder  $12$  Stunden, “ $Y = X - fh$ “ und  $X = [0, 1, \dots, 17, 18]$ . Die

Ergebnisse sind beispielhaft für Sturm 31 (Britta, 2006) dargestellt. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse für COSMO-eu und Abbildung 4 für COSMO-de.

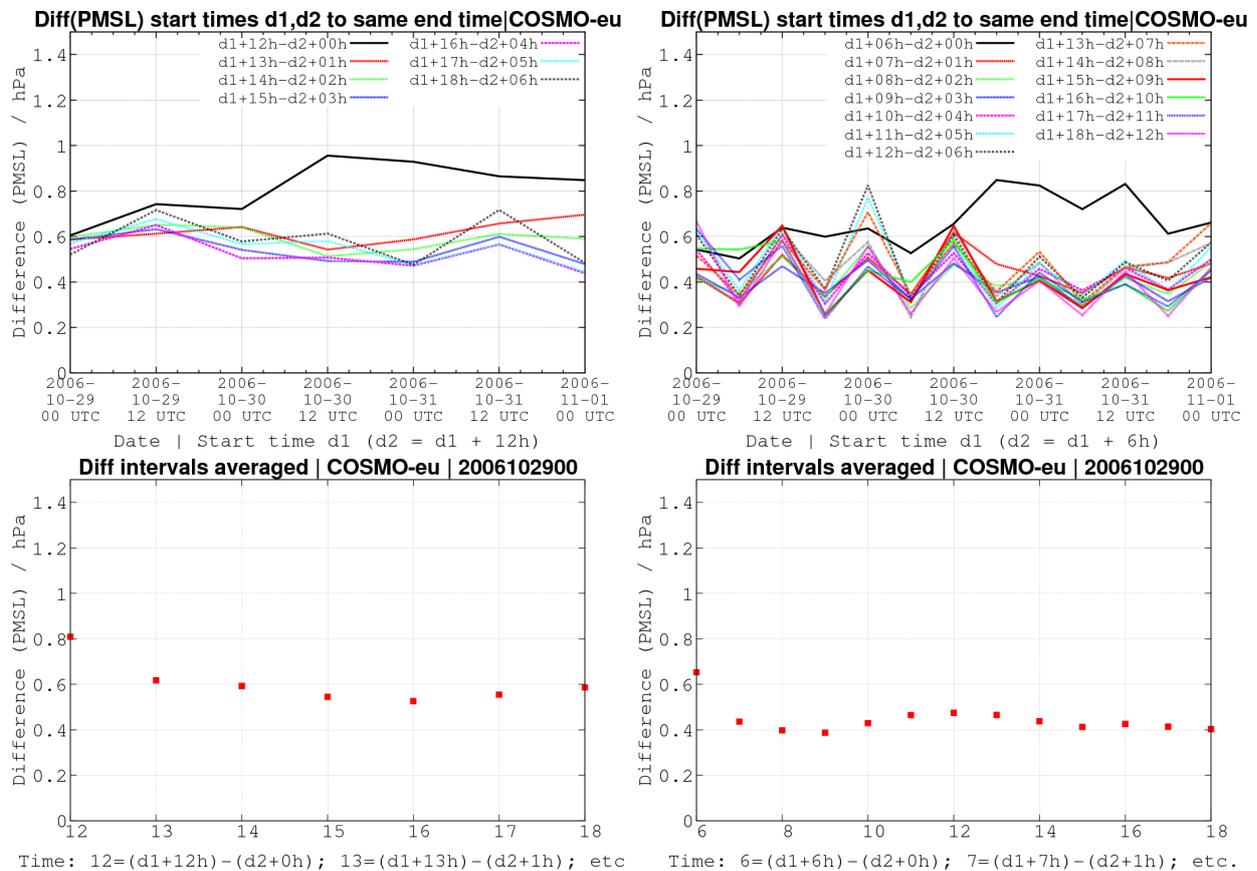


Abbildung 3: Die oberen Abbildungen zeigen die Differenzen von PMSL zwischen zwei verschiedenen Startzeiten zum gleichen Endtermin bei Sturm 31 (Britta, 2006) für COSMO-eu. Auf der linken Seite sind die 12-stündigen Differenzen, auf der rechten Seite die 6-stündigen Differenzen dargestellt. Die unteren Abbildungen zeigen die Werte gemittelt über den Sturm.

Am Beispiel des Sturms Britta, 2006, für COSMO-eu ist zu sehen, dass die 12-stündigen Differenzen einen höheren Sprung haben ( $>0,5$  hPa) als die 6-stündigen Sprünge ( $<0,5$  hPa), ausgenommen zum Reanalysezeitpunkt  $d1=0$  des Subtrahenden (Abbildung 3, untere Grafiken). Im zeitlichen Verlauf haben die 6-stündigen Differenzen größere Unterschiede. Begründet kann dies damit werden, dass es alle 12 Stunden eine 4D-Var in der Datenassimilation der ERA-Interim Reanalysen gibt, das heißt es trifft immer eine Reanalyse mit 4D-Var und 3D-Var aufeinander. Bei den 12-stündigen Differenzen treffen immer die Reanalysen mit einer 4D-Var aufeinander (00 und 12 UTC), was zur Glättung der Kurve führt. Dennoch zeigen die 6-stündigen Differenzen im Mittel die kleineren Sprünge. COSMO-de folgt dem Verhalten von COSMO-eu mit etwas mehr "Zickzack" in den Kurven und leicht größeren Sprüngen der Druckdifferenzen von einem zum anderen Lauf. Bei Sturm Britta trat die ge-

ringste mittlere quadratische Differenz der 6-stündigen Differenzen bei Stunde 9 und der 12-stündigen Differenzen bei Stunde 16 für COSMO-eu und COSMO-de auf (siehe Abbildungen 3 und 4).

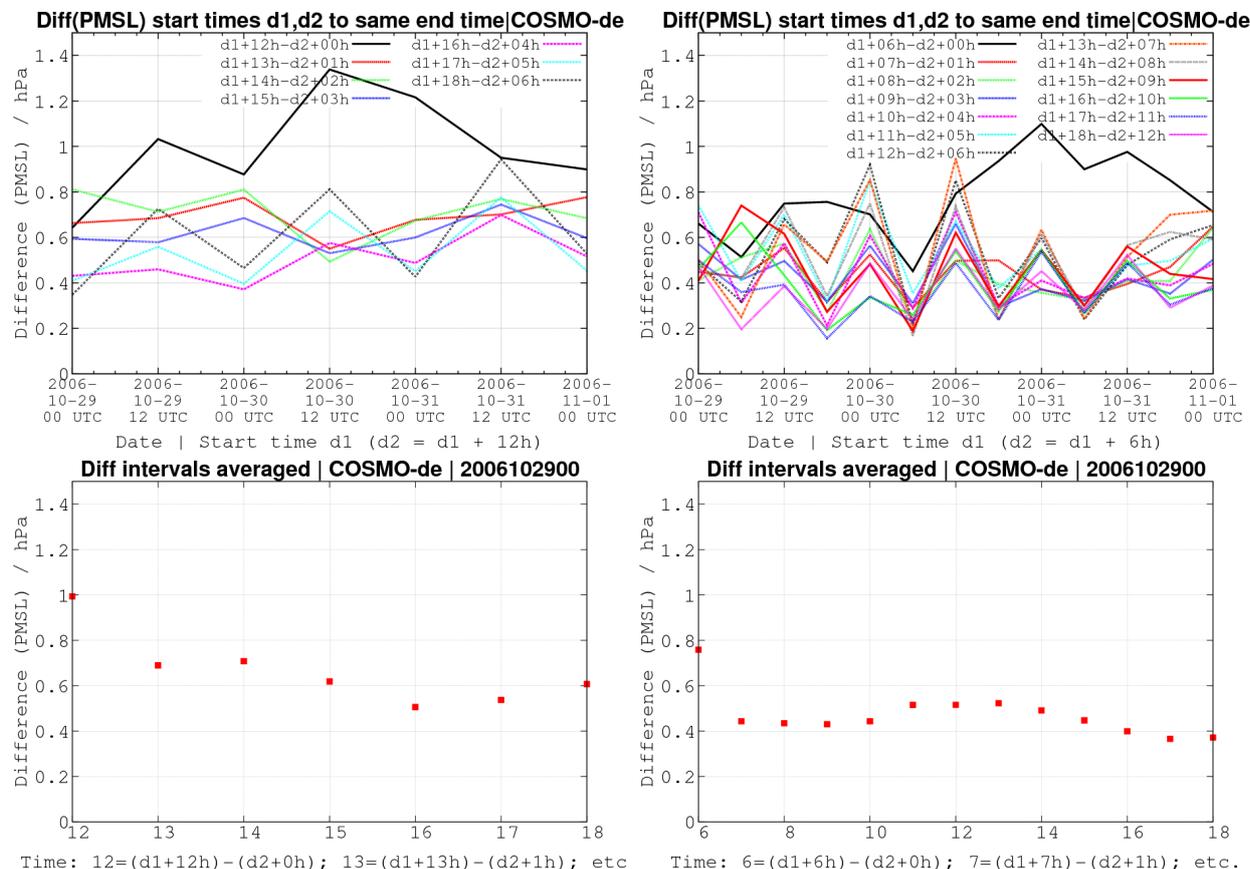


Abbildung 4: Die oberen Abbildungen zeigen die Differenzen von PMSL zwischen zwei verschiedenen Startzeiten zum gleichen Endtermin bei Sturm 31 (Britta, 2006) für COSMO-de. Auf der linken Seite sind die 12-stündigen Differenzen, auf der rechten Seite die 6-stündigen Differenzen dargestellt. Die unteren Abbildungen zeigen die Werte gemittelt über den Sturm.

Nach Bildung des Durchschnitts der mittleren quadratischen Differenzen über die ersten vier simulierten Stürme zeigte sich, wie auch am Beispiel des Sturms Britta zu sehen war, dass die Differenzen der 6-stündigen Startzeitunterschiede deutlich unter den Differenzen der 12-stündigen Startzeitverschiebungen lagen. Des weiteren zeigte COSMO-eu geringere Differenzen und die kleinere Variabilität als COSMO-de. Im Durchschnitt ergab sich der geringste mittlere quadratische Differenz bei der Vorhersagezeit "INI UTC + 10 Stunden - (INI+6) UTC + 4 Stunden" der Läufe mit 6-stündigen Startzeitverschiebungen. Somit wurden für die weiteren Anwendungen die Vorhersagestunden 5-10 einer Simulation ausgeschnitten und hintereinander gehängt, so dass die bestmögliche Vorhersage entstand.

### 2.3.1 Nudging

Um eine verbesserte Analyse der meteorologischen Felder zu bekommen sollten die Simulationen zusätzlich mit der Newtonschen Relaxation bzw. Nudging-Methode (Stauffer & Seaman, 1990) berechnet werden. Dabei werden durch einen Zusatzterm (Relaxationsterm) in den Gleichungen die prognostischen Variablen innerhalb eines Zeitfensters gegen einen Wert relaxiert (Schraff, 1997). In diesem Fall sind die Werte, gegen die relaxiert wird, direkte Beobachtungen, was ein Vorteil für asynoptische Beobachtungen ist (Stauffer & Seaman, 1994). Dabei sollte der Nudging-Term für praktische Anwendungen kleiner als der größte Term der Dynamik sein. Die grundlegende Idee ist, dass die Modellfelder zu den Beobachtungen hingezogen werden, ohne das dynamische Gleichgewicht des Modells wesentlich zu beeinflussen (Schraff & Hess, 2002), das heißt das Modell sollte schon ohne Nudgingterm nahe an der Realität sein.

Als Eingangsdaten für den Beginn eines Sturmes dienten die GME-Daten, welche aus EZMW-Reanalysen gewonnen wurden und auch als Eingangs- und Randdaten für die vorhergehenden Simulationen aus Abschnitt 2.3 verwendet wurden. Daraus wurde eine 6-stündige Vorhersage des COSMO-eu mit Nudging der Beobachtungsdaten an die Vorhersagen berechnet. Die Felder zur sechsten Stunde waren wiederum die Anfangswerte der nächsten 6-stündigen Simulation. Somit entstand eine kontinuierliche Zeitreihe ohne Sprünge in den meteorologischen Feldern. Als Randdaten für COSMO-eu blieben die GME-Daten bestehen. COSMO-de wurde dagegen aus den Nudging-Daten des COSMO-eu zu Simulationsbeginn angetrieben und es wurde wiederum eine Reihe 6-stündiger kontinuierlicher Vorhersagen bis Sturmende berechnet. Die Randwerte kamen hierbei von den Nudging-Simulationen des COSMO-eu. Die gerade beschriebenen Methoden zur Berechnung der Sturmereignisse zeigt Abbildung 5 schematisch.

### 2.3.2 Datenverfügbarkeit Nudging

Zur Simulation der Stürme im Nudging-Modus standen die Beobachtungsdaten des DWD-Archivs zu Verfügung. Da die Datenbank erst ab dem Jahr 1966 beginnt, konnte Sturm 1 (1962) nicht im Nudging-Modus gerechnet werden. Folgende Beobachtungsdaten wurden für die Simulationen mit Nudging genutzt: Radiosondenaufstiege lieferten den horizontalen Wind, die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit und den Druck. Aus Flugzeugmessungen wurde der Horizontalwind und die Temperatur genutzt, ebenso wurde der Horizontalwind aus Windprofilern eingesetzt. Der 10m-Wind wurde von Stationen genutzt, die nicht höher als 100m über dem Meeresspiegel liegen, um nur Beobachtungen über flachem Land zuzulassen. Vor ihrer Nutzung wurden die Beobachtungen der gleichen Qualitätskontrolle unterzogen wie sie im operationellen Betrieb des DWD stattfindet. Eine detaillierte Beschreibung des Nudgings im COSMO wird in Schraff & Hess (2002) vorgestellt.

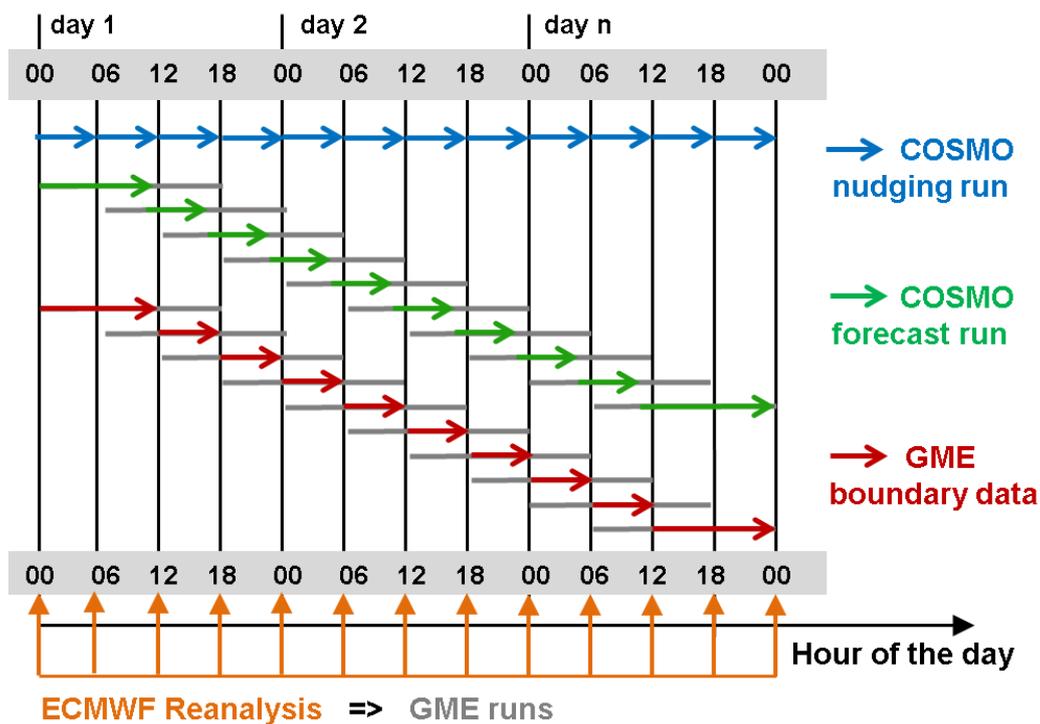


Abbildung 5: Schema zur Simulation der Sturmereignisse. Unten sind die Reanalysen eingezeichnet (orange), die das GME alle 6 Stunden antreiben. Dieses rechnet alle 6 Stunden eine 18-stündige Simulation (grau) und liefert Randwerte für COSMO-eu (rot). COSMO wird auch 6-stündig 18 Stunden lang gerechnet und die Stunden 5-10 ausgeschnitten und aneinander gehängt (grün). Bei der Nudging-Methode wird alle 6 Stunden neu gerechnet, wobei die Felder des letzten Zeitpunktes der Vorhersage die Anfangsdaten der neuen Simulation darstellen (blau).

Genutzt wurden Daten aus den Bereichen SYNOP (synoptische Stationen; Land- und Schiffsmessungen), AIREP (Flugzeugmessungen), DRIBU (Driftbojen auf dem Meer), TEMP (Radiosondenaufstiege) und PILOT (Wind Profiler). Die Verfügbarkeit von Beobachtungsdaten hing wesentlich vom Zeitpunkt des Sturmes ab. Für ältere Stürme gab es weniger Daten als für aktuellere Ereignisse. Die Gesamtanzahl der zur Verfügung stehenden Beobachtungen in einem 6-stündigen Intervall im COSMO-EU Gebiet zeigt Abbildung 6, links. In den Jahren 1966-1976 waren es 2000-3000 und es wurden nur SYNOPs genutzt. Dabei war das Verhältnis von Land- zu Schiffsbeobachtungen etwa 10:1. Die Datenverfügbarkeit stieg beim Sturm 10 (1977) durch eine Zunahme der Messfrequenz der SYNOPs von 12-, 8- oder 6-stündigen zu 6-, 3-, oder einstündigen Frequenzen und durch die erstmalige Verfügbarkeit von Bojen- und Flugzeugmessungen auf circa 5000 innerhalb 6 Stunden an. Bis zum Jahr 1996 stieg die Datenverfügbarkeit stetig bis annähernd 10000 pro 6 Stunden an. Dabei waren seit 1991 auch Radiosondenaufstiege und Wind Profiler verfügbar. Die Stürme von 1999 und 2000 wiesen circa 11000-15000 verfügbare Beobachtungsdaten in 6 Stunden auf, der Anstieg resultierte hierbei hauptsächlich auf Grund von vermehrten Flugzeugmessungen und SYN-

OPs. 2002 sprang die Datenverfügbarkeit auf circa 20000 und 2006 auf über 35000 pro 6 Stunden an, wiederum durch eine Zunahme von Flugzeugmessungen und SYNOPs. Ende 2007 war ein weiterer großer Sprung auf über 40000 verfügbare Beobachtungen in 6 Stunden zu verzeichnen. Bei allen Stürmen die dominierenden Beobachtungen waren die SYNOPs, wobei die Flugzeugmessungen erstmals 1996 mindestens die Hälfte der genutzten Messungen darstellten und bis 2011 nur noch circa 1/5 weniger aktive Messungen besaßen als die SYNOPs (siehe Abbildung 7, links). Die Anzahl der genutzten Bojen, TEMPs und Wind Profiler bewegte sich über den ganzen Zeitraum im niedrigen 10-er bis niedrigen 100-er Bereich pro 6-stündigem Zeitintervall (siehe Abbildung 7, rechts).

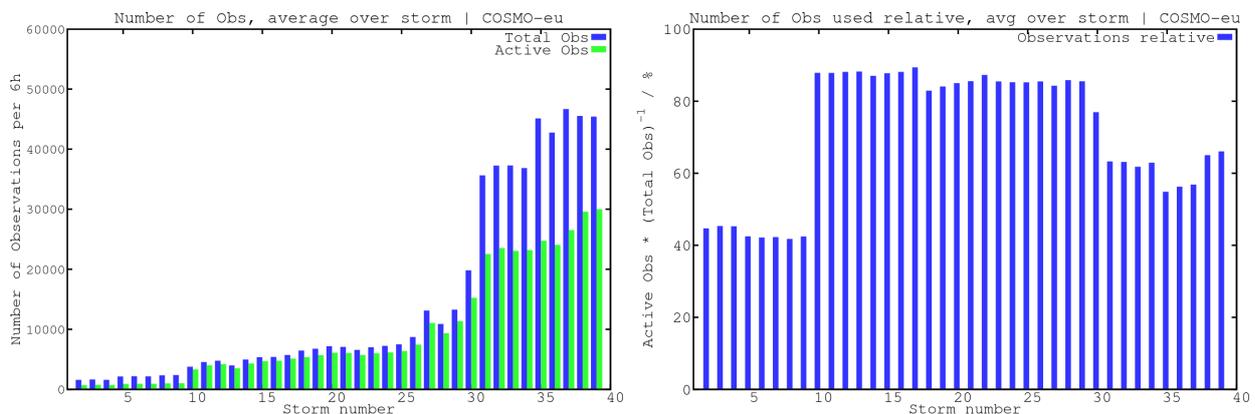
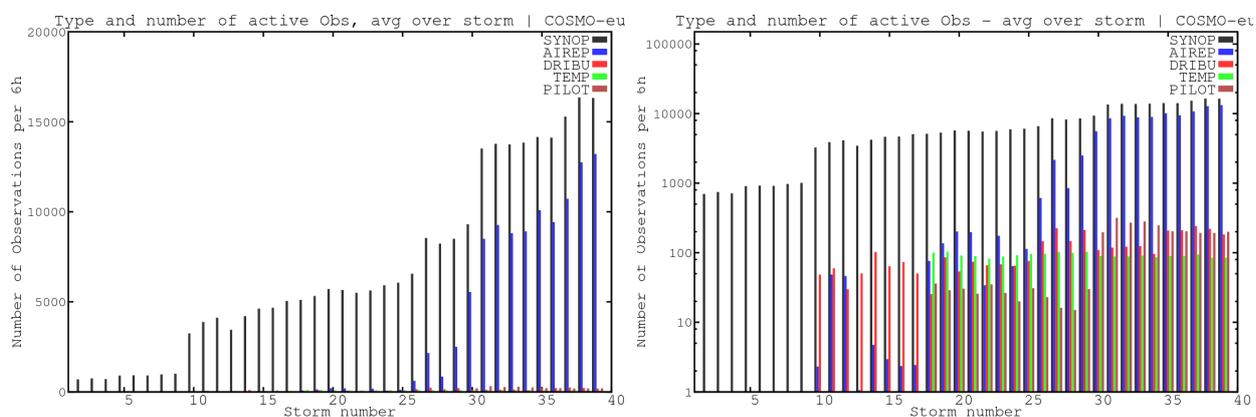


Abbildung 6: Die linke Abbildung zeigt die Anzahl der 6-stündig verfügbaren (blau) und aktiven (grün) Beobachtungen im Gebiet COSMO-EU für die Sturmereignisse 2-39, jeweils gemittelt über einen Sturm. Die rechte Abbildung zeigt das Verhältnis der aktiven zu den verfügbaren Beobachtungen.

Die Anzahl der tatsächlich genutzten Daten reduzierte sich durch den Qualitätscheck, der Verfügbarkeit von Meta-Informationen wie z.B. Stationshöhe, oder Differenzen zwischen Stationshöhe und Modellorographie auf 40% - 90% der tatsächlich verfügbaren Daten. Bei den Stürmen 2-8 (Sturmnummern siehe Tabelle 1) bis Anfang 1976 wurden knapp über 40% der verfügbaren Daten genutzt. Ab 1977 gab es einen Sprung auf knapp 90% Datennutzung, die sich bis 2000 auf über 80% hielt. Grund der geringen Datennutzung vor 1977 sind Lücken in den Meta-Informationen der Daten. Dort fehlten in den BUFR-Daten alle Höheninformationen der SYNOPs über Land. Nach bekannt werden des Problems wurde bei der Abteilung Technische Infrastruktur (TI) des DWD angefragt, wie das Problem zu lösen wäre. Diese bot an eine externe Liste mit den Metadaten (hier: Höheninformationen) zu erstellen, die beim extrahieren der Daten aus dem Archiv den Stationen zugeordnet werden können. Da TI die unvorhergesehene Aufgabe in ihren Arbeitsplan dazwischen schieben musste und nicht sofort Zeit verfügbar war, verzögerte sich die Berechnung der Sturmereignisse vor 1980 mit Nudging dadurch um 4 Monate. Für einige Stationen blieben die Höheninformationen aber dennoch unbekannt, so dass nur 40% der Daten genutzt werden

konnten. Von über 80% Datennutzung im Jahr 2000 sank der Wert 2002 auf unter 80% und von 2006 bis 2011 pendelte er sich zwischen 55% und 65% ein (siehe Abb. 6, rechts). Das erneute Absinken resultierte aus einem starken Anstieg der Flugzeugmessungen, die öfter durch das Raster des Qualitätschecks fielen, als die Beobachtungsdaten der SYNOPs.



*Abbildung 7:* Die linke Grafik zeigt die Anzahl der aktiven Beobachtungen in einem 6-stündigen Intervall der Stürme 2-39, gemittelt über einen Sturm und geordnet nach den Beobachtungstypen SYNOP (schwarz), AIREP (blau), DRIBU (rot), TEMP (grün) und PILOT (braun). Die rechte Grafik stellt die gleichen Werte wie die linke Abbildung mit einer logarithmischen Ordinatenachse dar.

Die räumliche Verteilung der verfügbaren synoptischen Beobachtungen aus dem Archiv des DWD über einen Tag für vier verschiedene Ereignisse (Stürme 10, 13, 28 und 35) zeigt Abbildung 8. Es ist eine deutliche Zunahme der Beobachtungen für neuere Ereignisse erkennbar und die Verschiebung von bemannten Stationen (blau) über Land hin zu Automaten (rot). Auf Grund der oftmals höheren Messfrequenz (beispielsweise 3-stündig zu stündig) bei neueren Ereignissen ist die Zunahme höher als in der Abbildung sichtbar. Die höchsten Stationsdichten liegen bei dem aktuellsten dargestellten Ereignis (Sturm 35, 2007; Achtung: die blauen Punkte der Schweizer Stationen in diesem Bild sind ein Fehler. Wie schon im vorherigen Bild, bei Sturm 28, sollten es überwiegend rote Punkte sein, d.h. Automaten) in Süddeutschland, gefolgt vom Rest Deutschlands, der Schweiz und Österreich. Auf dem Meer ist die Beobachtungsdichte allgemein geringer, am geringsten im Nordatlantik.

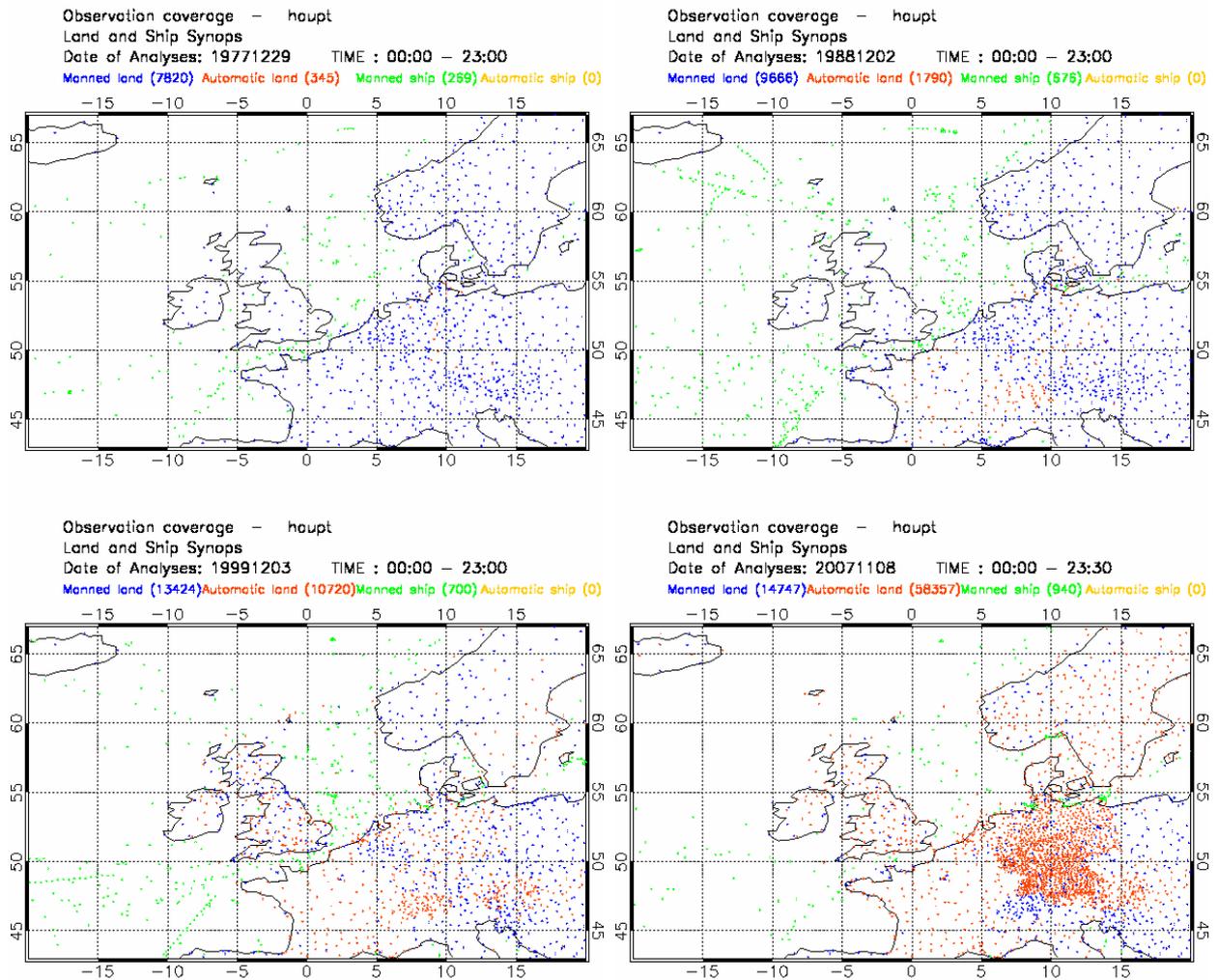


Abbildung 8: Die 4 Grafiken zeigen die täglich verfügbaren synoptischen Land- und Schiffsbeobachtungen für einen Ausschnitt des COSMO-eu Gebietes. Bemannte Landstationen sind in blau, automatische in rot dargestellt. Die Schiffsbeobachtungen sind grün. Oben links sind die Beobachtungen vom 29.12.1977 (Sturm 10), oben rechts vom 02.12.1988 (Sturm 13), unten links vom 03.12.1999 (Sturm 28) und unten rechts vom 08.11.2007 (Sturm 35; Achtung: die blauen Punkte in der Schweiz sind falsch. Es müssten überwiegend rote Punkte, d.h. Automaten sein) gezeigt.

### 3 Verifikation der Ergebnisse

Die Verifikation der Modellergebnisse wurde anhand von 25 synoptischen Stationen an der dänischen, deutschen und holländischen Küste, sowie Plattformen oder Feuerschiffen in der Nordsee durchgeführt. Die Standorte der Stationen zeigt Abbildung 9. Nicht alle Beobachtungen waren für jeden Sturm verfügbar, manche wurden über die Jahre abgeschaltet, es gab Messausfälle oder es kamen neue hinzu. Je aktueller der Sturm, desto mehr Vergleichsstationen waren normalerweise verfügbar (siehe Tabelle 2). Bis auf die Station Scharhörn (externe Daten, HPA Hamburg) wurden die Daten zur Verifikation auch für die Nudging-Analyse genutzt. Es wurden der Root Mean Square Error (RMSE) und der mittlere Fehler (bias) zwischen den Modellergebnissen und Messungen für die meteorologischen Größen Luftdruck reduziert auf NN (PMSL), Windgeschwindigkeit in 10m Höhe (FF\_10m) und Windrichtung in 10m Höhe (DD\_10m) berechnet. Im folgenden werden zuerst die Hamburg-Sturmflut (Sturm 1, 1962) und Sturm Tilo (Nr. 35, 2007) betrachtet, bevor die Ergebnisse für alle Stürme dargestellt werden. Weiterhin wurden die Vorhersagen ohne Nudging mit den Nudging-Analysen und COSMO-eu mit COSMO-de verglichen. Es wurden Sturmzugbahnen erstellt und diese, soweit möglich, mit historischen Analysen des DWD und der Literatur verglichen, um sie zu verifizieren (siehe Abschnitt 3.6).

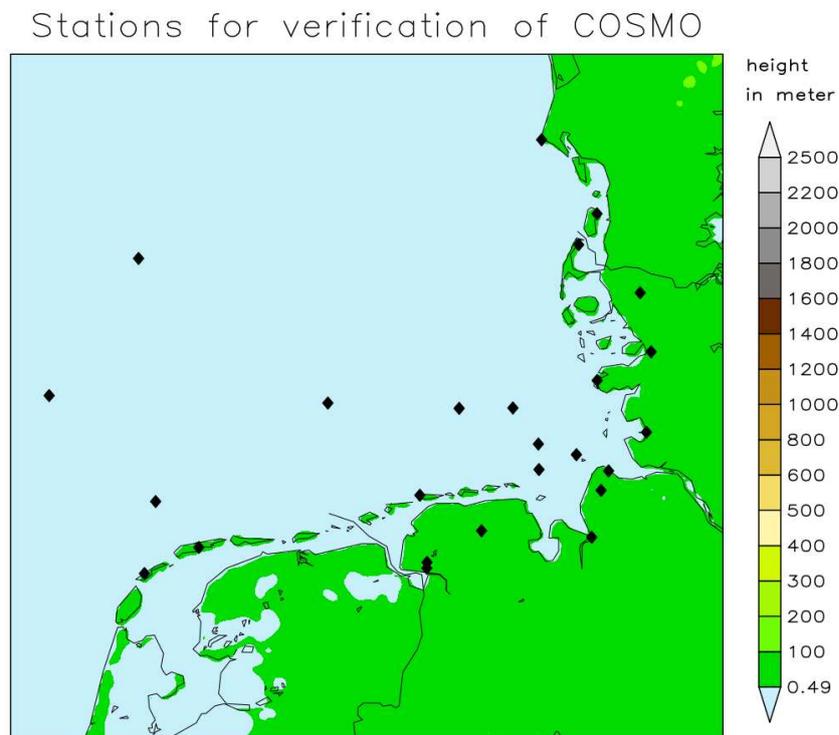


Abbildung 9: Die diamantförmigen Markierungen zeigen die 25 Standorte der Stationen, mit denen die Verifikation der Modellergebnisse durchgeführt wurde (siehe auch Tabelle 2)

Name	Kennung	LAT/°N	LON/°O	Verfügbar/Nr.	Anzahl
Bremerhaven	10129	53,53	8,58	2-39	38
Cuxhaven	10131	53,87	8,71	2-39	38
Elpersbüttel	10130	54,07	9,02	8-39	32
Emden	10200	53,38	7,23	11-15,27-39	18
Emden Ness.	10203	53,35	7,20	2-4,6-26	24
Helgoland	10015	54,18	7,90	1-39	39
Husum	10029	54,48	9,05	2-7,11,17	8
Lt Alte Weser	10124	53,87	8,13	10-25,27-39	29
Leck	10022	54,78	8,95	8-39	32
List	10020	55,02	8,42	1-39	39
Norderney	10113	53,72	7,15	2-39	38
Nordholz	10136	53,77	8,65	8-39	32
St. P.-Ording	10028	54,33	8,60	28-39	12
UFS Dt. Bucht	10007	54,17	7,45	2-8,10-14,16,17,19-31,34-39	33
UFS Elbe 1	10005	54,00	8,12	2-13,15-19,23-28	21
UFS TW Ems	10004	54,17	6,35	2-10,15-18,20-23,28-31,33-39	28
Wittmundhafen	10126	53,55	7,67	8-39	32
Blaavandshuk	06081	55,55	8,08	2-4,12,15-39	30
F03	06239	54,85	4,68	24-39	16
F16a	06206	54,12	4,02	32-39	8
L9FF1	06207	53,62	4,97	32,33,35-39	7
Roemoe	06096	55,18	8,57	14-21,23-39	25
Terschelling	06251	53,40	5,35	26-29,31-39	13
Vlieland	06242	53,25	4,92	26-39	14
Scharhörn	-999	53.96	8,44	8-39	32

*Tabelle 2:* Liste der 25 Stationen, die zu Verifikation der Modellergebnisse genutzt wurden. Angegeben sind Stationsname, WMO-Kennung (Kennung), Längengrad (LAT), Breitengrad (LON), sowie die Verfügbarkeit (in Sturmnummern, siehe Tabelle 1) von mindestens einer der zu verifizierenden Größen (PMSL, FF\_10m oder DD\_10m) und die daraus resultierende Anzahl an Ereignissen, zu denen Beobachtungen an der Station verfügbar waren.

### 3.1 Hamburg-Sturmflut, 1962

Ein Tief, das am Abend des 14.02.62 norwestlich Islands lag zog unter Vertiefung, anfangs östlich, später südöstlich auf Norwegens Küste zu und erreichte diese am Morgen des 16.02.62 (den 6-stündigen Verlauf des 10m-Windes und Luftdrucks reduziert auf NN zeigt Abbildung 24). Das Tief hatte einen großen, windarmen Kern, aber eine sehr weit ausgedehnte Starkwindzone auf seiner Rückseite (südwestlich des Kerns), resultierend aus großräumiger starken Isobarendrängung auf Grund der Luftdruckgegensätze des Sturmtiefs und einem weit nach Norden reichenden Keil des Azorenhochs, mit über 1040 hPa nordwestlich der iberischen Halbinsel. Der Sturm hatte morgens schon die ganze Nordsee erfasst und drückte die Wassermassen anfangs aus Westen in die Deutsche Bucht. Unter weiterer Vertiefung (bis unter

950 hPa) wanderte das Tief südoswärts nach Schweden, dadurch erreichte das Hauptsturm-  
feld die Nordsee und der Wind drehte auf Nordwest, was die Wasserstände in der deutschen  
Bucht weiter stark ansteigen lies. Eine merkliche Abschwächung des Windes erfolgte erst in  
der Nacht vom 16.02. auf den 17.02.

Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben wurde, konnte für die Hamburg-Sturmflut keine  
Nudging-Analyse durchgeführt werden, da das Archiv des DWD nur bis 1966 zurück reicht.  
Von den 25 Stationen aus Tabelle 2 gibt es zu zweien (Helgoland und List auf Sylt) Kli-  
mazeitreihen der Windgeschwindigkeit in 10m Höhe im Klimaarchiv des DWD (<http://www.dwd.de/klimadaten>, Stand: September 2014; Luftdruck und Windrichtung waren nicht  
stündlich, nur tageweise verfügbar). Abbildung 10 zeigt die Zeitreihen von FF\_10m an den  
Stationen Helgoland und List/Sylt. Beide Modellversionen gaben den gemessenen Verlauf der  
Windgeschwindigkeit gut wieder. COSMO-eu überschätzte die Geschwindigkeit leicht und  
hatte einen mittleren Fehler von 1,8 beziehungsweise 2,0  $\text{ms}^{-1}$  für Helgoland bzw. List/Sylt.  
Der RMSE lag bei 2,6 bzw. 2,9  $\text{ms}^{-1}$ . COSMO-de zeigte einen geringeren mittleren Fehler  
als COSMO-eu für Helgoland (0,6  $\text{ms}^{-1}$ ), der für List/Sylt leicht negativ war (-0,5  $\text{ms}^{-1}$ ).  
Der RMSE war mit 1,8  $\text{ms}^{-1}$  bzw. 2,1  $\text{ms}^{-1}$  für Helgoland bzw. List/Sylt auch geringer als  
der von COSMO-eu. Für das hochaufgelöste COSMO-DE sind zusätzlich die Modelldaten  
der Sturmflutberechnungen von 2006 eingezeichnet (siehe Abschnitt 1.4). Da die Simula-  
tionen 2006 kürzer waren, wurde die Fehlerrechnung nur für 62 Zeitpunkte (anstatt 97 bei  
COSMO-eu) durchgeführt. Im Gegensatz zu den Simulationen 2006 ist eine Verbesserung  
des RMSE für Helgoland um 0,7  $\text{ms}^{-1}$  und für List/Sylt um 0,2  $\text{ms}^{-1}$  zu sehen. Auch der  
mittlere Fehler der COSMO-DE Simulationen von 2006 ist im Betrag höher, als der des  
aktuellen Projekts mit COSMO-de. Auch ohne Nudging wurden die Windgeschwindigkeits-  
maxima von COSMO-de zeitlich sowie im Betrag sehr gut wiedergegeben. Wie COSMO-de  
gibt auch COSMO-eu den Verlauf der Windgeschwindigkeit gut wieder, aber mit einem leicht  
positiven mittleren Fehler.

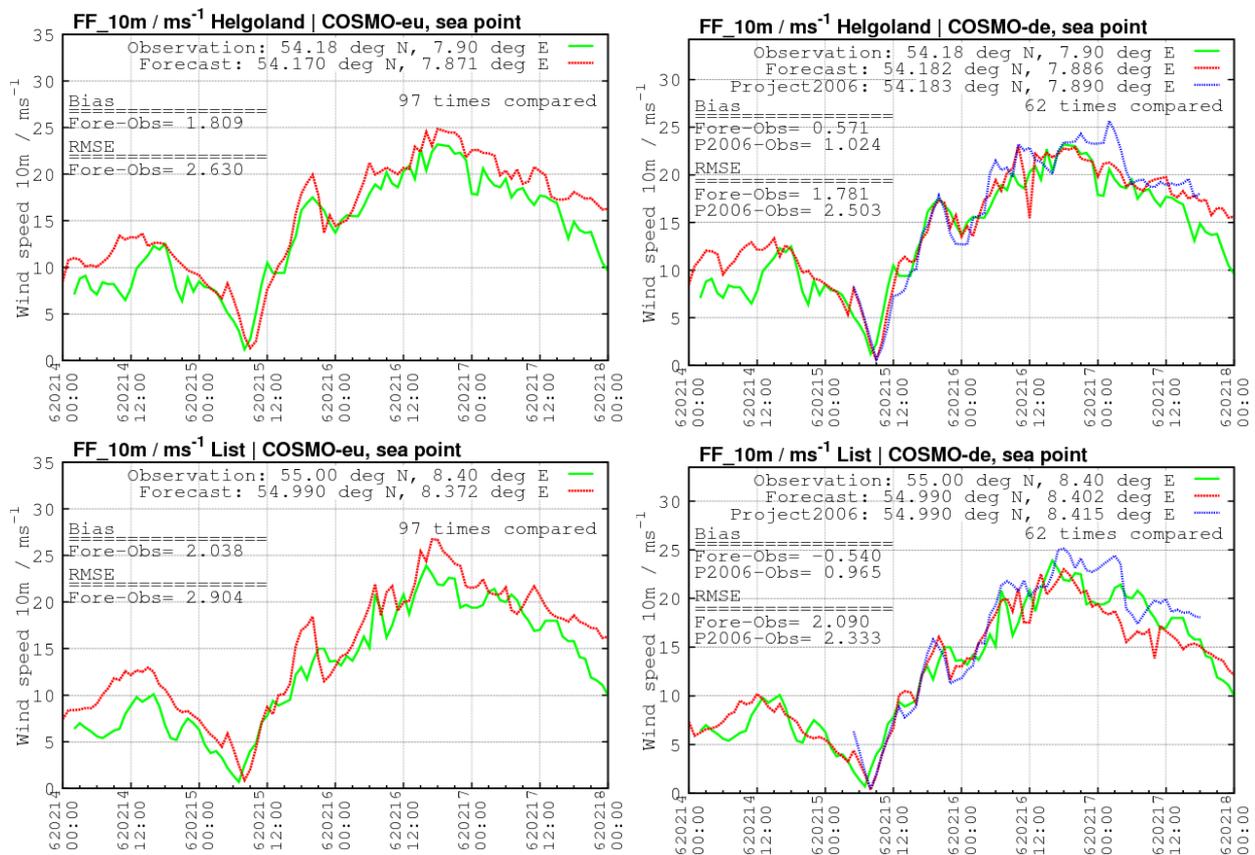


Abbildung 10: Die 4 Grafiken zeigen die Zeitreihen der 10m-Windgeschwindigkeit während der Hamburg-Sturmflut, 1962, für Helgoland (oben) und List/Sylt (unten) der Modelle COSMO-eu (links) und COSMO-de (rechts). Die Vorhersagen sind in rot und die Beobachtungen in grün eingezeichnet. Für COSMO-DE sind zusätzlich die Ergebnisse der Sturmflutsimulationen aus dem Projekt 2006 (siehe Abschnitt 1.4) zu sehen (blau). Für alle Zeitreihen sind auch der mittlere Fehler (bias, Modellvorhersage–Beobachtung) und der RMSE angezeigt.

### 3.2 Betrachtung von Sturm Tilo, 2007

Sturm Tilo entstand am 7.11.2007 südwestlich von Island und zog in südöstlicher Richtung zur Westküste Norwegens und weiter in den Norden des Skagerrak. Dadurch wurde das Wasser erst aus westlicher, später aus nordwestlicher Richtung über viele Stunden in die deutsche Bucht gedrückt. Wie es typisch für Stürme der mittleren Breiten ist, traten die höchsten Windgeschwindigkeiten an der Südwestseite des Tiefdruckwirbels hinter der Kaltfront auf (siehe Abbildung 29).

Für Sturm Tilo standen Beobachtungsdaten von 22 der 25 Stationen zur Verfügung. Die folgenden Ergebnisse stellen immer die Differenz “Modellvorhersage–Beobachtung“ dar. Es wurden die beiden COSMO-Modelle gegeneinander verglichen und die Nudging-Läufe gegenüber den Simulationen ohne Nudging. Die Auswertung für COSMO-eu zeigte, dass die

mittleren Fehler aller drei Variablen, FF\_10m, DD\_10m und PMSL, der Nudging-Simulationen geringer waren als die der normalen Vorhersagen. Der mittlere Fehler für FF\_10m war  $1,6 \pm 1,2 \text{ ms}^{-1}$  ( $\Delta_{V1}$ ) verglichen mit  $1,1 \pm 1,1 \text{ ms}^{-1}$  ( $\Delta_{N1}$ ) (ohne Nudging im Vergleich zu Nudging, im folgenden immer diese Reihenfolge), für DD\_10m  $6,3 \pm 4,2^\circ$  gegenüber  $4,6 \pm 3,4^\circ$  und für PMSL  $0,4 \pm 0,3 \text{ hPa}$  gegenüber  $0,1 \pm 0,3 \text{ hPa}$  (siehe Abbildung 11, links oben). Die Unsicherheiten der Werte repräsentieren die Standardabweichung über alle bei diesem Sturm aktiven Beobachtungsstationen. Die Werte des RMSE waren  $2,7 \pm 0,8 \text{ ms}^{-1}$  gegenüber  $2,2 \pm 0,6 \text{ ms}^{-1}$  für FF\_10m,  $15,6 \pm 4,5^\circ$  gegenüber  $13,0 \pm 4,2^\circ$  für DD\_10m und  $0,8 \pm 0,2 \text{ hPa}$  gegenüber  $0,5 \pm 0,2 \text{ hPa}$  für PMSL (siehe Abbildung 11, links unten). Bei diesem Sturm waren die Ergebnisse der COSMO-eu Nudging-Simulation für alle drei Größen besser als die der normalen Vorhersage. Die Resultate des mittleren Fehlers zeigten, dass die Varianz der Stationen untereinander nicht vernachlässigbar ist. Erklärt werden kann dies mit der unterschiedlichen Lage der Stationen an der Küste (zum Beispiel auftretende Leeeffekte bei einer bestimmten Windrichtung) und, ob die einer Station zugeordneten nächsten Gitterpunkte im Vorhersagemodell Land- oder Meerpunkte darstellen.

Qualitativ zeigte COSMO-de ein ähnliches Verhalten im RMSE wie COSMO-eu, aber signifikante Unterschiede im mittleren Fehler des 10m-Windes. Der RMSE der Nudging-Simulationen verglichen mit den Vorhersagen war  $2,2 \pm 0,6 \text{ ms}^{-1}$  gegenüber  $2,0 \pm 0,5 \text{ ms}^{-1}$  für FF\_10m,  $14,5 \pm 4,3^\circ$  gegenüber  $13,4 \pm 5,0^\circ$  für DD\_10m und  $0,8 \pm 0,2 \text{ hPa}$  gegenüber  $0,5 \pm 0,2 \text{ hPa}$  für PMSL (siehe Abbildung 11, rechts unten). Wie erwartet brachte der Nudging-Lauf auch hier leicht bessere Ergebnisse. Im mittleren Fehler war dagegen kein Unterschied zwischen den beiden Moden zu erkennen (siehe Abbildung 11, rechts oben).

Der Vergleich von COSMO-eu und COSMO-de zeigt einen signifikanten Unterschied im mittleren Fehler des 10m-Windes. Der mittlere Fehler von FF\_10m für COSMO-de der normalen Vorhersage war  $-0,05 \pm 1,1 \text{ ms}^{-1}$  ( $\Delta_{V2}$ ) und der Nudging-Analyse  $+0,25 \pm 1,0 \text{ ms}^{-1}$  ( $\Delta_{N2}$ ). Die Differenz von "COSMO-eu–COSMO-de" war somit  $1,65 \text{ ms}^{-1}$  ( $\Delta_{V1} - \Delta_{V2}$ ) für die normale Vorhersage und  $0,85 \text{ ms}^{-1}$  ( $\Delta_{N1} - \Delta_{N2}$ ) für die Nudging-Simulation (Vergleich Abbildung 11, oben links und oben rechts). Die Differenz im mittleren Fehler zwischen COSMO-eu und COSMO-de kommt von unterschiedlichen Rauigkeiten der Landoberfläche, die nach Betrachtung der Ergebnisse aller Stürme in Abschnitt 3.3 im darauf folgenden Abschnitt 3.4 genauer untersucht und dessen Ursachen aufgezeigt werden.

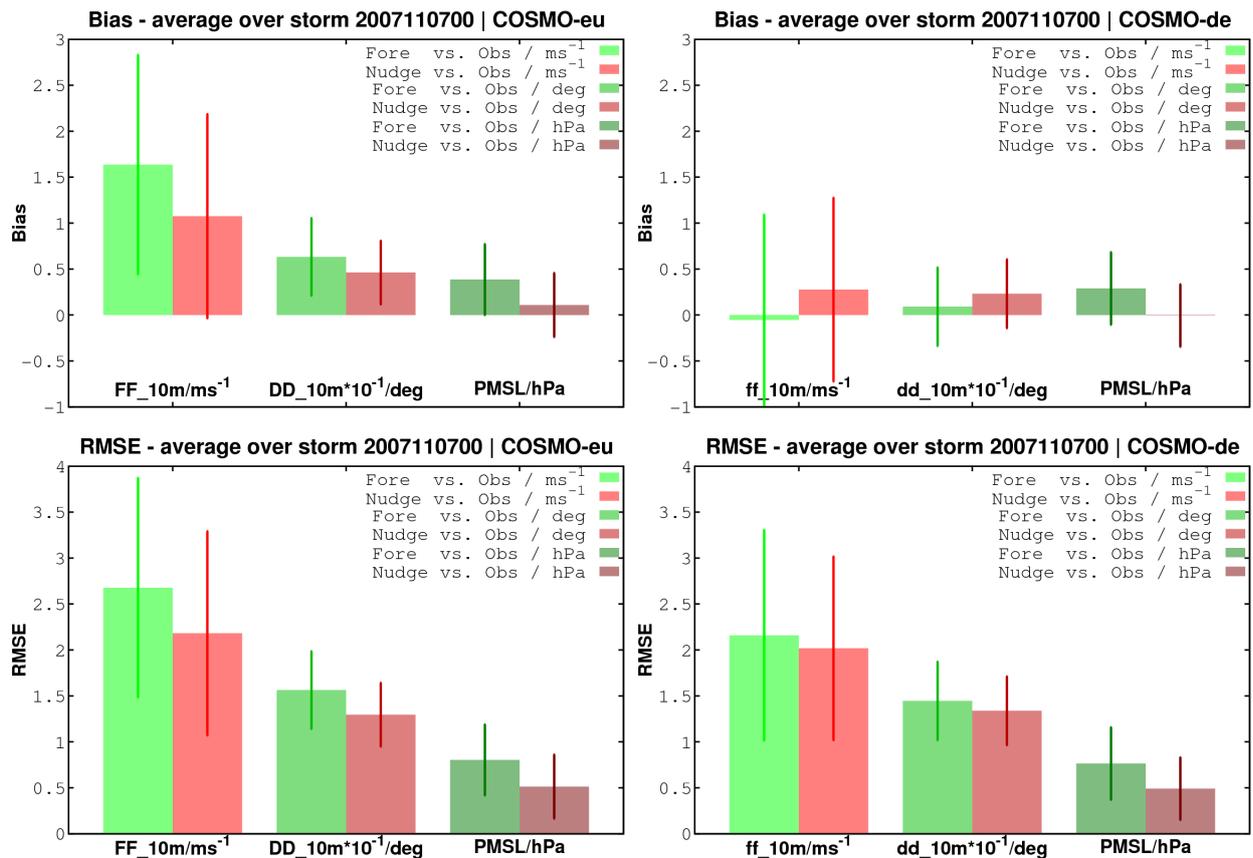


Abbildung 11: Die 4 Grafiken zeigen den mittleren Fehler (bias, oben) und den RMSE (unten) der COSMO-eu Simulationen (links) ohne Nudging (grün) und mit Nudging (rot) für Sturm Tilo (Nr. 35, 2007). Die zwei linken Balken einer Grafik zeigen die Ergebnisse für die Windgeschwindigkeit, die beiden mittleren Balken für die Windrichtung und die rechten Balken für den auf NN reduzierten Bodendruck.

Bei der Betrachtung des 10m-Windfeldes von COSMO-de während Sturm Tilo fielen kleinräumige längliche Strukturen in Windrichtung und mit großen Gradienten der Windgeschwindigkeit quer zur Windrichtung über der Nordsee auf. Der Gradient von FF\_10m erreichte dabei bis zu  $4 \text{ ms}^{-1}$  auf wenigen 3-5 Kilometern Ausdehnung (siehe Abbildung 12, links). Vermutlich entstanden die beobachteten Strukturen durch Ekman-Instabilitäten in der Grenzschicht, wie sie Lilly (1966) beschreibt, die sich erst bei einer hohen horizontalen Auflösung im Modell bilden können. Sie traten mutmaßlich auch in Realität auf, allerdings wahrscheinlich nicht genau an diesen Stellen. Für genauere Simulationen sollte die Maschenweite noch etwas verringert werden. Es wurde versucht die dazu gehörenden Wolkenstrukturen mittels Satellitendaten zu verifizieren, jedoch war die Auflösung der Satellitendaten zu grob (minimal 4 km) und es durfte zum Zeitpunkt des Auftretens keine flächendeckende hohe und mittelhohe Bewölkung vorhanden sein. Abbildung 12, rechts, zeigt den zum linken Bild gehörenden Vertikalschnitt quer zur Windrichtung. Es ist zu sehen, dass sich der Gradi-

ent der Windgeschwindigkeit bis in die obere Grenzschicht fortsetzt und die eingezeichnete Stromfunktion Ansätze zu Grenzschichtrollen mit der Längsachse in Windrichtung zeigt.

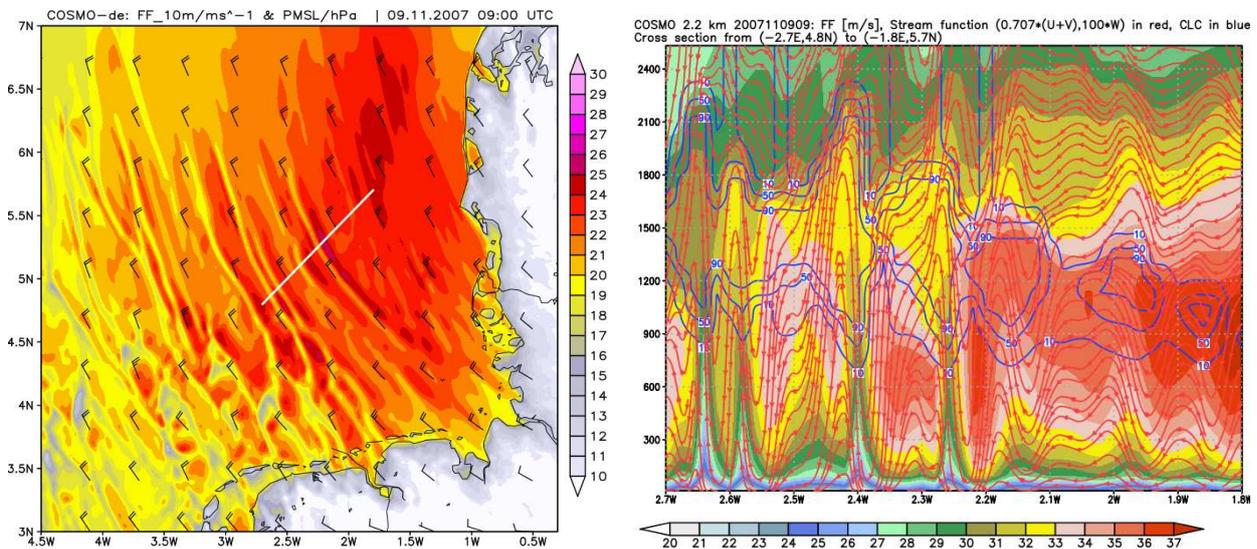


Abbildung 12: Links ist das Windfeld über der Nordsee in 10m Höhe der COSMO-de Simulation ohne Nudging am 09.11.2007, 9 UTC, zu sehen. Die weiße Linie markiert den Bereich des Vertikalschnitts, der auf der rechten Seite zu sehen ist. Farbig ist die Windgeschwindigkeit dargestellt und die Koordinaten zeigen das rotierte Gitter an, auf dem COSMO gerechnet wird (um ein regelmäßiges Gitter zu haben, da die Meridiane polwärts immer enger zusammenrücken. Bei COSMO ist der Nordpol verschoben auf  $40,0^\circ\text{N}$  und  $-170,0^\circ\text{W}$ .). Im Vertikalschnitt rechts ist die Windgeschwindigkeit wiederum farbig dargestellt (Achtung: andere Skala und Farben wie in der linken Grafik!). Die roten Isolinien zeigen die Stromfunktion und die blauen die Wolkenbedeckung.

### 3.3 Allgemeine Ergebnisse

Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf das Mittel aller verfügbaren Messstationen (siehe Tabelle 2) und zeitlich gemittelt über jeweils ein Sturmereignis, wenn nicht anders angegeben. Die Differenzen geben immer “Modellvorhersage–Beobachtung“ an.

Den auf Meereshöhe reduzierten Druck zeigt Abbildung 13. Der mittlere Fehler von PMSL schwankt für die COSMO-eu Vorhersagen zwischen  $-0,2$  hPa und  $+0,9$  hPa und ist im Durchschnitt leicht positiv. Die Werte der Nudging-Simulationen liegen zwischen  $-0,2$  hPa und  $+0,1$  hPa. Ein mit minimalen Abweichungen gleiches Bild zeigt COSMO-de. Die Varianz der Stationen untereinander hat dieselbe Größenordnung wie die Differenz der Messungen zu den Modellergebnissen. Bei Betrachtung des RMSE ist ein Schnitt zwischen aktuelleren und älteren Stürmen zu erkennen. Bis Sturm 11 (1981) zeigten die normalen Vorhersagen des COSMO-eu Werte zwischen  $1,4$  hPa und  $1,8$  hPa, wobei Sturm 8 (Capella-Orkan, 1976) diese mit  $2$  hPa sowohl in den Vorhersagen und Nudging-Simulationen übertraf. Die anderen Nudging-Läufe bis Sturm 11 hatten einen RMSE von  $0,8$  hPa bis  $1,2$  hPa. Ab Sturm 12

(1983) blieben die Werte der Vorhersage- bzw. Nudging-Läufe relativ konstant bei 0,5 bis 1,1 hPa bzw. 0,2 bis 0,7 hPa. Die Werte für PMSL von COSMO-de folgten denen von -eu mit einem im Durchschnitt minimal höheren RMSE (circa 0,05 hPa). Bis auf zwei Stürme (Nr. 6 und 13) lieferten die Nudging-Simulationen gemittelt bessere Ergebnisse als die normalen Vorhersagen. Auffallend sind die höheren Abweichungen bei älteren Stürmen und speziell der hohe RMSE bei Sturm 8 (siehe Abschnitt 3.2).

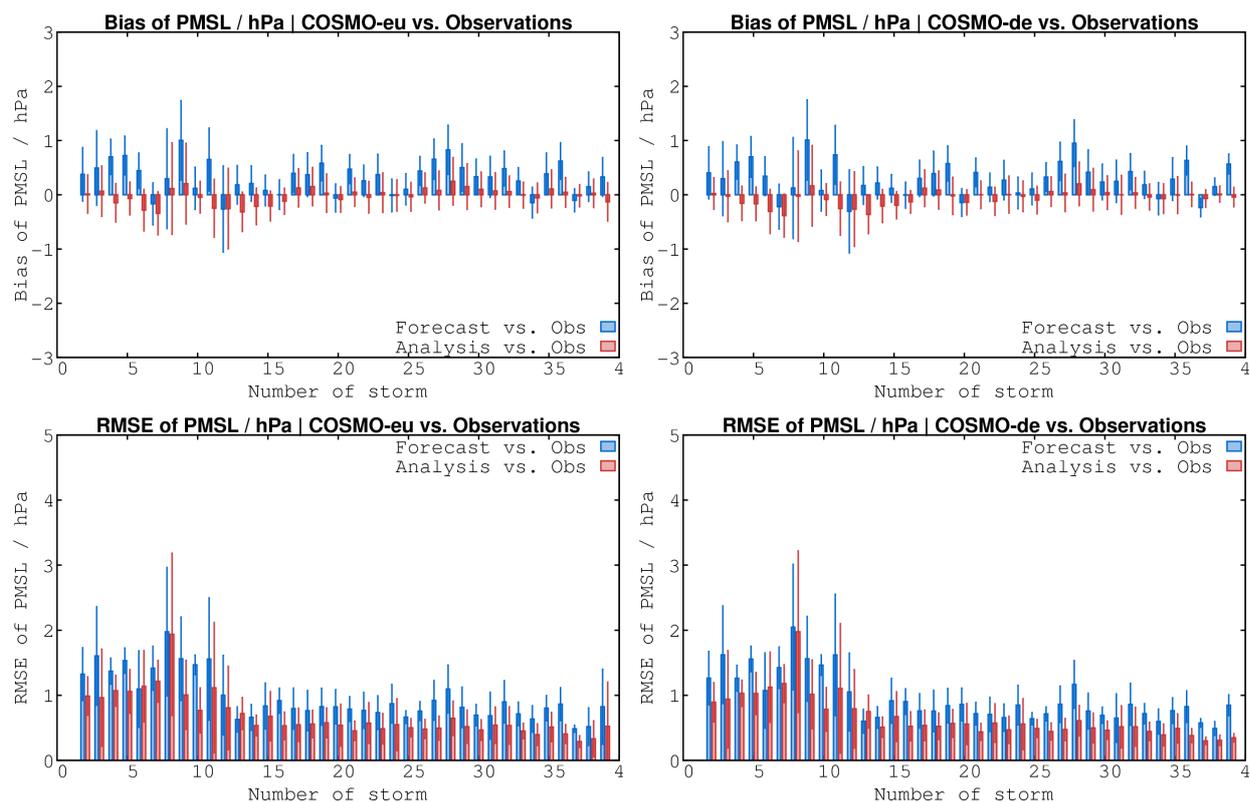


Abbildung 13: Die 4 Grafiken zeigen den RMSE und mittleren Fehler (bias) des auf Meereshöhe reduzierten Bodendrucks für COSMO-eu und COSMO-de, gemittelt jeweils über einen Sturm. Oben links ist der mittlere Fehler von COSMO-eu dargestellt, oben rechts der mittlere Fehler von COSMO-de, unten links der RMSE von COSMO-eu und unten rechts der RMSE von COSMO-de. Die blauen Balken zeigen die normalen Vorhersagen und die roten Balken die Nudging-Analysen. Die dünnen Balken repräsentieren die Varianz der zur Verifizierung hinzugezogenen synoptischen Stationen untereinander.

Abbildung 14 zeigt die Verifikation der Windgeschwindigkeit in 10m Höhe. Der mittlere Fehler der Vorhersagen ohne Nudging von COSMO-eu lag zwischen  $-0,2 \text{ ms}^{-1}$  und  $+1,8 \text{ ms}^{-1}$ , im Durchschnitt bei  $+0,73 \text{ ms}^{-1}$ . Die Nudging-Simulationen reduzierten den positiven mittleren Fehler und lagen zwischen  $-0,3 \text{ ms}^{-1}$  und  $+1,3 \text{ ms}^{-1}$ , durchschnittlich bei  $+0,35 \text{ ms}^{-1}$ . Cosmo-de zeigte einen negativen mittleren Fehler von durchschnittlich  $-0,37 \text{ ms}^{-1}$  (Bandbreite von  $-1,8 \text{ ms}^{-1}$  bis  $+1,0 \text{ ms}^{-1}$ ) für die Vorhersagen und  $-0,31 \text{ ms}^{-1}$  mit

der gleichen Bandbreite für die Nudging-Analysen. Die Varianzen der einzelnen Stationen untereinander waren leicht höher als die Abweichungen selbst. Im RMSE war wiederum ein Unterschied zwischen den älteren und neueren Simulationen zu sehen. Der RMSE der normalen Vorhersagen der Stürme 2 bis 12 von COSMO-eu lag zwischen  $2,5 \text{ ms}^{-1}$  und  $3,4 \text{ ms}^{-1}$ , der der aktuelleren Stürme zwischen  $1,7 \text{ ms}^{-1}$  und  $2,7 \text{ ms}^{-1}$ . Für COSMO-de waren es  $2,7 \text{ ms}^{-1}$  bis  $3,9 \text{ ms}^{-1}$  für die älteren Ereignisse und  $1,9 \text{ ms}^{-1}$  bis  $2,9 \text{ ms}^{-1}$  für die aktuelleren Fälle. Die Nudging-Simulationen hatten meistens einen geringeren RMSE. Für COSMO-eu hatte er die Bandbreite von  $2,2 \text{ ms}^{-1}$  bis  $3,4 \text{ ms}^{-1}$  für die Stürme 2 bis 12 und  $1,5 \text{ ms}^{-1}$  bis  $2,3 \text{ ms}^{-1}$  für die restlichen Stürme. Bei COSMO-de reichte er von  $2,2 \text{ ms}^{-1}$  bis  $4,0 \text{ ms}^{-1}$  für die Ereignisse 2 bis 12 und von  $1,6 \text{ ms}^{-1}$  bis  $2,8 \text{ ms}^{-1}$  für die aktuelleren Stürme. Insgesamt wiesen die Simulationen mit dem Nudging-Verfahren bei COSMO-eu nur 6 von 38 mal schlechtere Werte im RMSE auf, wobei dies nur bei älteren Ereignissen auftrat (Stürme 2, 5, 7, 8, 9, 15). Bei COSMO-de lagen die Werte von Simulationen mit Nudging und ohne Nudging insgesamt näher zusammen. Hier hatten 9 Nudging-Simulationen schlechtere RMSE-Werte (Stürme 2, 5, 8, 9, 15, 19, 23, 28), jedoch waren die Differenzen bei den aktuelleren Ereignissen sehr gering.

Die Verifikation der Windrichtung auf 10m Höhe zeigt Abbildung 15. Der mittlere Fehler der Vorhersagen lag zwischen  $+0^\circ$  und  $+17^\circ$  (durchschnittlich  $4,85^\circ$ ), der der Nudging-Simulationen zwischen  $-2^\circ$  und  $+8^\circ$  (durchschnittlich  $2,45^\circ$ ). Der mittlere Fehler folgt dem Muster der Windgeschwindigkeit, denn ein positiver mittlere Fehler würde eine zu geringe Drehung des Windes in Bodennähe bedeuten, was wiederum eine zu geringe Bodenrauigkeit als Ausgangspunkt hätte. Bei COSMO-de lag der durchschnittliche mittlere Fehler bei  $1,89^\circ$  für die Nudging-Simulationen bzw.  $1,18^\circ$  für die Vorhersagen ohne Nudging (Mittel über alle Stürme, siehe Abbildung 15), das heißt eine Verringerung um knapp  $3^\circ$  bei den normalen Vorhersagen und  $1,2^\circ$  bei den Nudging-Simulationen gegenüber COSMO-eu (Differenz der durchschnittlichen mittleren Fehler von COSMO-eu und COSMO-de). Der RMSE der COSMO-eu und COSMO-de Simulationen zeigte ähnliche Ergebnisse. Dabei gab es in einigen neueren Simulationen deutliche Reduzierungen der Fehler in den Nudging-Läufen (Stürme 17, 21, 25, 31 und 38). Nur der RMSE von drei Stürmen zeigte höhere Fehler der Nudging-Simulationen in Bezug zu den normalen Vorhersagen (Stürme 2, 5, 7 und 8).

Alle 3 Größen, PMSL, FF\_10m und DD\_10m, hatten die größeren Fehler bei den älteren Ereignissen, das heißt es ist eine deutliche Verbesserung der Vorhersagen ab Sturm 13 (Sprung von 1983 nach 1988) zu sehen. Die Nudging-Läufe verbesserten die Simulationen ab Sturm 11, 1981, deutlich, das heißt es gab keine negativen Ausreißer mehr mit größeren Fehlern. Zurückzuführen ist dies auf einen Sprung der verfügbaren Beobachtungen von Sturm 10 zu 11 (1979 nach 1981) und auf die verbesserten Eingangsdaten (die unter anderem auch von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Beobachtungen abhängen) und der 4D-Var (siehe Abschnitt 2.1) der ERAInterim-Reanalyse. Ältere Nudging-Simulationen, 1979 und

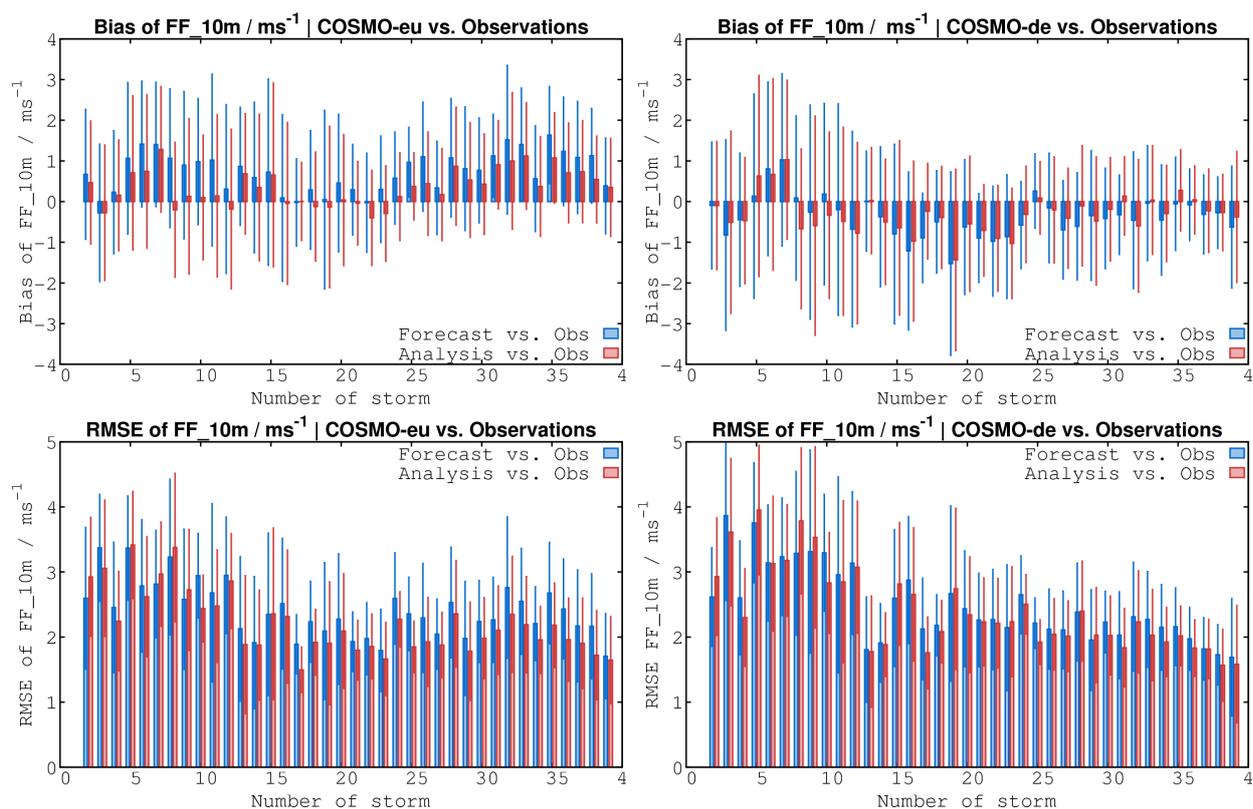


Abbildung 14: Die 4 Grafiken zeigen den RMSE und mittleren Fehler (bias) der Windgeschwindigkeit in 10m Höhe für COSMO-eu und COSMO-de, gemittelt jeweils über einen Sturm. Oben links ist der mittlere Fehler von COMSO-eu dargestellt, oben rechts der mittlere Fehler von COSMO-de, unten links der RMSE von COSMO-eu und unten rechts der RMSE von COSMO-de. Die blauen Balken zeigen die normalen Vorhersagen und die roten Balken die Nudging-Analysen. Die dünnen Balken repräsentieren die Varianz der zur Verifizierung hinzugezogenen synoptischen Stationen untereinander.

früher, zeigten nur teilweise eine Verbesserung in der Vorhersage, es gibt aber auch deutliche Verschlechterungen (z.B. bei Sturm 8, 1976). Die Ursachen dafür werden in Abschnitt 3.5 beschrieben. Auffallend sind außerdem die Unterschiede im mittleren Fehler der Windgeschwindigkeit und Windrichtung der Modelle COSMO-eu und -de, wie dies schon in den Einzelfallbeispielen bei der Hamburg-Sturmflut (Abschnitt 3.1) und Sturm Tilo (Abschnitt 3.2) zu sehen war. Diese werden im folgenden Abschnitt untersucht.

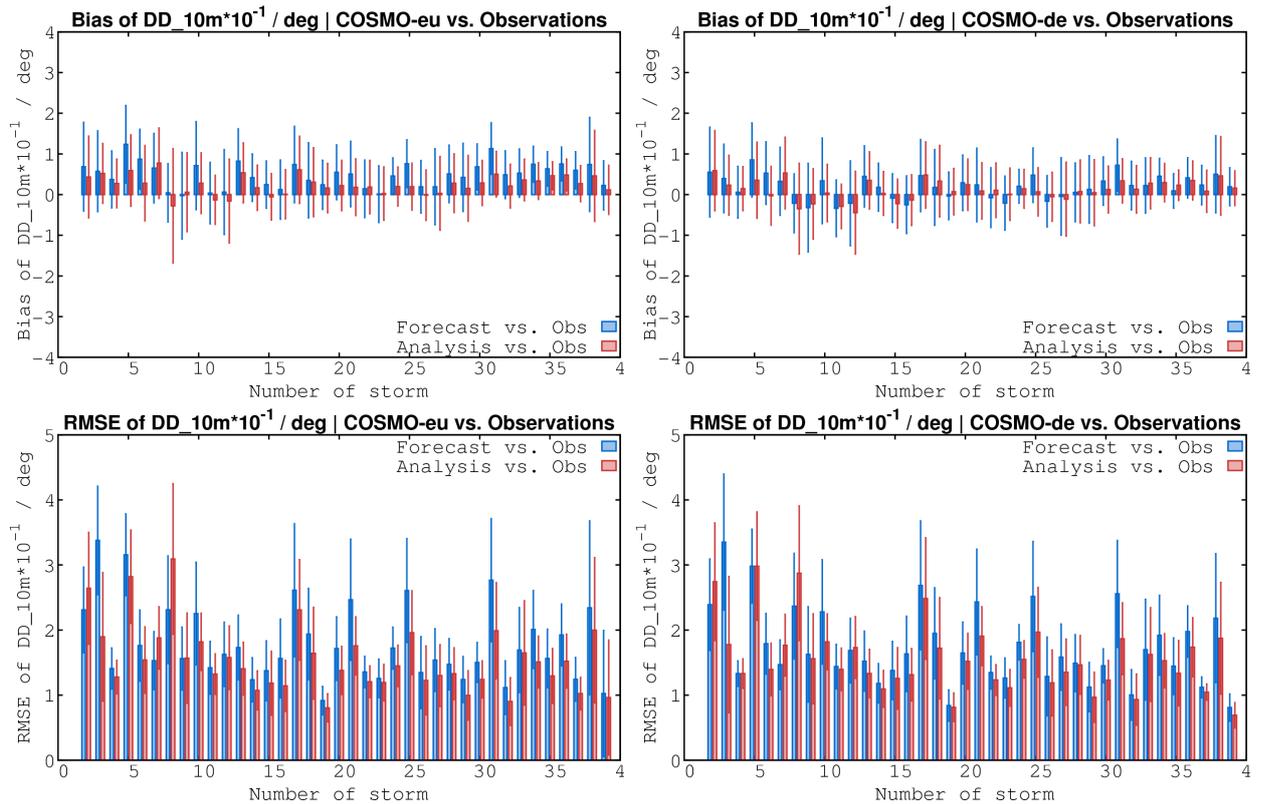


Abbildung 15: Die 4 Grafiken zeigen den RMSE und mittlere Fehler (bias) der Windrichtung in 10m Höhe für COSMO-eu und COSMO-de, gemittelt jeweils über einen Sturm. Oben links ist der mittlere Fehler von COMSO-eu dargestellt, oben rechts der mittlere Fehler von COSMO-de, unten links der RMSE von COSMO-eu und unten rechts der RMSE von COSMO-de. Die blauen Balken zeigen die normalen Vorhersagen und die roten Balken die Nudging-Analysen. Die dünnen Balken repräsentieren die Varianz der zur Verifizierung hinzugezogenen synoptischen Stationen untereinander.

### 3.4 Untersuchung der Unterschiede des mittleren Fehlers von COSMO-eu und COSMO-de im 10m-Wind

In beiden COSMO-Modellen wurden die gleichen Physik-Parametrisierungen genutzt, trotzdem hatten Windgeschwindigkeit und Windrichtung eine nicht zu vernachlässigende Differenz im mittleren Fehler. Da der 10m-Wind stark von der Bodenrauigkeit ( $z_0$ ) abhängt, wurde darin die Ursache vermutet. Je höher die Rauigkeit, desto stärker wird der Wind abgebremst und desto stärker dreht er sich in Bodennähe gegen den Uhrzeigersinn (auf der Nordhalbkugel). COSMO-de arbeitete mit den abgeleiteten Bodenrauigkeiten des Datensatzes Globcover (Arino *et al.*, 2008). Diese sollten für dieses Projekt auch im COSMO-eu eingesetzt werden, jedoch war in dem zur Verfügung stehenden Datensatz ein Fehler (Verschiebung der Landmaske bei 44°N um circa 10 km) vorhanden, so dass auf den älteren, auch

im operationellen Betrieb für COSMO-EU verwendeten GLC2000-Datensatz (Bartholomé & Belward, 2005) zurückgegriffen werden musste. Außer den unterschiedlichen Datensätzen zur Ableitung der Bodenrauhigkeit könnten die unterschiedlichen Maschenweiten der beiden Modelle, die den 10m-Wind an den küstennahen Gitterpunkten durch eine unterschiedliche Land-See-Maske beeinflussen, eine zweite Ursache sein.

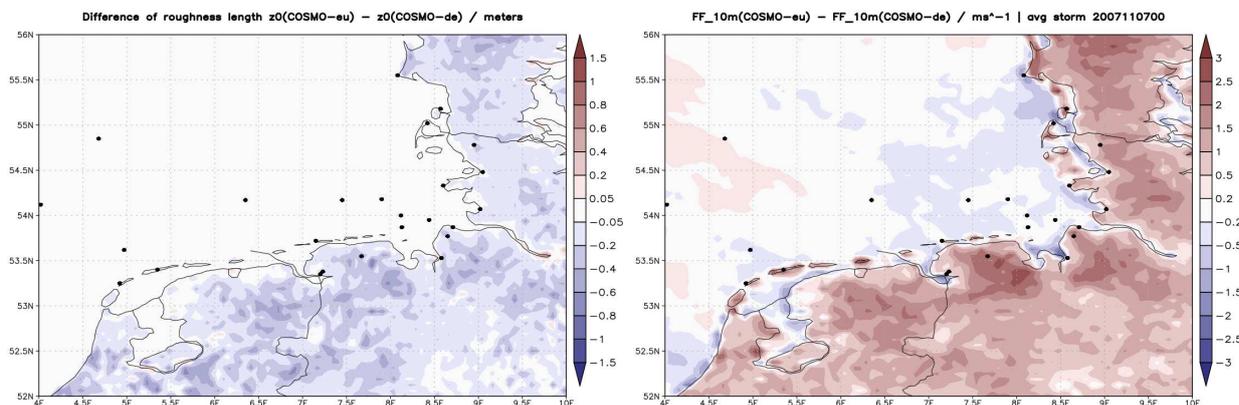


Abbildung 16: Das linke Bild zeigt die Differenz der Rauigkeitslängen zwischen CSOMO-eu und COSMO-de, abgeleitet aus den Datensätzen GLC2000 (-eu) und Globcover (-de). Rechts ist die Differenz des 10m-Windes, gemittelt über Sturm Tilo, 2007. Die schwarzen Punkte zeigen die 25 Stationen, die zur Verifikation benutzt wurden (nicht alle sind für jeden Sturm verfügbar).

Um die Differenz der Bodenrauhigkeiten zu bestimmen wurde das COSMO-de Gitter auf COSMO-eu extrapoliert. Abbildung 16 zeigt den Unterschied von  $z_0$  im Bereich der Nordsee (linkes Bild) und den Unterschied im 10m-Wind (rechtes Bild), gemittelt über Sturm Tilo, 2007. Es ist deutlich zu sehen, dass COSMO-de höhere Rauigkeitslängen im kompletten Gebiet (Küste und Binnenland) aufweist. Dadurch ist der 10m-Wind im Mittel über einen Sturm deutlich stärker, bis auf einige kleine Gebiete an der Küste, resultierend aus den unterschiedlichen Maschenweiten. Um dies zu verifizieren wurden vier Teststürme (Stürme 28, 31, 33, 35) für COSMO-eu mit dem Globcover-Datensatz nachgerechnet (dieser war im Laufe des Projekts verfügbar geworden). Dabei reduzierte sich der mittlere Fehler, gemittelt über die Stationen mit Modellgitterpunkten über Land, für Sturm 28 (Orkan Anatol), 1999, um  $0,5 \text{ ms}^{-1}$ , für Sturm 31 (Sturm Britta), 2006, um  $0,25 \text{ ms}^{-1}$ , für Sturm 33 (Orkan Kyrill), 2007, um  $0,5 \text{ ms}^{-1}$  und für Sturm 35 (Tilo), 2007, um  $0,3 \text{ ms}^{-1}$ , was eine deutliche Verbesserung der Windgeschwindigkeitsvorhersage für die Stürme darstellt. Der mittlere Fehler der Windrichtung wurde bei Sturm 28 und 33 minimal gesenkt, bei Sturm 31 minimal erhöht. Der RMSE hinsichtlich PMSL ist bei Sturm 28 minimal erhöht, bei den restlichen drei Stürmen zeigte die Änderung keine Auswirkungen (siehe Abbildung 17).

Wie in Abbildung 16, rechte Grafik, zu sehen ist hat die Auswahl des Datensatzes für die Windfelder über der See so gut wie keine Auswirkung und somit auch nicht für die Sturmflutvorhersage.

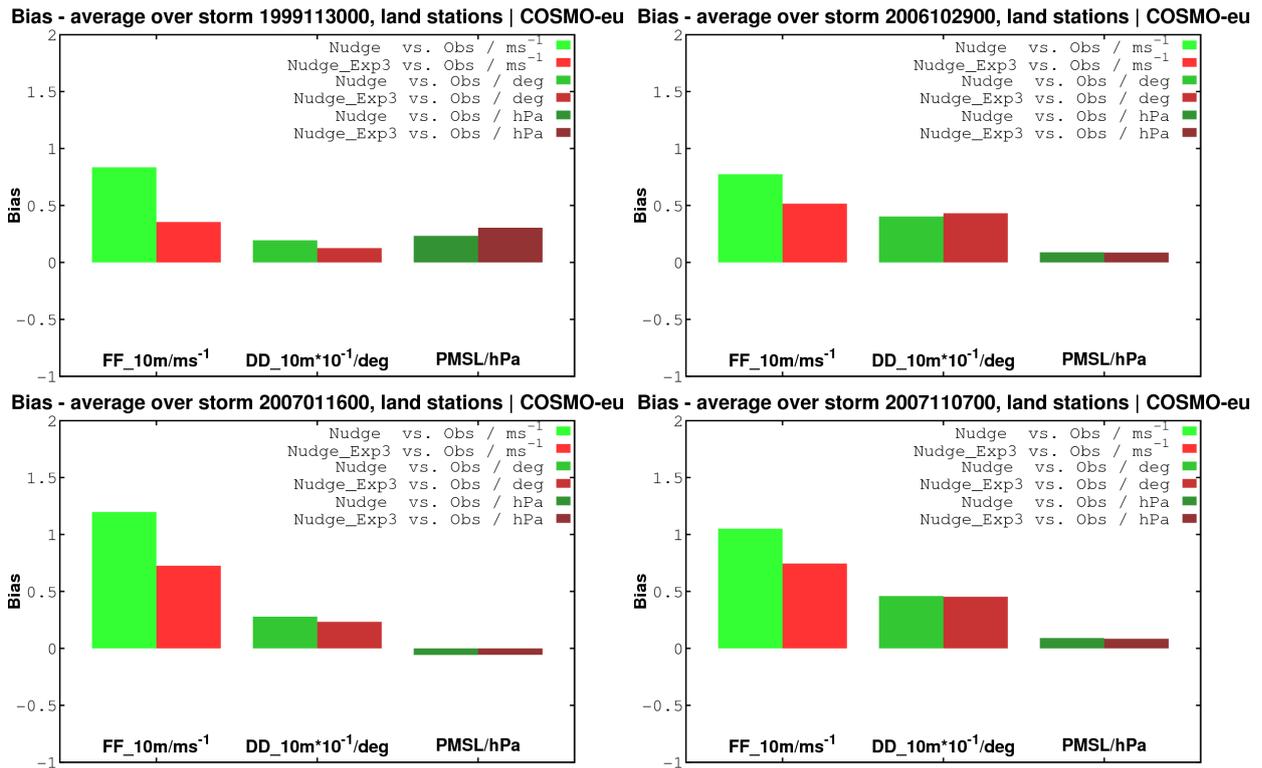


Abbildung 17: Die vier Grafiken zeigen die Ergebnisse der COSMO-eu Nudging-Simulationen unter Verwendung des Datensatzes GLC2000 zur Ableitung der Bodenrauigkeit  $z_0$  (grüne Balken) und der Globcover-Daten (rote Balken). Abgebildet sind diejenigen Stationen, die als nächsten Modellgitterpunkt einen Landpunkt besitzen. Die zwei linken Balken einer Grafik sind die Ergebnisse für die Windgeschwindigkeit, die beiden mittleren Balken für die Windrichtung und die rechten Balken für den auf NN reduzierten Bodendruck. Die linke obere Grafik zeigt die Ergebnisse für Sturm 28, rechts oben für 31, links unten für 33 und rechts unten für 35.

### 3.5 Untersuchung der Nudging-Simulationen älterer Stürme

Um die deutlich schlechteren Nudging-Läufe der Stürme bis 1980 (Sprung Sturm 10 zu 11) zu untersuchen, wurde zuerst nach Fehlern in den Beobachtungsdaten gesucht. Dort wurden anfangs keine Fehler festgestellt, das heißt keine unrealistischen Werte in den zum Nudging verwendeten Daten gefunden. Darauf wurden die Werte der Beobachtungsdaten mit der normalen Vorhersage (d.h. ohne Nudging) der Sturmflutereignisse verglichen sowie Sturmzugbahnen der normalen Vorhersagen und der Nudging-Simulationen erstellt. Beim Vergleich der Stationsdaten mit den Vorhersagen wurde festgestellt, dass einzelne Schiffsbeobachtungen auf dem Meer deutliche Druckunterschiede zu den Modellen aufwiesen, die aber alle noch im Rahmen des Qualitätschecks ( $\pm 5$  hPa) lagen. Dadurch bildeten sich kleine einzelne Tiefdruckgebilde auf dem Meer, die in der Realität nicht vorhanden waren. Dies könnte auf ein Problem der groben zeitlichen Auflösung der älteren Beobachtungsdaten hindeuten, denn die zu einem Zeitpunkt gemessenen Werte (hier: tiefer Druck) konnten dadurch stundenlang

Einfluss auf die Vorhersage haben, obwohl das reale Tief schon deutlich weiter gezogen war. Ein Extremfall war dabei Sturm 8, der Capella-Orkan 1976, bei dem dadurch das Tief in der Nudging-Analyse eine südlichere Zugbahn bekam. Abbildung 18, links, zeigt die Zugbahnen des Tiefs aus der normalen Vorhersage (rot, realistisch) und aus der Simulation mit Nudging (weiß, falsch). Der südlichere Verlauf hätte wahrscheinlich keine so hohe Sturmflut entstehen lassen, wie sie bei dem Orkan eintrat. Dass die Simulation ohne Nudging hier die wahre Zugbahn darstellt zeigt der Vergleich mit der Sturmzugbahn des Capella-Orkans aus der Abbildung der historischen Sturmzugbahnen (Abbildung 22) nach Petersen & Rohde (1991) und wird unterstützt durch die Verifikation der Modelldaten der Station List auf Sylt. Die Verifikation zeigt, dass das Windmaximum in List/Sylt am Vormittag des 3.01.1976 nur in der normalen Vorhersage, nicht aber in der Nudging-Simulation erfasst wurde (siehe Abbildung 18, rechts).

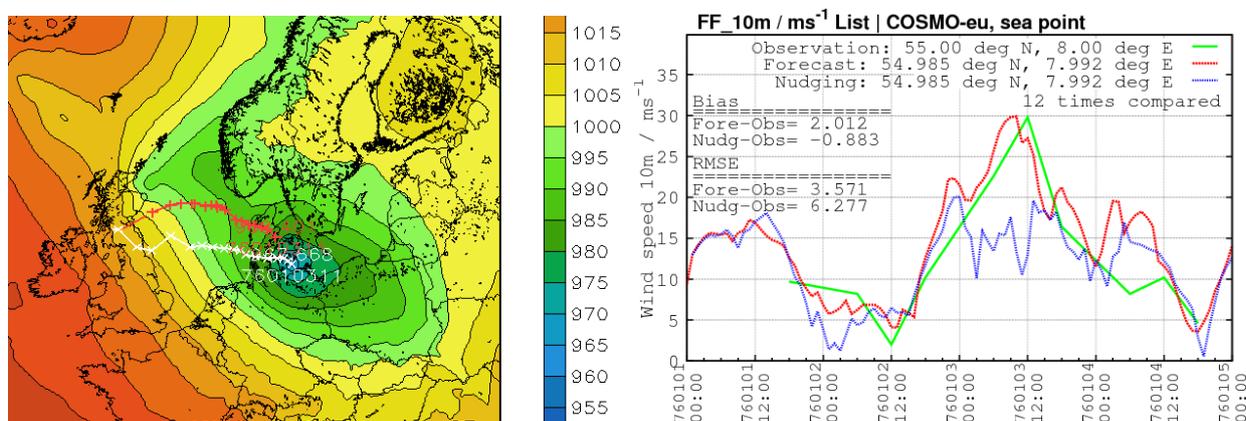


Abbildung 18: Das linke Bild zeigt die Sturmzugbahnen des Capella Orkans, 1976. Die weiße Kurve stellt die Zugbahn auf Basis der Nudging-Simulation und die rote Kurve auf Grundlage der normalen Vorhersage dar. Farblich ist PMSL in hPa dargestellt. Die rechte Grafik zeigt den Verlauf der 10m-Windgeschwindigkeit des Sturms am Standort List auf Sylt. Die grüne Kurve sind Beobachtungen (alle 3 Stunden), die rote Kurve der normale Vorhersagelauf und die blaue Kurve die Nudging-Analyse.

Es wurden alle Sturmzugbahnen der Vorhersagen und Nudging-Simulationen dargestellt und überprüft. Nach Auswertung der Ergebnisse und auf Grundlage der in Abschnitt 3.3 vorgestellten Statistiken der Stürme wurde dem NLWKN empfohlen, bei deren Berechnungen der Wasserstandshöhen für Sturmereignisse bis einschließlich 1981 nicht auf die Nudging-, sondern auf die normalen Vorhersagen zurückzugreifen.

### 3.6 Sturmzugbahnen

Einen Ansatz Stürme zu kategorisieren, die zu sehr hohen Wasserständen in der Nordsee führen, lieferte Petersen & Rohde (1991). Die Einteilung der Stürme erfolgte hierbei nach

dem Breitengrad, an dem die Tiefdruckgebiete den 8. östlichen Längengrad überschreiten. Dazu wurden hier alle Stürme aus Tabelle 1 verwendet, die einen Wasserstau von mindestens 2m am Pegel Norderney verursachten (23 Ereignisse). Die Zugbahnen all dieser Ereignisse zeigt Abbildung 23, wobei eine Sturmzugbahn hier als der Pfad des Druckminimums mit der Zeit definiert ist. Die Stürme wurden nach Petersen & Rohde (1991) in die Typen Jütland, Skagerrak und Skandinavien eingeteilt.

Der Jütland-Typ überschreitet  $8^\circ$  Ost zwischen  $55^\circ$  Nord und  $57^\circ$  Nord. Er entsteht meist an der Nordamerikanischen Küste über Neufundland und wandert schnell ostwärts über die britischen Inseln und das dänische Festland. Meistens sind die Stürme von kurzer Dauer, aber mit enormen Windgeschwindigkeiten, die anfangs aus Südwest kommen und später auf Nordwest drehen. Den größten Einfluss haben sie meist auf die Westküste Schleswig-Holsteins und das Elbästuar. Ein Beispiel hierfür ist der Capella-Orkan, Anfang Januar 1976. Dessen Verlauf in 4-stündigen Intervallen von PMSL, FF\_10m und DD\_10m zeigt Abbildung 25, die Sturmzugbahn zeigt Abbildung 23 im oberen Bild. Er zog aus Westen kommend auf die Britischen Inseln zu, überquerte diese und wanderte unter rascher Vertiefung und einem leichten nördlichen Bogen ost-südostwärts auf Norddänemark zu (siehe Abbildung 23, oben). Dadurch schob er das Wasser mit starken Windgeschwindigkeiten aus Nordwesten in die deutsche Bucht. Von den 23 untersuchten Stürmen waren 5 von diesem Typ (Sturm 2, 3, 8, 12 und 28 nach Tabelle 1).

Der Skagerrak-Typ ist durch sehr hohe Wasserstände gekennzeichnet, die meist die ganze Nordsee betreffen. Er ist der am häufigsten vorkommende Typ (siehe auch Petersen & Rohde (1991)) und kreuzt den 8. Längengrad Ost zwischen  $57^\circ$  Nord und  $60^\circ$  Nord und zieht somit über das Skagerrak. Von den 23 Stürmen waren 11 vom Typ Skagerrak (Sturm 5, 6, 7, 10, 16, 22, 24, 25, 31, 34 und 35 nach Tabelle 1), beispielsweise der in Abschnitt 3.2 beschriebene Sturm Tilo, 2007 (den 6-stündigen Verlauf zeigt Abbildung 29, die Zugbahn zeigt Abbildung 23 im oberen Bild).

Zwischen  $60^\circ$  Nord und  $65^\circ$  Nord kreuzt der Skandinavien-Typ  $8^\circ$  Ost. Tiefdruckgebiete diesen Typs haben ihren Ursprung meist zwischen Grönland und Island und wandern langsam südostwärts. Obwohl sie meistens nicht so hohe Windgeschwindigkeitsspitzen wie die anderen beiden Typen aufweisen, wird in die deutsche Bucht über eine sehr lange Zeit viel Wasser gedrückt, da sie eine große Verweildauer haben. Ein Beispiel hierfür ist die Hamburg-Sturmflut von 1962, deren 6-stündigen Verlauf Abbildung 24 zeigt. Der Sturm entstand zwischen Grönland und Island und entwickelte sich unter langsamer südöstlicher Zugbahn zu einem großen Tiefdruckgebiet im Nordatlantik. Dadurch drückte er auf seiner Südwestseite über mehrere Tage das Wasser in die Nordsee (Zugbahn: siehe Abbildung 23, oberes Bild). Von den 23 höchsten Wasserständen am Pegel Norderney waren 6 von diesem Typ (Sturm 1, 9, 11, 19, 27 und 29 nach Tabelle 1). Ein Sturm überquerte nach dem hier verwendeten Tracking-Algorithmus den 8. Längengrad Ost nicht (Sturm 4). Das absolute

Druckminimum blieb hier stationär auf dem Nordatlantik liegen, während ein kleines Randminimum weiter nach Osten zog. Das Randminimum war vom Skandinavien-Typ. Wenn die Stürme von ihrem Ursprung bis zu ihrem Eintreffen in der Nordsee verfolgt werden, können einige auch als eine Mischung mehrerer Kategorien gesehen werden (Gönnert *et al.*, 2001), wie zum Beispiel Sturm 10, 1977, der vor Grönland startete (Skandinavien-Typ), aber lange Zeit eine fast rein südliche Zugbahn einschlug und erst vor der Südwestspitze Norwegens wieder eine stärkere östlichere Komponente bekam (siehe Abbildung 23, oben), so dass er nach der Kategorisierung von Petersen & Rohde (1991) ein Skagerrak-Typ war. Abbildung 19 zeigt die Windspitzen in 10m Höhe (Böen, d.h. kein 10-Minuten Mittelwind, wie bisher immer betrachtet) während eines Sturmes von COSMO-eu für das ganze Gebiet und für die Nordsee. Obwohl die Stürme vom Skandinavien-Typ sehr hohe Wasserstände aufwiesen (beispielsweise Sturm 1 mit 297cm und Sturm 9 mit 275cm Stau, siehe Tabelle 1), gehörten sie mit ihren Windspitzen von 40 bis 45  $\text{ms}^{-1}$  nicht zu denjenigen mit den höchsten Böen (Ausnahme: Sturm 19). Die höchsten Windspitzen (nach COSMO-eu) über der Nordsee erreichte Orkan Anatol, 1999, Sturm 28, vom Typ Jütland mit knapp 55  $\text{ms}^{-1}$ . Die höchsten Wasserstände wurden dabei in Dänemark und im Norden Schleswig-Holsteins erreicht, da es ein kleines und schnelles Tief war, das das Wasser mit seinen stärksten Windkomponenten mehr aus Westen als Nordwesten (was für die höchsten Wasserstände am Pegel Norderney notwendig wäre) gegen das Festland drückte.

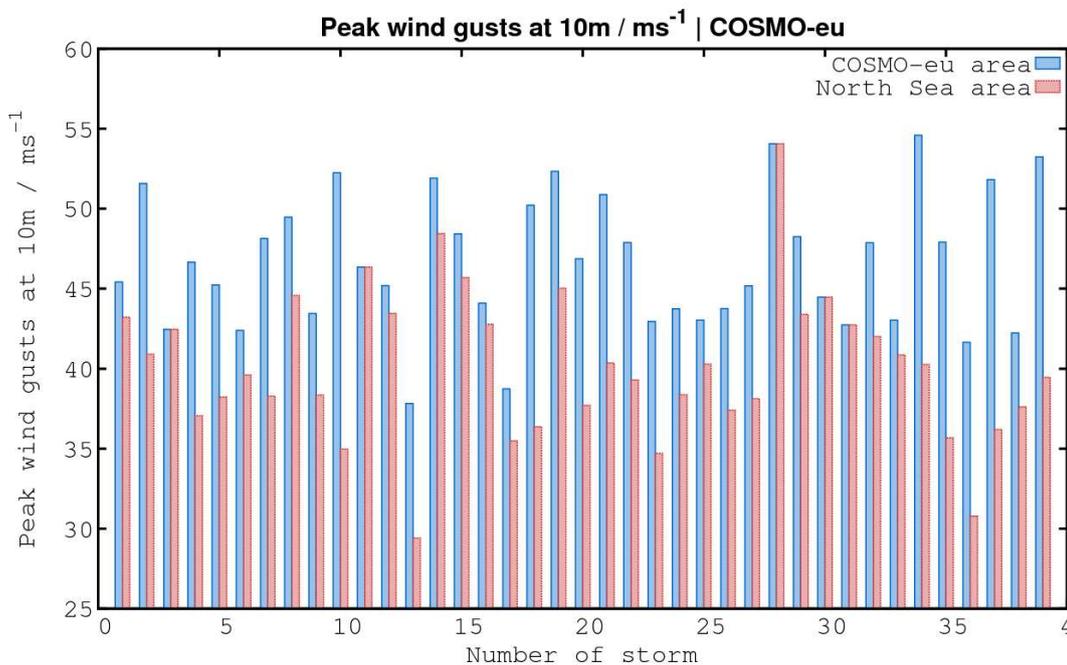


Abbildung 19: Maximale Windböen in 10m Höhe der 39 Sturmereignisse des Modells COSMO-eu für das ganze Gebiet (blau) und für die Nordsee (rot).

### 3.7 Sturm Index

Nachdem die Zugbahnen der Stürme berechnet waren, gab es die Frage welche weiteren Informationen daraus ableitbar wären. Die Idee war einen Sturm Index zu erstellen, um zu untersuchen, ob es eine einfache Korrelation zwischen der Größe eines Sturmes, der Zuggeschwindigkeit des Tiefkerns und dem Kerndruck gegenüber der maximalen simulierten Windgeschwindigkeit oder dem Stau am Pegel Norderney gab. Dazu wurde die Zeitspanne sechs Stunden vor dem Eintreten des Höchstwasserstandes bis zum höchsten Pegel bei Norderney betrachtet und zu jeder dieser sechs Stunden die räumliche Ausdehnung eines Sturms berechnet, der Kerndruck bestimmt und aus diesen jeweils ein 6-Stundenmittel gebildet. Die Strecke wurde zur Vereinfachung als gerade angenommen und die Zuggeschwindigkeit über die Entfernung der Kerndrücke zwischen der Stunde des Höchstwasserstandes und sechs Stunden vorher berechnet. Es waren somit für jeden Sturm ein Wert für dessen Ausdehnung, Kerndruck und Zuggeschwindigkeit vorhanden. Jeder dieser drei Parameter wurde auf einen Wert zwischen 0,1 und 1 normiert. Ein niedriger Kerndruck hatte einen großen Wert, ein großer Sturm hatte einen großen Wert und ein langsam ziehender Sturm hatte einen großen Wert. Die drei Parameter wurden in verschiedenen Kombinationen zueinander zu einem Index zusammengefasst und darauf gegen die Windmaxima von COSMO-eu und COSMO-de und den maximalen Stau am Pegel Norderney, sowohl für das ganze eu-Gebiet, als auch nur für den Bereich der Nordsee aufgetragen.

Abbildung 20 zeigt den Sturmindex auf der Abszisse und die Windmaxima von COSMO-eu über dem Gebiet der Nordsee auf der Ordinate. In diesem Fall wurden die 3 Parameter Größe, Zuggeschwindigkeit und Kerndruck aufaddiert, das heißt der Index ist größer je tiefer der Kerndruck ist, je größer die Ausdehnung des Sturms ist und je langsamer die Zuggeschwindigkeit ist. Wie bei allen anderen getesteten Kombinationen war keine deutliche Korrelation der Werte erkennbar. Eventuell könnte ein erweiterter Sturmindex, zum Beispiel unter Beachtung der Kategorisierung der Stürme (wie in Abschnitt 3.6) oder der zeitlichen Entwicklung eines Sturmes (z.B. Vertiefung des Kerndrucks mit der Zeit), bessere Korrelationen liefern.

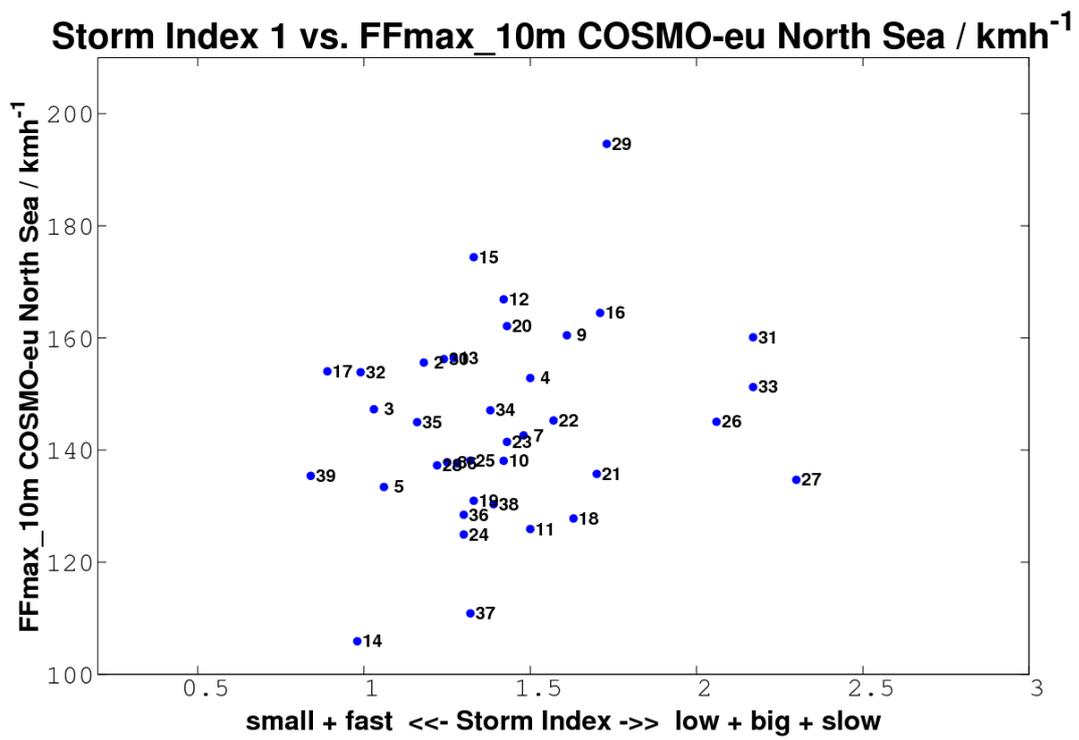


Abbildung 20: Korrelation zwischen der maximalen Windgeschwindigkeit (Ordinate) und des Sturmindex (Abszisse). Die Zahlen neben den Punkten geben die Sturmnummern aus Tabelle 1 an.

## 4 Sensitivitätsuntersuchungen

Um die Sensitivität der Modelle, vor allem in Bezug auf das Windfeld gegenüber der Turbulenzparametrisierung zu testen, wurden Experimente mit veränderten Parametern im Turbulenzschema des COSMO-Modells durchgeführt. Die Tests liefen für COSMO-eu mit Nudging und es wurden vier aktuellere Stürme (Nummer: 28, 31, 33 und 35) dafür ausgewählt, um mehr Beobachtungsdaten für die Verifikation zu haben. Da es seit Projektbeginn 2011 einige Neuerungen im COSMO-Modell gab, beispielsweise gibt es seit Version 4.24 einen neuen "fast-waves solver" (Lösung der Gleichung für Schall- und Schwerewellen), siehe Baldauf (2013), wurde die aktuellste COSMO-Version (zum Simulationszeitpunkt: Version 4.29, jetzt aktuell: 5.0.1.2, Stand: September 2014) genutzt, um die Experimente durchzuführen. Da die 39 Sturmflutereignisse für COSMO-eu mit der Version 4.22 simuliert wurden, wurden alle vier Stürme sowohl mit der Standardparametrisierung gerechnet, um die Auswirkung der Versionsänderung des COSMO Modells abzuschätzen, und mit Änderungen der folgenden Parameter (nach Absprache mit dem Entwickler des Turbulenzmoduls): "itype\_sher" bzw. "a\_hshr", "c\_sea" und "rat\_sea". Mit "itype\_sher=3" wird die Produktion von TKE (Turbulente Kinetische Energie) durch horizontale Scherung des Windes eingeschaltet (im Standard ist nur die vertikale Scherproduktion eingeschaltet) und auf den Wert "a\_hshr=0,2" gesetzt, wobei "a\_hshr" ein dimensionsloser Faktor der Längenskala ist. Dies bedeutet eine zusätzliche Scherproduktion im Modell. Insbesondere an Fronten treten auch stärkere horizontale Scherungen auf. Der Skalierungsfaktor für die laminare Grenzschicht über Wasser, "rat\_sea", hat Auswirkung auf die Entstehung von Stürmen, insbesondere auf die Verdunstung. Für kleine Werte von "rat\_sea" wird die Verdunstung erhöht und damit die Zyklonen vertieft, für große Werte umgekehrt. Er ist auch dimensionslos, besitzt den Standardwert 20,0 und wurde mit 2,0 und 100,0 getestet. Der Wert "c\_sea" ist ein dimensionsloser Parameter, der die Rauigkeitslänge für Skalare über Wasser beschreibt. Je größer der Wert, desto kleiner ist der Widerstand und umso größer die Windgeschwindigkeit. Dieser Parameter wurde mit dem Wert 2,5 getestet, der Standard ist 1,5 (siehe Tabelle 3).

Um abzuschätzen, ob Neuerungen im COSMO-Modell sichtbare Änderungen in den Vorhersagen hatten, wurde zuerst Experiment 12 betrachtet, der Vergleich von COSMO-eu Version 4.22 zu Version 4.29 mit exakt den gleichen Einstellungen. Unterschiedlich waren jedoch die Rauigkeitslängen über Land, die bei den 39 Sturmflutereignissen aus dem GLC2000-Datensatz abgeleitet wurden und bei den Experimenten aus dem Globcover-Datensatz (siehe auch Abschnitt 3.4). Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse zwischen Version 4.22 und 4.29 berücksichtigt werden. Tabelle 4 zeigt die neuen Werte des mittleren Fehlers und RMSE für PMSL und FF\_10m der Version 4.22 und der Referenzergebnisse (Experiment 12). Die Differenzen des mittleren Fehlers des Drucks lagen zwischen 0,03 und 0,07 hPa über einen Sturm und alle verfügbaren Stationen gemittelt. Die Differenzen des

Exp.	Parameter	Standard	neu	Beschreibung
9	a_hshr	0	0,2	Horizontalscherung der TKE
10	c_sea	1,5	2,5	Rauigkeitslänge d. Skalare ü. Wasser
11	rat_sea	20.0	2.0	Skalierung d. laminaren Grenzschicht ü. Wasser
12	–	–	–	Referenz Version 4.29
13	rat_sea	20.0	100.0	Skalierung d. laminaren Grenzschicht ü. Wasser

*Tabelle 3:* Die Tabelle zeigt die Experimente zu den Sensitivitätsuntersuchungen der Turbulenzparametrisierung im COSMO-Modell. Spalte 1 zeigt die Experimentennummer (Exp.), Spalte 2 den veränderten Parameter, Spalte 3 den Standardwert, Spalte 4 den neuen Wert und Spalte 5 eine Kurzbeschreibung des Parameters. Experiment 12 (Referenzexperiment) benutzt die Standardparametrisierung.

RMSE zwischen 0,01 hPa und 0,05 hPa. Der Unterschied des mittleren Fehlers der 10m-Windgeschwindigkeit war zwischen 0,04 und 0,15  $\text{ms}^{-1}$  (wobei durch die Flächenmittelung über das ganze COSMO-eu Gebiet die Unterschiede der Rauigkeitslängen im norddeutschen Flachland, siehe Abschnitt 3.4, nicht mehr ins Gewicht fallen) und des RMSE von 0,02 bis 0,09  $\text{ms}^{-1}$ . Von den vier Experimenten brachte das Einschalten der Horizontalscherung, Experiment 9, die geringsten Änderungen, bezogen auf das Referenzexperiment. Die maximalen Abweichungen, gemittelt über ein Ereignis, waren 0,01 hPa im RMSE und mittleren Fehler für PMSL, sowie 0,04 bzw. 0,05  $\text{ms}^{-1}$  im mittleren Fehler bzw. RMSE der Windgeschwindigkeit. Bei Änderung des Parameters “c\_sea“, Experiment 10, waren die Auswirkungen etwas stärker. Die maximale Differenz des mittleren Fehlers für den Druck war 0,06 hPa (Sturm 35) und im RMSE 0,03 hPa (Sturm 35). Die Differenzen der mittleren Fehler der Windgeschwindigkeit waren maximal 0,05  $\text{ms}^{-1}$  (Sturm 28) und 0,05  $\text{ms}^{-1}$  im RMSE (Sturm 31). Bei den Änderungen von “rat\_sea“ sind die Auswirkungen im mittleren Fehler am größten. Bei den Experimenten 11 und 13 gab es maximale Unterschiede im mittleren Fehler des Drucks von  $-0,15$  hPa (Sturm 35, ”Referenz–Experiment 11“) beziehungsweise  $+0,12$  hPa (Sturm 35, ”Ref–Exp 13“). Die maximalen Differenzen der 10m-Windgeschwindigkeit waren  $-0,09$   $\text{ms}^{-1}$  (Sturm 31, ”Ref–Exp 11“) und  $+0,26$   $\text{ms}^{-1}$  (Sturm 31, ”Ref–Exp 13“).

Gemittelt über einen Sturm und verifiziert mit den Beobachtungsstationen waren die Unterschiede zwischen den einzelnen Experimenten gering und lagen in derselben Größenordnung wie die Differenzen, die durch Änderungen am Modell stattfanden (hier: Version 4.22 zu Version 4.29, aktuell ist Version 5.0.1.2, Stand: September 2014).

Zur weiteren Verifikation wurden die 2D-Differenzfelder (Referenz–Experiment) über das gesamte COSMO-eu Gebiet betrachtet. Abbildung 30 zeigt die Differenzfelder des auf NN reduzierten Drucks der Experimente 9, 10, 11 und 13 gegenüber dem Referenzexperiment, gemittelt über den Zeitraum des Sturms Tilo, 2007. Die Abweichungen an einem Ort waren bei allen Experimenten mit maximal  $\pm 0,2$  hPa gering. Die Differenzen im Flächenmittel waren noch geringer und mit maximal  $\pm 0,018$  hPa bei den Experimenten 11

(negative Differenz) und 13 (positive Differenz) vernachlässigbar klein. Das Einschalten der Horizontalscherung hatte die geringsten Änderungen zur Folge, die Änderungen des Skalierungsfaktors der laminaren Grenzschicht die größten. Die negative Differenz von Experiment 11 und die positive von Experiment 13 geben auch die Theorie wieder, dass bei Verringerung des Wertes des Parameters "rat\_sea" die Sturmestehung gefördert wird (niedrigerer Druck, negativer mittlerer Fehler) und andernfalls reduziert wird. Auch bei der Betrachtung der 10m-Windgeschwindigkeit im zeitlichen Mittel über einen Sturm gab es mit bis zu  $\pm 1,0 \text{ ms}^{-1}$  zwischen den Experimenten und der Referenz an einem Ort (siehe Abbildung 32) nur kleine Unterschiede. Im Flächenmittel waren diese wiederum bei Experiment 11 und 13 am größten, jedoch mit maximal  $\pm 0,15 \text{ ms}^{-1}$  vernachlässigbar gegenüber den Absolutwerten.

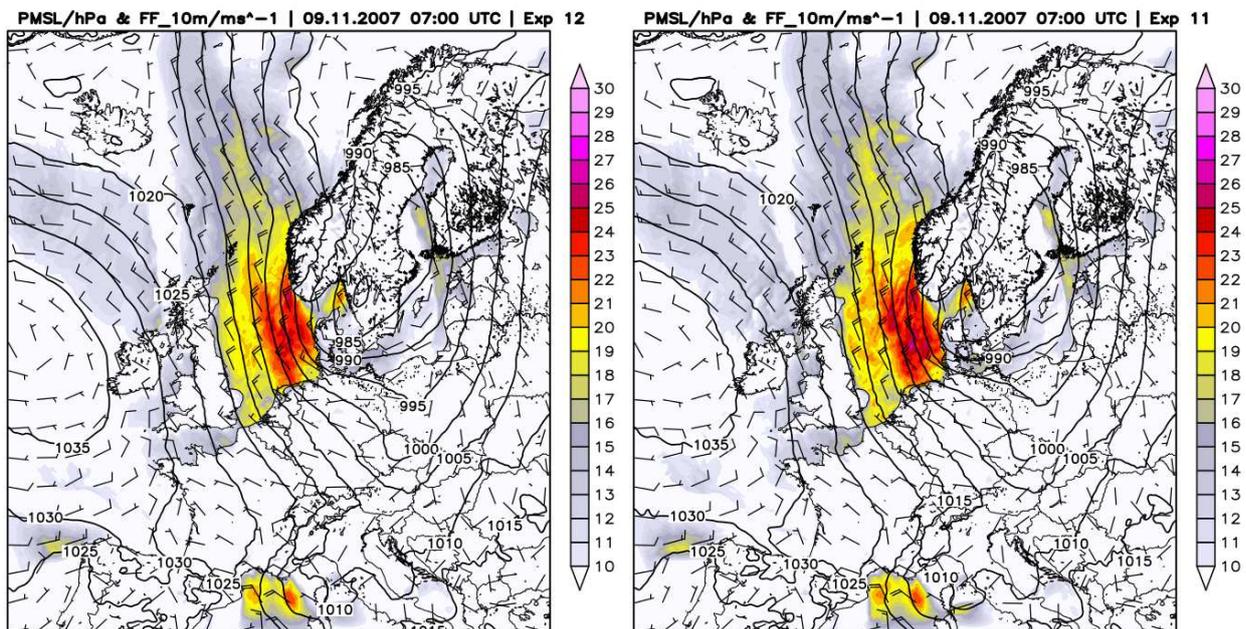


Abbildung 21: Luftdruck reduziert auf NN und Windgeschwindigkeit in 10m Höhe des Sturms Tilo (Nr. 35, 2007) am 9.11.2007, 07 UTC (d.h. Startzeitpunkt des Sturms + 55 Stunden), von Referenzexperiment 12 (links) und Experiment 11 (rechts).

Im zeitlichen Mittel über ein ganzes Sturmereignis, insbesondere im Flächenmittel waren die Unterschiede zwischen Experiment und Referenz sehr gering. Bei Betrachtung nur eines Zeitpunktes (siehe Abbildung 31), hier drei Stunden bevor der Pegel von Norderney den höchsten Wasserstand meldete, waren die Abweichungen von PMSL deutlich größer. Die Differenzen bei Experiment 9 lagen bei maximal  $\pm 0,4 \text{ hPa}$  an einem Ort und  $0,0015 \text{ hPa}$  im räumlichen Mittel. Experiment 10 hatte Abweichungen von maximal  $\pm 0,4 \text{ hPa}$  an einem Ort und  $-0,04 \text{ hPa}$  im Flächenmittel. Bei den Experimenten 11 und 13 gab es Differenzen an einem Ort bis zu  $\pm 1,6 \text{ hPa}$  und räumlich gemittelt  $-0,13 \text{ hPa}$  (Exp. 11) sowie  $0,09 \text{ hPa}$  (Exp. 13). Die Differenzen drei Stunden vor dem höchsten Wasserstand am Pegel Norderney von FF\_10m zeigt Abbildung 33. Bei Experiment 9 lagen die Differenzen bei  $\pm 2,0 \text{ ms}^{-1}$ ,

im Extremfall in einer schmalen Zone nordwestlich der britischen Inseln bei über  $2,0 \text{ ms}^{-1}$  und im Flächenmittel waren es  $0,005 \text{ ms}^{-1}$ . Größere Differenzen waren mit maximal  $\pm 3,0 \text{ ms}^{-1}$ , im Extremfall über  $5,0 \text{ ms}^{-1}$  und im Flächenmittel bei  $0,07 \text{ ms}^{-1}$  bei Experiment 10 zu sehen. Wiederum die größten Abweichungen gab es bei den Experimenten 11 und 13, bei denen örtlich zu einem Zeitpunkt  $\pm 4,0 \text{ ms}^{-1}$  oder mehr auftraten. Die größten Differenzen im Westen Schottlands und nordwestlich davon entstanden in der windschwachen Übergangszone vom Hochdruckgebiet westlich Irlands und dem Sturmtief über dem Skagerrak. Diese windschwache Zone war zwischen den verschiedenen Experimenten zonal leicht verschoben, so dass große Unterschiede auftreten konnten. Abbildung 21 zeigt die Situation des Referenzexperiments 12 (links) und des Experiments 11 (rechts), wobei zu sehen ist, dass die windschwächere Zone des Referenzexperiments etwas breiter ist und weiter nach Westen reicht. Die Differenz dieser beiden Abbildungen zeigt Abbildung 31 (links unten) für PMSL und Abbildung 33 (links unten) für FF\_10m. Im räumlichen Mittel waren die Abweichungen  $0,21 \text{ ms}^{-1}$  (Exp. 11) und  $-0,26 \text{ ms}^{-1}$  (Exp. 13). Die Ergebnisse der anderen drei Stürme (Nr. 28, 31 und 33) zeigen qualitativ die gleichen Ergebnisse wie Sturm Tilo, 2007. Die größten Abweichungen von PMSL und der 10m-Windgeschwindigkeit brachten immer die Experimente 11 und 13, wobei diese bei Experiment 13 im Betrag noch etwas höher waren.

Um die Auswirkungen auf den Spezialfall der Sturmfluten an der Nordseeküste abzuschätzen wurde das Untersuchungsgebiet, in dem das Flächenmittel gebildet wurde, über die Nordsee gelegt (von den Niederlanden bis Südwestnorwegen in zonaler Richtung und von Großbritannien bis Dänemark in meridionaler Richtung, siehe die weißen Rechtecke in den Grafiken der Abbildungen 34 bis 37) und die Windfelder mit Vorlaufzeiten von 6-48 Stunden vor Eintreffen des Höchstwasserstandes in Norderney betrachtet. Da Experiment 13 bei jedem Sturm die größten Abweichungen aufwies, wird die Betrachtung hier auf dieses Experiment beschränkt, da bei Extremereignissen wie Sturmfluten die maximalen Unsicherheiten von größter Wichtigkeit sind. Die Abweichungen der Simulationen des 6-stündigen Mittels lagen zwischen  $0,19 \text{ ms}^{-1}$  (Sturm 33) und  $0,85 \text{ ms}^{-1}$  (Sturm 35), siehe Abbildung 34, die des 12-stündigen Mittels zwischen  $0,15 \text{ ms}^{-1}$  (Sturm 33) und  $0,65 \text{ ms}^{-1}$  (Sturm 31), siehe Abbildung 35, die des 24-stündigen Mittels zwischen  $0,27 \text{ ms}^{-1}$  (Sturm 33) und  $0,61 \text{ ms}^{-1}$  (Sturm 28), siehe Abbildung 36 und die des 48-stündigen Mittels zwischen  $0,13 \text{ ms}^{-1}$  (Sturm 33) und  $0,59 \text{ ms}^{-1}$  (Sturm 28), siehe Abbildung 37. Im Allgemeinen wurden die Unterschiede hin zu längeren Mittelungszeiten geringer, jedoch mit einigen Ausnahmen. Beispielsweise entwickelten sich die Abweichungen bei Orkan Anatol (Sturm 28) von  $0,44 \text{ ms}^{-1}$  im 6-stündigen Mittel, über  $0,5 \text{ ms}^{-1}$  im 12-stündigen zu  $0,61 \text{ ms}^{-1}$  bzw.  $0,59 \text{ ms}^{-1}$  im 24- bzw. 48-stündigen Mittel, das heißt es waren größere mittlere Unterschiede in den längeren zeitlichen Mittelungen, als in den kurzen vorhanden. Dies könnte wiederum größere Auswirkungen auf die Wasserstandshöhen haben, da über längere Zeit andauernd andere Windverhältnisse (entweder stärkerer oder schwächerer Wind) herrschen würden (für eine

Wasserstandsvorhersage müsste zusätzlich die Windrichtung betrachtet werden, dies wird hier aber weggelassen). Anhand der 4 Fallbeispiele kann bei Veränderung einer der Parameter im Turbulenzschema (in den oben verwendeten realistischen Maßen) mit maximalen durchschnittlichen Windgeschwindigkeitsänderungen über der Nordsee in Zeitbereichen von 6 bis 48 Stunden von  $0,6 \text{ ms}^{-1}$  (48-stündig) bis  $0,85 \text{ ms}^{-1}$  (6-stündig) gerechnet werden. Zu welchen Wasserstandsänderungen dies führen würde, kann hier nicht beurteilt werden. Der Vergleich mit dem RMSE in Kapitel 3.3 (z.B. Abbildungen 13, 14 und 15) zeigt, dass diese Unterschiede kleiner als die Simulationsfehler sind, das heißt es kann keine entscheidende Verbesserung erwartet werden.

Exp.	Sturm	Bias/hPa	RMSE/hPa	Bias/ $\text{ms}^{-1}$	RMSE/ $\text{ms}^{-1}$
9	28	0,34	0,73	0,81	2,33
9	31	0,11	0,59	1,07	2,19
9	33	0,05	0,50	1,14	2,31
9	35	0,15	0,55	1,25	2,30
10	28	0,30	0,73	0,85	2,34
10	31	0,07	0,59	1,10	2,23
10	33	0,04	0,49	1,14	2,25
10	35	0,09	0,52	1,19	2,33
11	28	0,21	0,71	0,88	2,38
11	31	-0,00	0,60	1,15	2,30
11	33	0,04	0,50	1,07	2,31
11	35	-0,00	0,50	1,18	2,38
– (4.22)	28	0,26	0,68	0,95	2,36
– (4.22)	31	0,08	0,57	0,94	2,12
– (4.22)	33	-0,01	0,48	1,17	2,23
– (4.22)	35	0,12	0,54	1,12	2,22
12 (Ref)	28	0,33	0,73	0,80	2,34
12 (Ref)	31	0,11	0,59	1,06	2,20
12 (Ref)	33	0,04	0,49	1,13	2,26
12 (Ref)	35	0,15	0,55	1,21	2,31
13	28	0,41	0,76	0,69	2,35
13	31	0,21	0,65	0,80	2,12
13	33	0,05	0,52	1,24	2,37
13	35	0,27	0,64	1,06	2,27

*Tabelle 4:* Die Tabelle zeigt den RMSE und bias von PMSL und FF\_10m für COSMO-eu Version 4.22 der vier Sturmflutereignisse 28, 31, 33 und 35 sowie den RMSE und bias zu den Experimenten der Sensitivitätsuntersuchungen der Turbulenzparametrisierung im COSMO-Modell. Spalte 1 zeigt die Experimentennummer (Exp.) und Spalte 2 die Sturmnummer. Das Referenzexperiment (Nr. 12, Version 4.29) hat die gleichen Einstellungen wie die 39 Sturmflutsimulationen, die mit Version 4.22 gerechnet wurden.

## 5 Zusammenfassung

Um empirische Sturmflutvorhersagen an der Niedersächsischen Nordseeküste zu verbessern, sind hoch aufgelöste Windfelder über der Nordsee notwendig. Deshalb erstellte der NLWKN im Rahmen des Projektes “OptempS-MohoWif“ einen Katalog mit 39 Sturmflutereignissen zwischen 1962 und 2011, die der DWD mit seiner Modellkette, dem Globalmodell GME, dem höher aufgelösten Regionalmodell COSMO-eu und dem feinmaschigen Modell COSMO-de simulierte. Hierbei lieferte COSMO-eu die meteorologischen Felder für die ganze Nordsee und den Übergang zum Nordatlantik, sowie den südwestlichen Teil mit dem Ärmelkanal. Zusätzliche höher aufgelöste Daten für die deutsche Bucht lieferte das COSMO-de mit einer Maschenweite von 2,2 km und 65 vertikalen Schichten, wobei dieses Setup zukünftig auch im operationellen Betrieb des DWD eingesetzt werden soll (es befindet sich derzeit in der Testphase, Stand: September 2014) und hier vorab getestet wurde. Alle 39 Sturmereignisse wurden mit beiden COSMO-Versionen sowohl im normalen Vorhersagemodus, wie auch im Nudging-Modus berechnet, das heißt mit Einbeziehen von Beobachtungsdaten in die Simulationen.

Die Simulationen wurden mit bis zu 25 synoptischen Stationen an der Küste oder in der Nordsee verifiziert (siehe Abschnitt 3). Wie erwartet brachten die Simulationen mit Nudging für beide Versionen und alle drei verifizierten Größen PMSL, FF\_10m und DD\_10m im Durchschnitt bessere Ergebnisse als die normalen Vorhersagen, mit Ausnahmen einiger Stürme Anfang 1980 und vorher. Dabei erfuhr PMSL die deutlichste Verbesserung der drei Größen durch das Nudging. Für die aktuelleren Stürme ab Mitte 1980 hatte PMSL für jede Station jedes Sturmes den geringeren mittleren Fehler und RMSE im Nudging-Modus. COSMO-eu und -de zeigten hierbei keine Unterschiede. Differenzen zwischen den COSMO-Versionen gab es beim mittleren Fehler der 10m-Windgeschwindigkeit. COSMO-eu hatte dabei einen positiven mittleren Fehler, COSMO-de einen leicht negativen. Bei COSMO-eu reduzierte das Nudging den mittleren Fehler um circa die Hälfte und lag somit im gleichen Bereich wie COSMO-de mit umgekehrtem Vorzeichen. Im RMSE gab es wiederum keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Versionen. Der leicht positive mittlere Fehler von DD\_10m zeigte für COSMO-de leicht kleinere Werte als für COSMO-eu, im RMSE zeigten sie wieder ein sehr ähnliches Verhalten (siehe Abschnitt 3.3).

Unterschiede im mittleren Fehler des 10m-Windes von COSMO-eu und COSMO-de konnten auf die unterschiedlichen Quellen (Globcover und GLC2000, siehe Abschnitt 3.4) der Daten zur Extrahierung der Bodenrauigkeit  $z_0$ , sowie auf die auflösungsbedingt verschiedene Land-See-Verteilung der Modelle zurückgeführt werden. Beide Ursachen haben jedoch keine oder nur marginale Auswirkungen auf den 10m-Wind über der Nordsee und sollten sich somit nicht auf die Sturmflutvorhersage des NLWKN auswirken. Unter anderem auch auf Grund der Ergebnisse dieses Projekts wurde im operationellen Betrieb von COSMO-eu

der Datensatz der externen Parameter, aus denen die Bodenrauigkeit gewonnen wird, von GLC2000 auf Globcover umgestellt.

Für Stürme Anfang 1980 und früher brachte die über der See räumlich und insbesondere zeitlich zu geringe Beobachtungsdichte Probleme bei der Zugbahn einzelner Stürme, so dass dem NLWKN empfohlen wurde für Stürme bis einschließlich 1981 (Sturm 11) auf die normalen Vorhersagen und nicht auf die Nudging-Analysen zurückzugreifen. Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, fehlten bei den Beobachtungsdaten vor 1980 Höheninformationen. Diese werden jetzt durch zusätzliche Listen bereitgestellt und somit können zukünftige Anwender problemlos auf die historischen Beobachtungsdaten zugreifen.

Einen Überblick über die Zugbahnen der Tiefdruckwirbel, die zu hohen Wasserständen am Pegel Norderney führten, gab Abschnitt 3.6. Außerdem konnten die Stürme damit zusätzlich verifiziert werden, indem die Zugbahnen mit aus der Literatur vorhandenen verglichen wurden.

Die Sensitivitätsuntersuchungen zeigten, dass Änderungen der Parameter im Turbulenzschema des COSMO-Modells, über einen Sturm gemittelt, nur geringen Einfluss auf die Modellergebnisse hatten und in der gleichen Größenordnung lagen, wie sie bei Versionsänderungen des Modells auftraten. Für einen bestimmten Zeitpunkt oder über einen kurz- bis mittelfristigen Zeitraum gemittelt (6 bis 48 Stunden) und auf das Gebiet der Nordsee begrenzt können diese Unterschiede jedoch auch etwas größer ausfallen und durchschnittliche Windgeschwindigkeitsänderungen von 0,6 bis 0,85  $\text{ms}^{-1}$  hervorrufen (siehe Abschnitt 4).

## 5.1 Datensatz

Die Speicherung des Datensatzes der 39 Sturmflutereignisse erfolgte im Benutzerarchivsystem ECFS des EZMW. Er besteht aus den GME-Simulationen sowie den darauf aufbauenden Vorhersagen und Nudging-Analysen von COSMO-eu und -de. Das heißt aus einem kleinen Mini-Ensemble mit 4 (nur COSMO) beziehungsweise 5 (mit GME) Mitgliedern. Das Datenvolumen beträgt circa 16 Terabyte (TB) aus GME-Vorhersagen sowie 10 TB von COSMO-eu und 40 TB von COSMO-de Vorhersagen und Nudging-Analysen. Die Daten liegen in reinem Modelloutput in GRIB1-Format vor, können aber leicht nach GRIB2 umgewandelt werden. Weiterhin liegen drei schon zusammengefasste Datensätze (zum schnelleren Zugriff) mit folgenden Parametern vor: in Datensatz 1 sind die Größen PMSL, U\_10m, V\_10m und  $z_0$  gespeichert. Datensatz 2 enthält PMSL, U\_10m, V\_10m, CLCT (Gesamtbedeckung),  $T_{z=1}$  (Temperatur unterste Modellschicht) und  $QV_{z=1}$  (spezifische Feuchte unterste Modellschicht) und Datensatz 3 enthält die vollständigen dreidimensionalen Felder für U, V, W, T und CLC (Bedeckung in einer Modellschicht) sowie FIS (Geopotential an Erdoberfläche), HSURF (topographische Höhe), U\_10m, V\_10m, T\_2m, VMAX\_10m, CLCT, CLCH (Bedeckungsgrad hohe Wolken), CLCM (Bedeckungsgrad mittelhohe Wolken), CLCL (Bedeckungsgrad tie-

fe Wolken), TOT\_PREC (Gesamtniederschlag),  $z_0$ , PMSL, DBZ\_850 (Radarreflektivität in 850 hPa) und DBZ\_CMAX (maximale Radarreflektivität über die Höhe integriert). Dem NLWKN wurde nach Berechnung der Stürme Datensatz 1 für COSMO-eu und -de Vorhersagen und Nudging-Analysen in GRIB2-Format übergeben.

## 5.2 Veröffentlichungen

Ergebnisse des Projektes wurden vom DWD auf dem COSMO User Seminar im Februar 2013 in Offenbach, auf der EMS (European Meteorological Society) Konferenz im September 2013 in Reading und auf dem KFKI-Seminar Ende Oktober 2013 in Bremerhaven vorgestellt. Im Rahmen der EMS 2013 wurden die Ergebnisse in “Advances in Science and Research“ (siehe Brecht & Frank (2014), Link: <http://www.adv-sci-res.net/11/1/2014/asr-11-1-2014.pdf>, Stand: September 2014) publiziert. Eine weitere Veröffentlichung findet zusammen mit dem NLWKN in der Zeitschrift “Die Küste 81“ im Herbst 2014 statt.

## 6 Anhang A - Verzeichnisstruktur der Daten

Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, liegt der komplette Datensatz der 39 Sturmflutereignisse im Benutzerarchivsystem ECFS des EZMW. Der Basispfad, um zu allen Vorhersagen eines Modells zu gelangen, lautet immer:

$pfad = \text{“ec:/dwe/OptempS/dat/}modell/h/\text{“}$  ,  
mit  $modell = \text{“gme“}$ ,  $\text{“rlm29“}$  oder  $\text{“rlm39“}$ .

Dabei steht  $\text{“rlm29“}$  für COSMO-eu und  $\text{“rlm39“}$  für COSMO-de. Tabelle 5 zeigt die Pfade und Dateinamen zu den normalen Vorhersagen und Nudging-Simulationen. Um Platz zu sparen, wurden die Simulationen der COSMO-de, deren Ausgabe 15-minütig ist, mit dem Komprimierungsprogramm  $\text{“bzip2“}$  komprimiert (deshalb die Endung  $\text{“.bz2“}$  des Dateinamens).

Die zusammengefassten Daten liegen sowohl für die normalen Vorhersagen wie für die Nudging-Simulationen in  $\text{“}pfad/datum0\_proc\text{“}$  vor, wobei  $datum0$  für das Startdatum aus Tabelle 1, Spalte 2, im Format  $\text{“YYYYmmddHH“}$  steht. Wie die einzelnen Datensätze darin zu finden sind zeigt Tabelle 6.

Daten	Modell	Pfad	Dateiname
normale Vorhersagen	GME	$\text{“}pfad/datum1\text{“}$	$\text{“gfff}vorhersagezeit\text{“}$
	COSMO-eu	$\text{“}pfad/datum1\text{“}$	$\text{“lfff}vorhersagezeit\text{“}$
	COSMO-de	$\text{“}pfad/datum1\text{“}$	$\text{“lfff}vorhersagezeit.bz2\text{“}$
Nudging-Simulationen	COSMO-eu	$\text{“}pfad/datum1\_nudge\text{“}$	$\text{“laf}datum1\text{“}$
	COSMO-de	$\text{“}pfad/datum1\_nudge\text{“}$	$\text{“laf}datum2.bz2\text{“}$

*Tabelle 5:* Die Tabelle zeigt die Pfade zu den Sturmflutsimulationen im Benutzerarchivsystem ECFS des EZMW. Die rot eingefärbten, kursiv dargestellten Zeichen sind die Variablen. Das Format für  $datum1$  ist folgendes:  $\text{“YYYYmmddHH“}$ , mit YYYY=Jahr, mm=Monat, dd=Tag und HH=Stunde. Der Parameter  $datum2$  besitzt zusätzlich die Einheiten Minute (MM) und Sekunde (SS), d.h. das Format ist:  $\text{“YYYYmmddHHMMSS“}$ . Das Format des Platzhalters  $vorhersagezeit$  im Dateinamen der normalen Vorhersagen ist:  $\text{“ddHHMMSS“}$ , wobei  $vorhersagezeit$  die Dauer ab Beginn eines einzelnen Vorhersagelaufs angibt.

Datensatz	Typ	Pfad	Dateiname
1	normale Vorhersagen	“ <i>pfad/datum0</i> _proc“	“lfff <i>datum1_modell</i> _nlwkn.grib1.tar“
	Nudging-Simulationen	“ <i>pfad/datum0</i> _proc“	“laf <i>datum1_modell</i> _nlwkn.grib1.tar“
2	normale Vorhersagen	“ <i>pfad/datum0</i> _proc“	“lfff <i>datum1_modell</i> _bsh.grib1.tar“
	Nudging-Simulationen	“ <i>pfad/datum0</i> _proc“	“laf <i>datum1_modell</i> _bsh.grib1.tar“
3	normale Vorhersagen	“ <i>pfad/datum0</i> _proc“	“lfff <i>datum1_modell</i> _eval.grib1.tar“
	Nudging-Simulationen	“ <i>pfad/datum0</i> _proc“	“laf <i>datum1_modell</i> _eval.grib1.tar“

*Tabelle 6:* Die Tabelle zeigt die Pfade zu den komprimierten Datensätzen der Sturmflutsimulationen im Benutzerarchivsystem ECFS des EZMW. Die rot eingefärbten, kursiv dargestellten Zeichen sind die Variablen. Das Format für *datum1* ist folgendes: “YYYYmmddHH“, mit YYYY=Jahr, mm=Monat, dd=Tag und HH=Stunde. Als Wert für *modell* steht hier “rlm29“ für COSMO-eu oder “rlm39“ für COSMO-de zur Verfügung. Die Daten sind 6-stündig als “tar“-Dateien zusammengefasst. Die meteorologischen Größen der drei Datensätze sind in Abschnitt 5.1 beschrieben.

## 7 Anhang B - Abbildungen

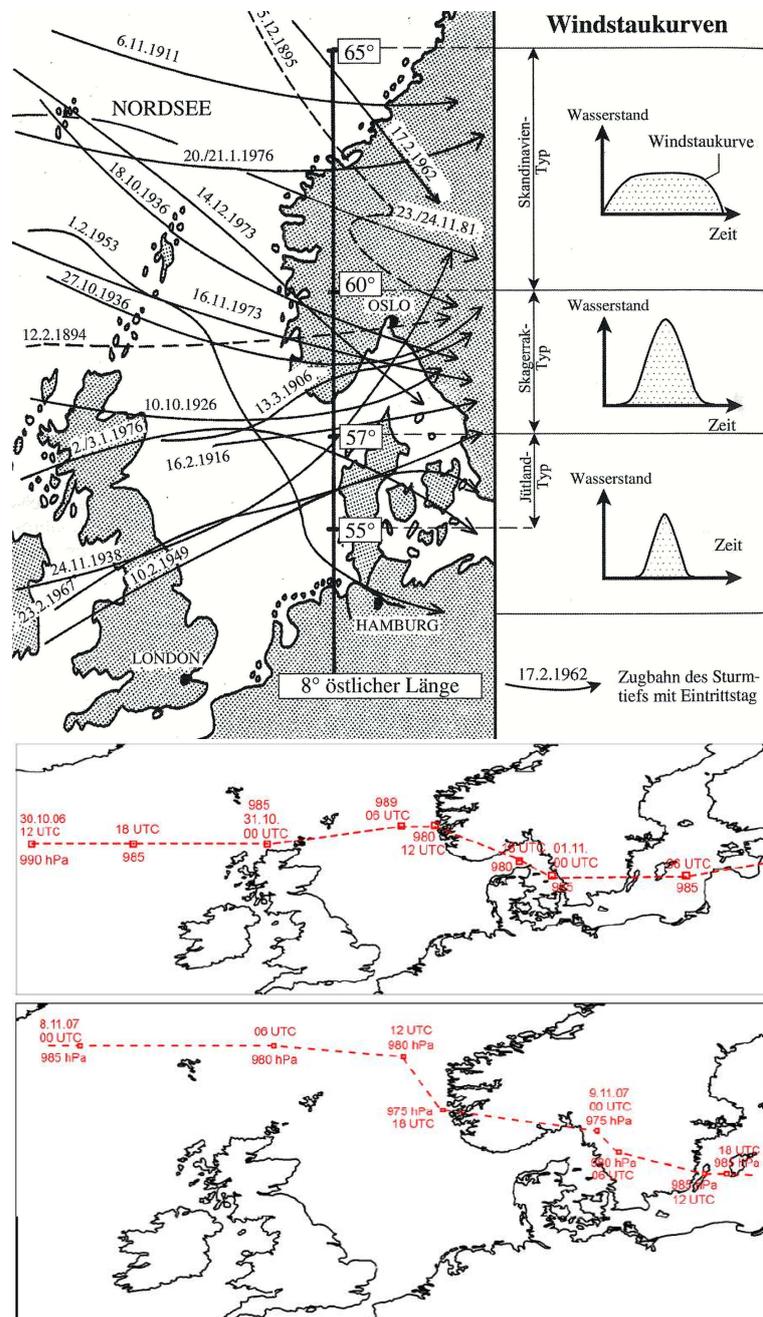


Abbildung 22: Die obere Grafik zeigt historische Sturmszugbahnen nach Petersen & Rohde (1991). Zu sehen sind unter anderem die Zugbahnen der Stürme mit den Katalognummern 1, 3, 5, 7, 8, 9 und 11 (siehe Tabelle 1). In der Mitte ist die 6-stündige Zugbahn von Sturm 31 (Britta, 2006), und unten von Sturm 35 (Tilo, 2007) zu sehen (Quelle: <http://www.dwd.de>)

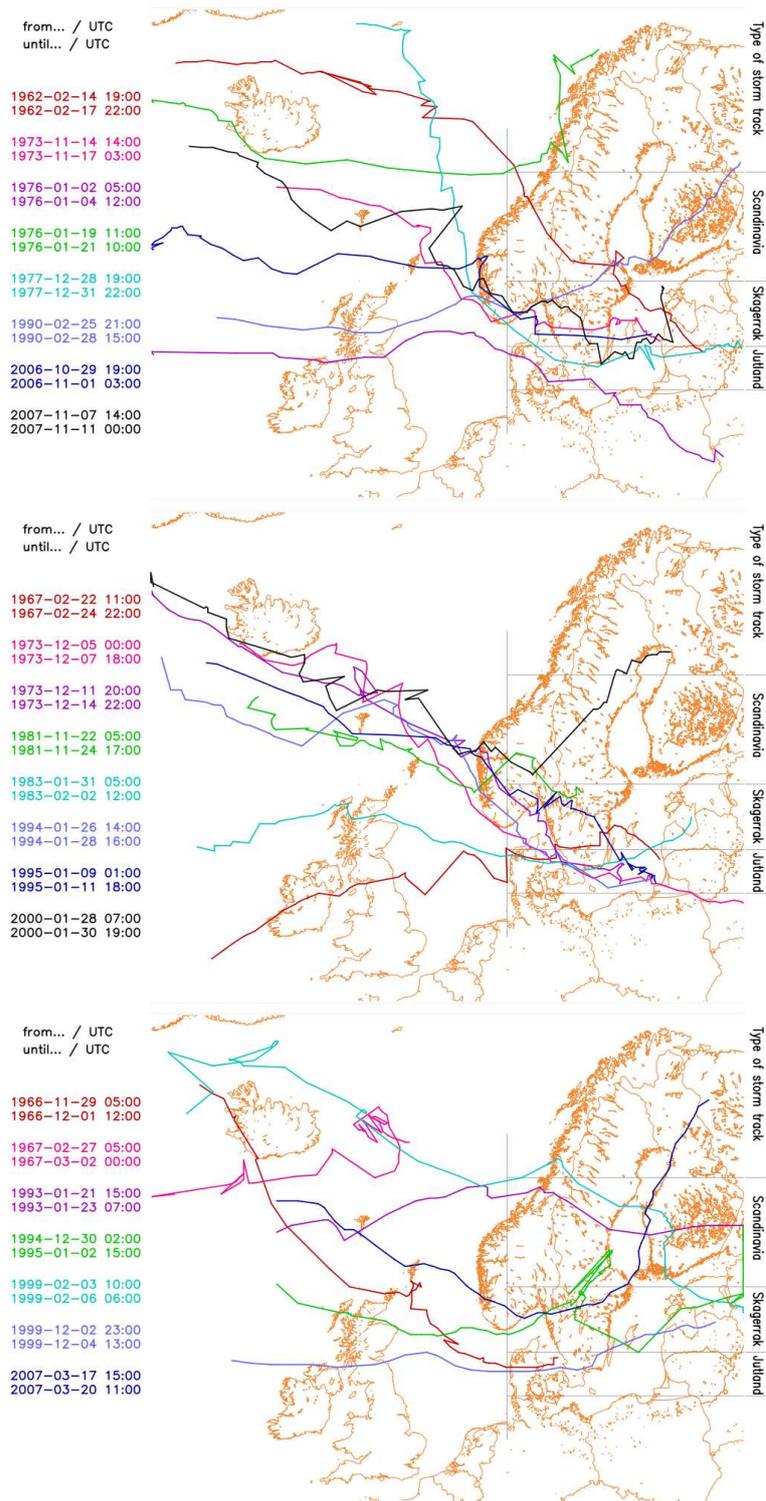


Abbildung 23: Sturmzugbahnen der 23 Ereignisse von 1962 bis 2011, die einen Wasserstau von mindestens 2m am Pegel Norderney verursachten. Die obere Grafik zeigt die 8 höchsten Ereignisse, die mittlere die Ereignisse 9-16 und die untere die Ereignisse 17-23 (Vergleiche auch Tabelle 1). Die Sturmzugbahnen wurden aus stündlichen Werten des Drucks reduziert auf NN berechnet.

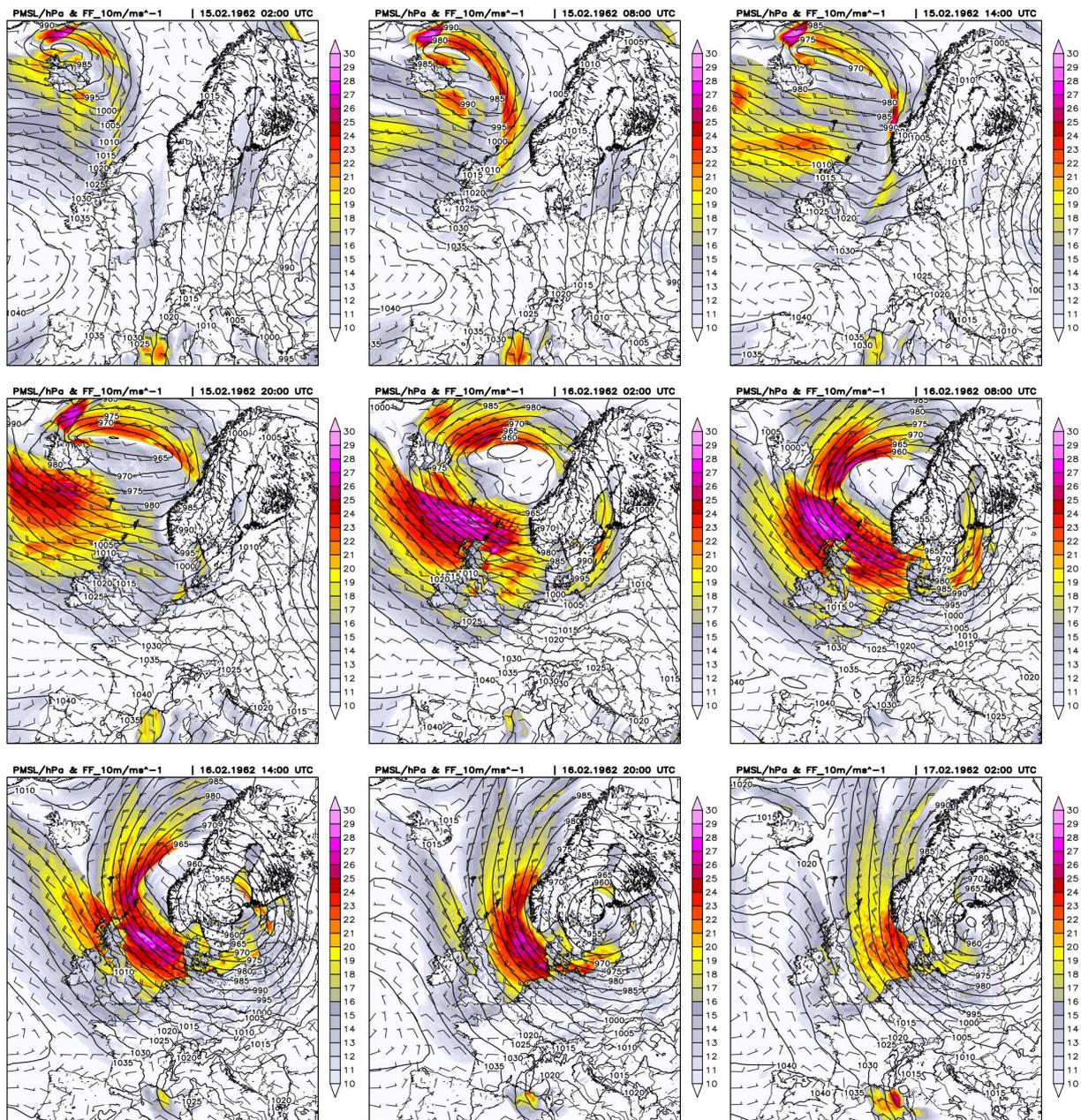


Abbildung 24: 6-stündiger Verlauf der Hamburg-Sturmflut (normale Vorhersage ohne Nudging) vom 15.02.1962, 02 UTC (links oben), bis zum 17.02.1962, 02 UTC (rechts unten). Die Windgeschwindigkeit in 10m Höhe ist farbig in  $\text{ms}^{-1}$  dargestellt. Die durchgezogenen Linien zeigen die Isobaren reduziert auf NN in 5hPa-Abständen und die Windfahnen geben die Windrichtung in 10m Höhe an.

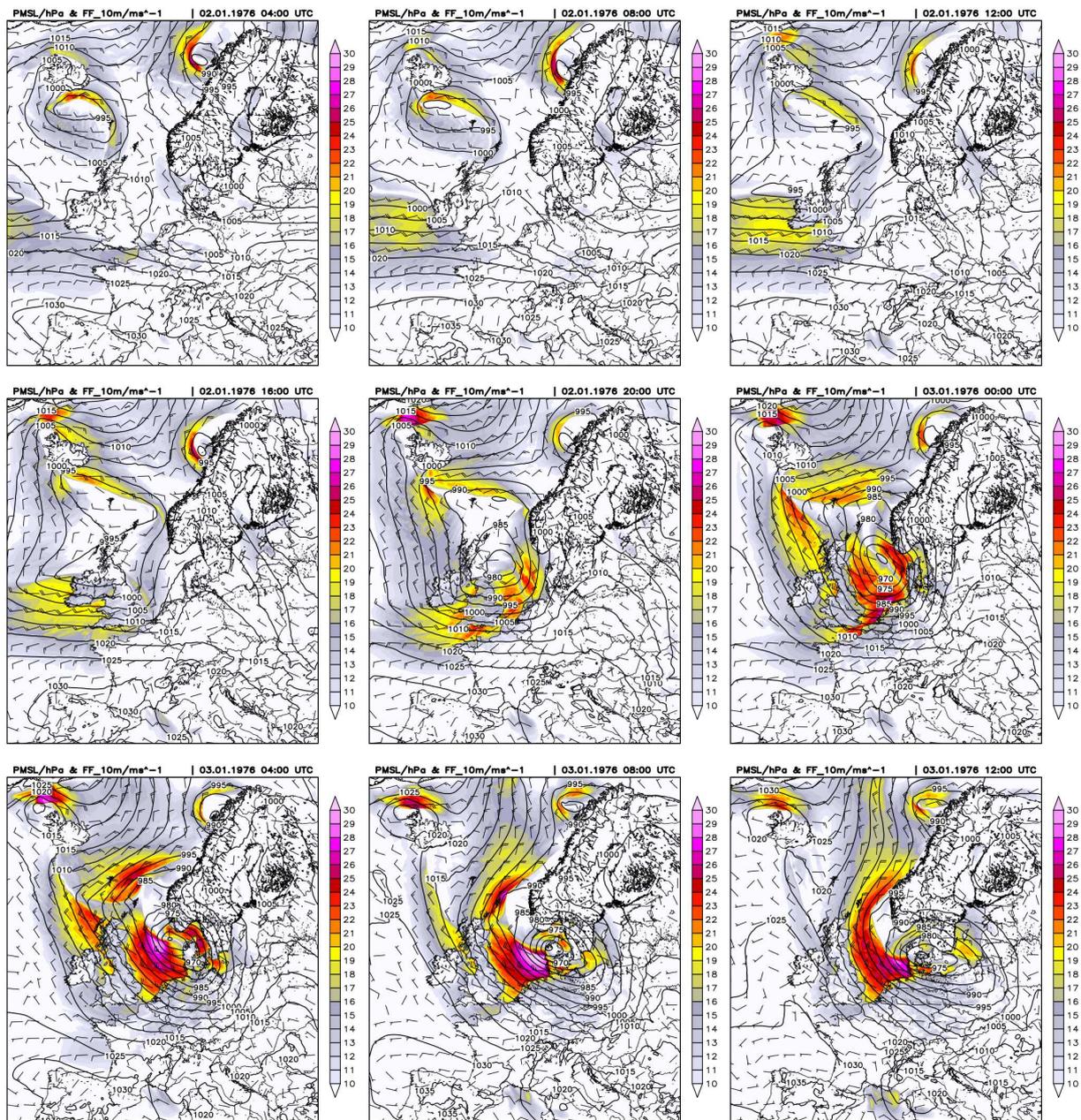


Abbildung 25: 4-stündiger Verlauf des Capella-Orkans (normale Vorhersage ohne Nudging) vom 2.01.1976, 04 UTC (links oben), bis zum 3.01.1976, 12 UTC (rechts unten). Die Windgeschwindigkeit in 10m Höhe ist farbig in  $\text{ms}^{-1}$  dargestellt. Die durchgezogenen Linien zeigen die Isobaren reduziert auf NN in 5hPa-Abständen und die Windfahnen geben die Windrichtung in 10m Höhe an.

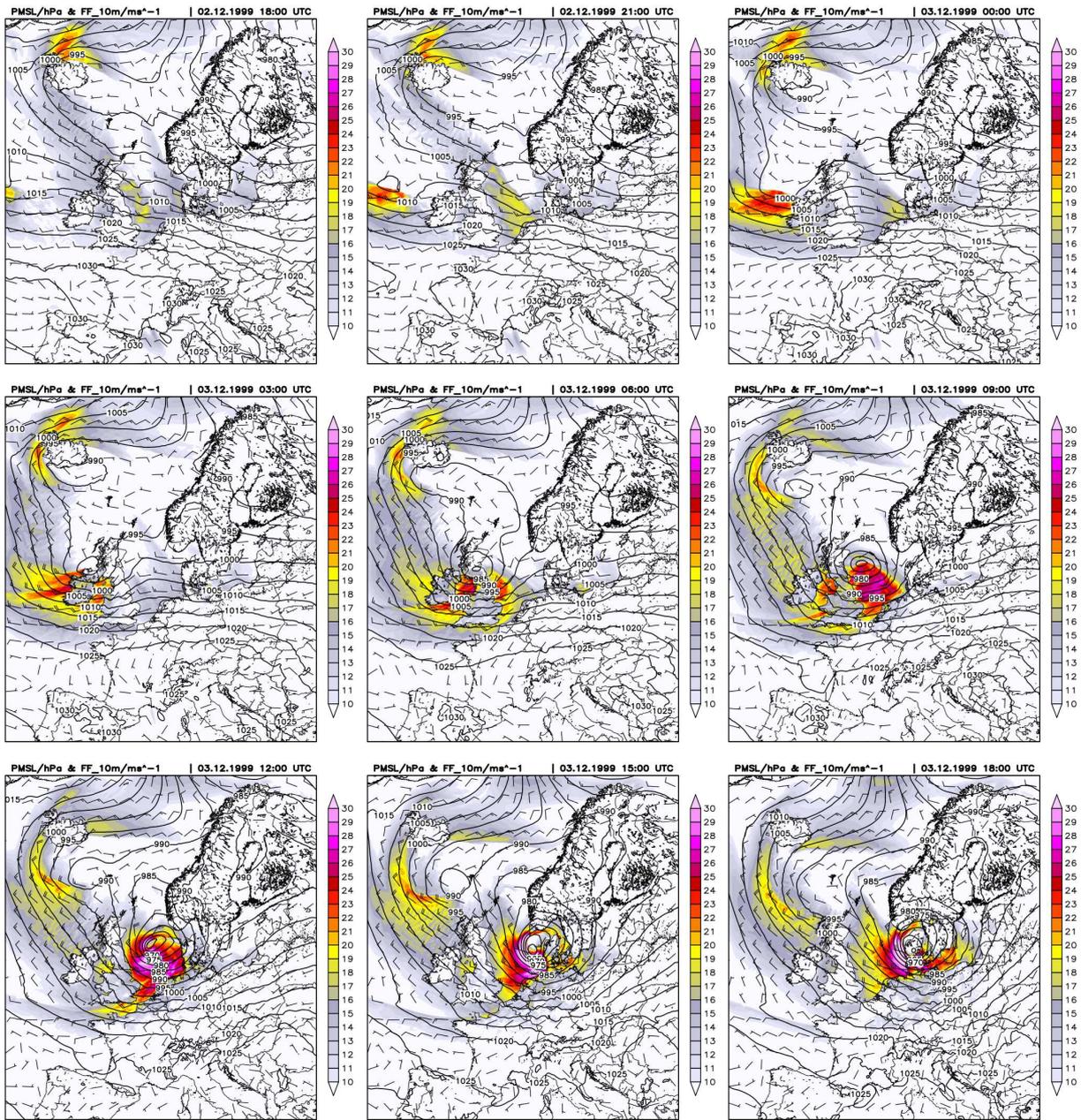


Abbildung 26: 3-stündiger Verlauf des Orkans Anatol (normale Vorhersage ohne Nudging) vom 2.12.1999, 18 UTC (links oben), bis zum 3.12.1999, 18 UTC (rechts unten). Die Windgeschwindigkeit in 10m Höhe ist farbig in  $\text{ms}^{-1}$  dargestellt. Die durchgezogenen Linien zeigen die Isobaren reduziert auf NN in 5hPa-Abständen und die Windfahnen geben die Windrichtung in 10m Höhe an.

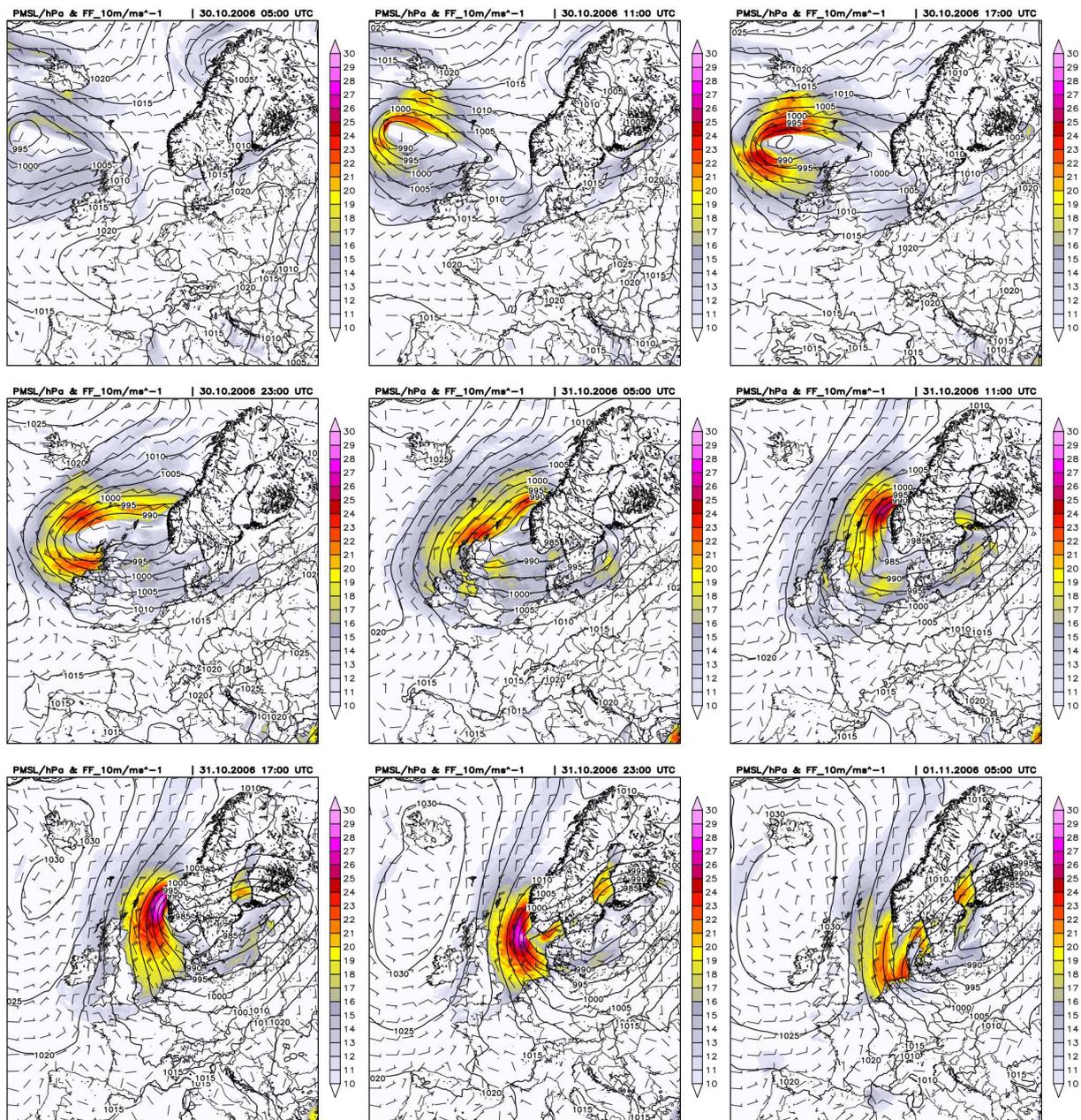


Abbildung 27: 6-stündiger Verlauf des Sturms Britta (normale Vorhersage ohne Nudging) vom 30.10.2006, 05 UTC (links oben), bis zum 1.11.2006, 05 UTC (rechts unten). Die Windgeschwindigkeit in 10m Höhe ist farbig in  $\text{ms}^{-1}$  dargestellt. Die durchgezogenen Linien zeigen die Isobaren reduziert auf NN in 5hPa-Abständen und die Windfahnen geben die Windrichtung in 10m Höhe an.

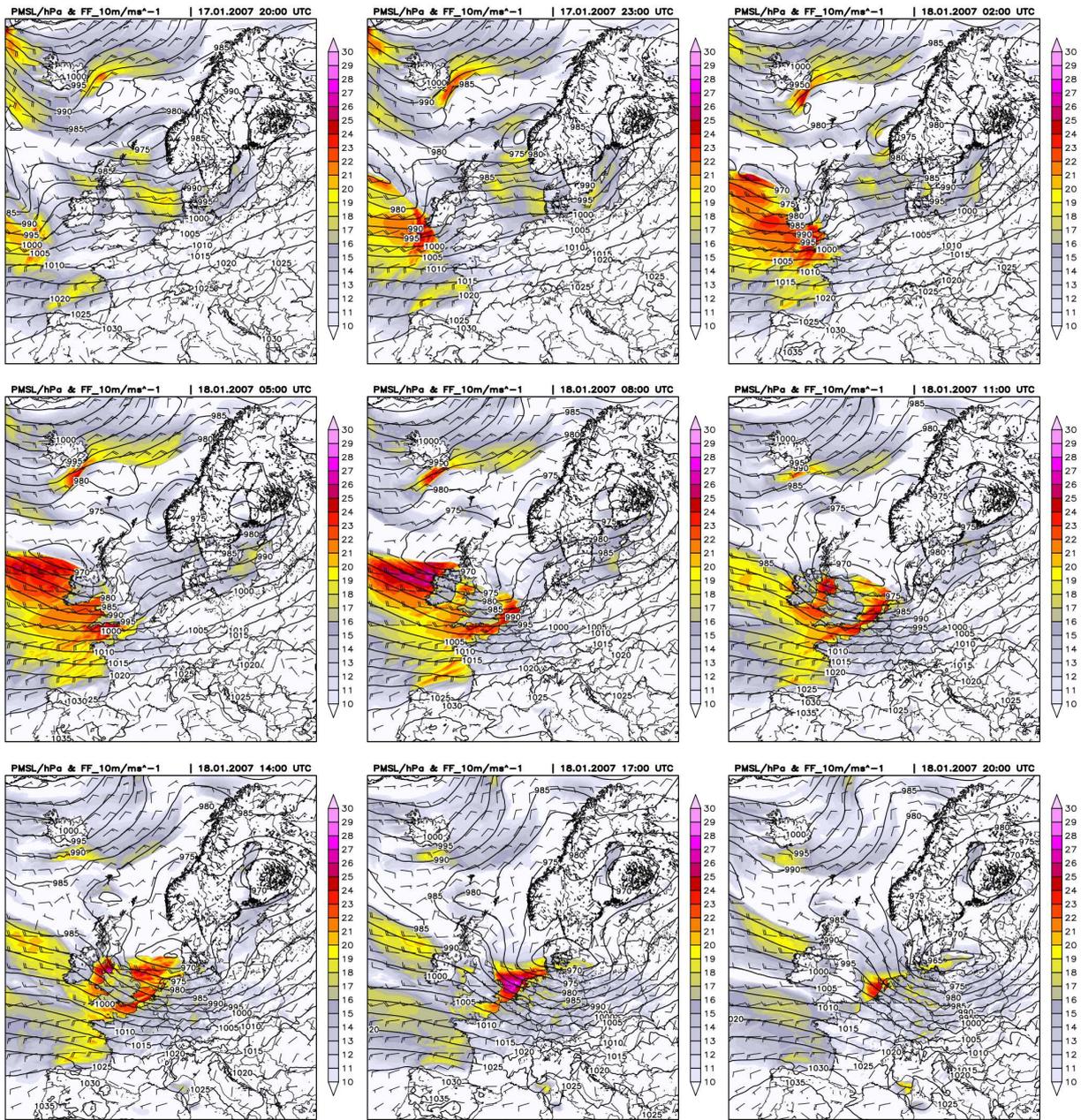


Abbildung 28: 3-stündiger Verlauf des Orkans Kyrill (normale Vorhersage ohne Nudging) vom 17.01.2007, 20 UTC (links oben), bis zum 18.01.2007, 20 UTC (rechts unten). Die Windgeschwindigkeit in 10m Höhe ist farbig in  $\text{ms}^{-1}$  dargestellt. Die durchgezogenen Linien zeigen die Isobaren reduziert auf NN in 5hPa-Abständen und die Windfahnen geben die Windrichtung in 10m Höhe an.

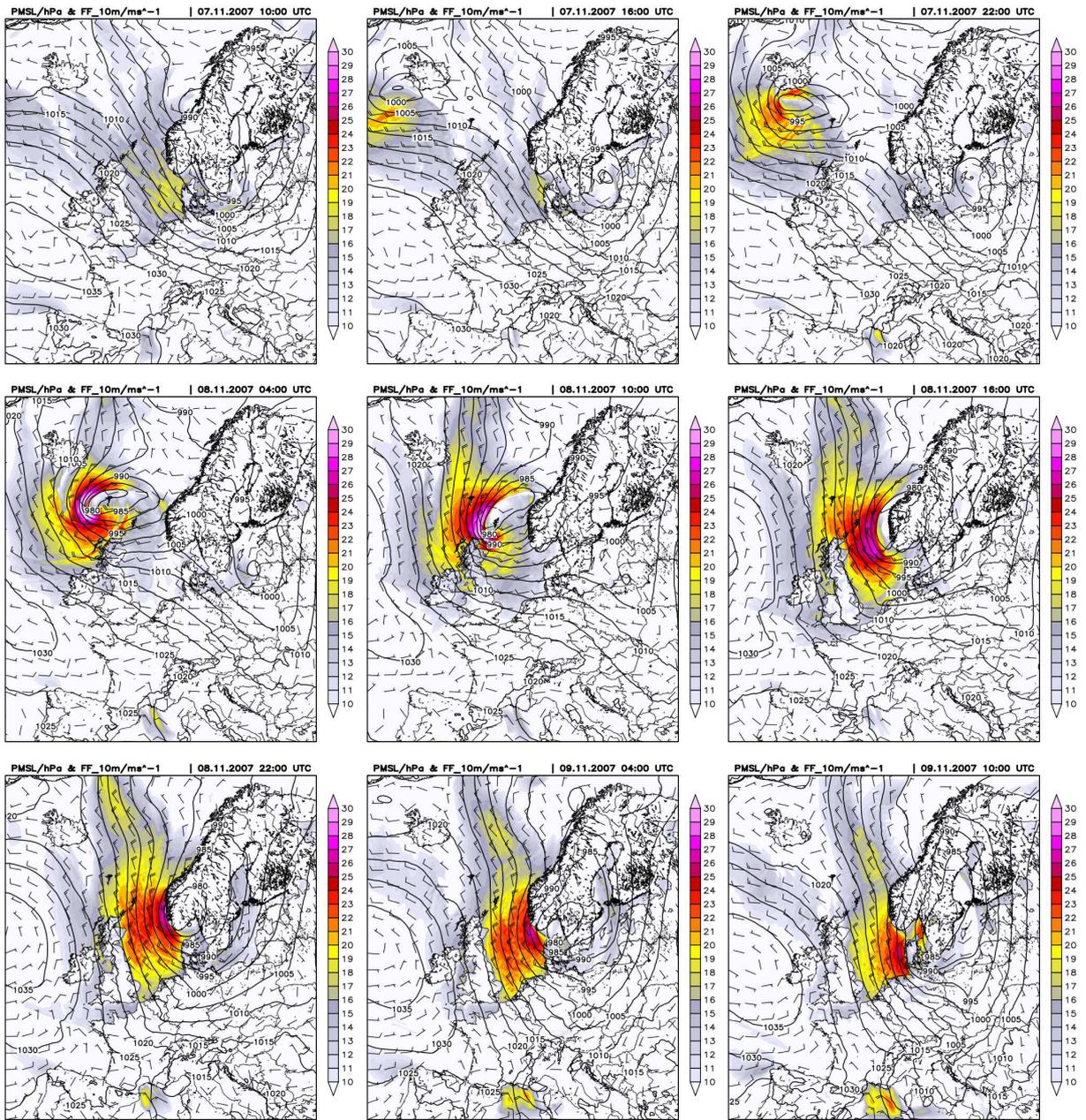
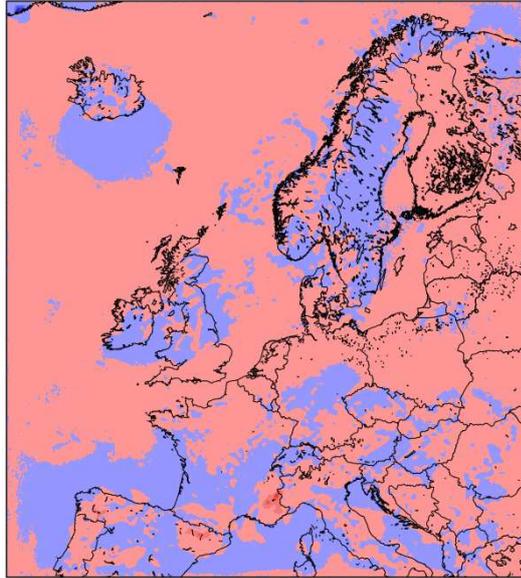
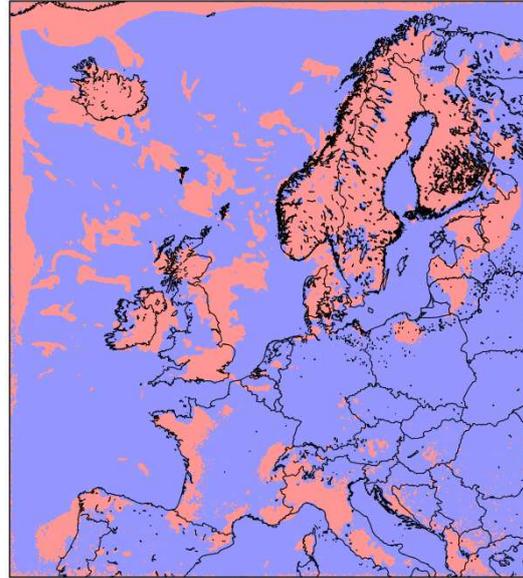


Abbildung 29: 6-stündiger Verlauf des Sturms Tilo (normale Vorhersage ohne Nudging) vom 7.11.2007, 10 UTC (links oben), bis zum 9.11.2007, 10 UTC (rechts unten). Die Windgeschwindigkeit in 10m Höhe ist farbig in  $\text{ms}^{-1}$  dargestellt. Die durchgezogenen Linien zeigen die Isobaren reduziert auf NN in 5hPa-Abständen und die Windfahnen geben die Windrichtung in 10m Höhe an.

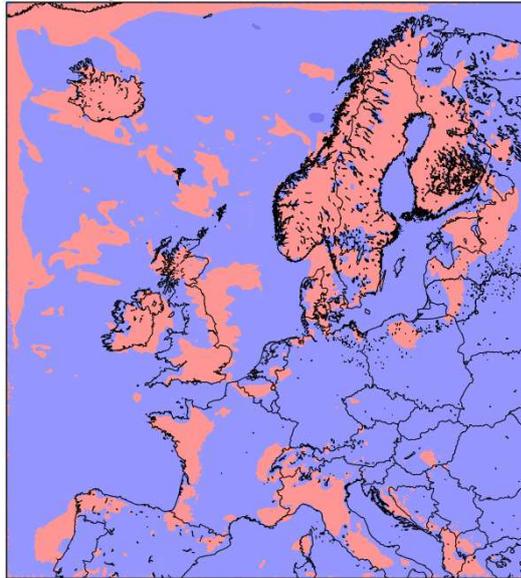
PMSL (Exp9-Exp12) / hPa | Storm 2007110700  
Area average: 0.00264898



PMSL (Exp10-Exp12) / hPa | Storm 2007110700  
Area average: -0.00519704



PMSL (Exp11-Exp12) / hPa | Storm 2007110700  
Area average: -0.0170611



PMSL (Exp13-Exp12) / hPa | Storm 2007110700  
Area average: 0.0132027

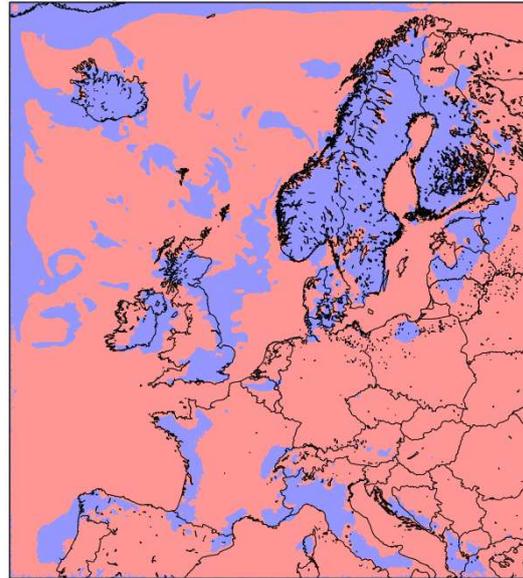
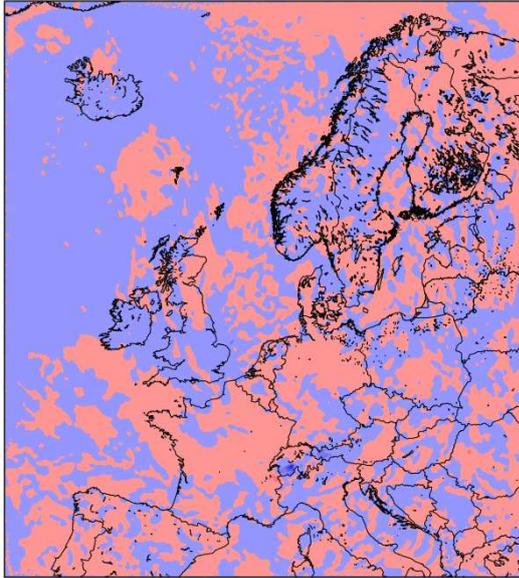
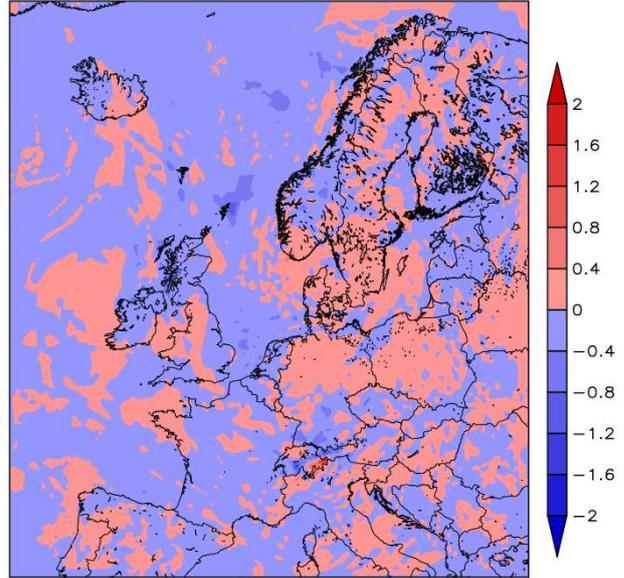


Abbildung 30: Differenz des Drucks reduziert auf NN zwischen einem Experiment und dem Referenzexperiment, gemittelt über den Zeitraum eines Sturmereignisses (hier: Tilo 2007). Oben links Experiment 9, oben rechts 10, unten links 11 und unten rechts 13.

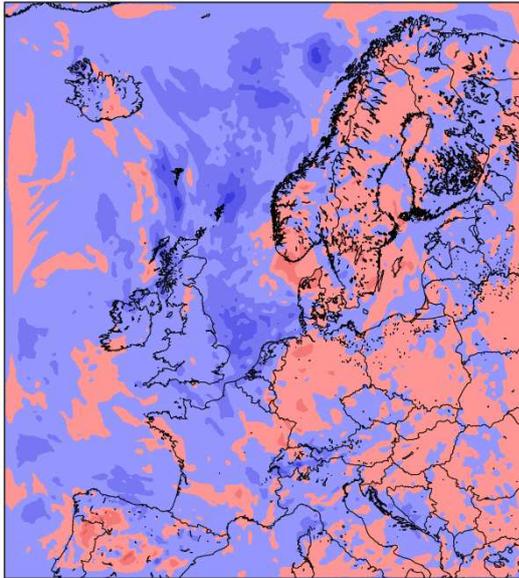
PMSL (Exp9-Exp12) / hPa | 2007110700 + 55 hours  
Area average: 0.00148373



PMSL (Exp10-Exp12) / hPa | 2007110700 + 55 hours  
Area average: -0.0415529



PMSL (Exp11-Exp12) / hPa | 2007110700 + 55 hours  
Area average: -0.127566



PMSL (Exp13-Exp12) / hPa | 2007110700 + 55 hours  
Area average: 0.085847

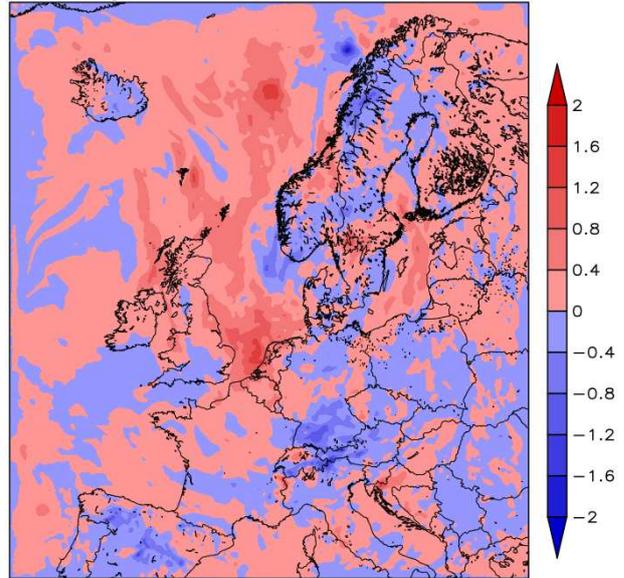
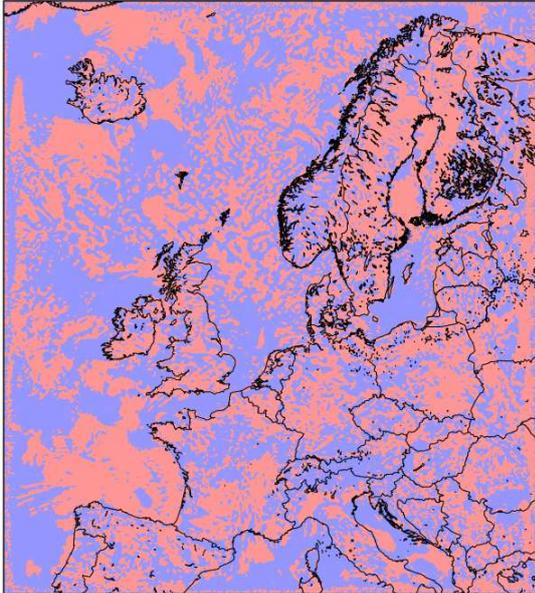
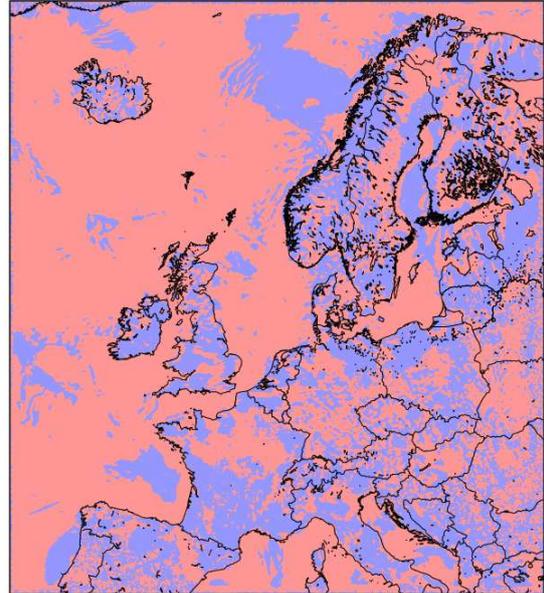


Abbildung 31: Differenz des Drucks reduziert auf NN zwischen einem Experiment und dem Referenzexperiment drei Stunden vor dem höchsten Wasserstand am Pegel Norderney für Sturm Tilo, 2007. Oben links ist Experiment 9, oben rechts 10, unten links 11 und unten rechts Experiment 13 dargestellt.

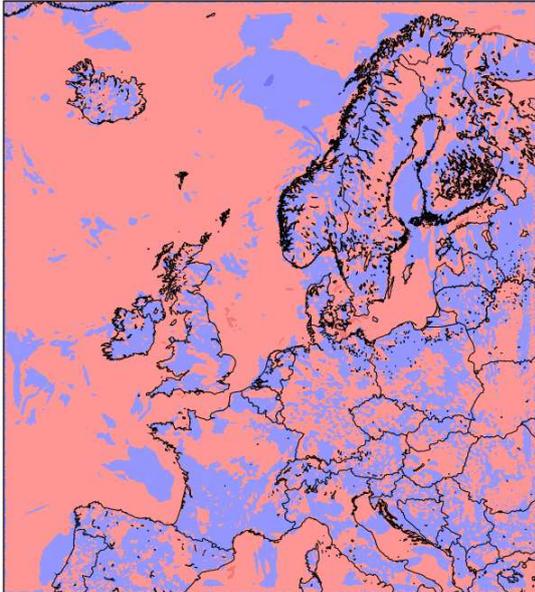
FF\_10m (Exp9-Exp12) / ms<sup>-1</sup> | Storm 2007110700  
Area average: 0.00128836



FF\_10m (Exp10-Exp12) / ms<sup>-1</sup> | Storm 2007110700  
Area average: 0.0374068



FF\_10m (Exp11-Exp12) / ms<sup>-1</sup> | Storm 2007110700  
Area average: 0.0970156



FF\_10m (Exp13-Exp12) / ms<sup>-1</sup> | Storm 2007110700  
Area average: -0.140948

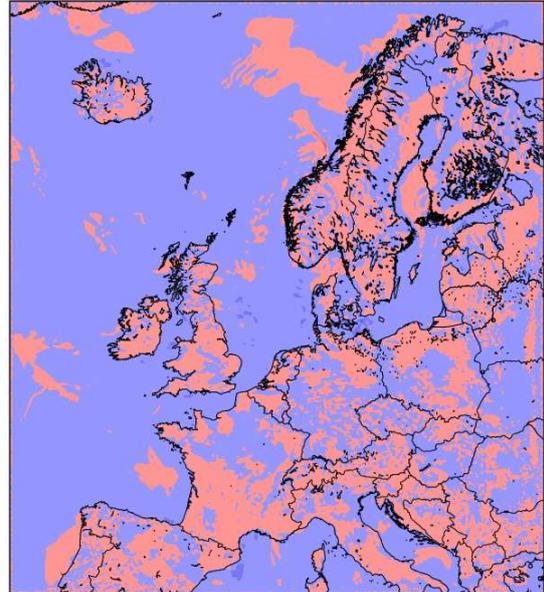
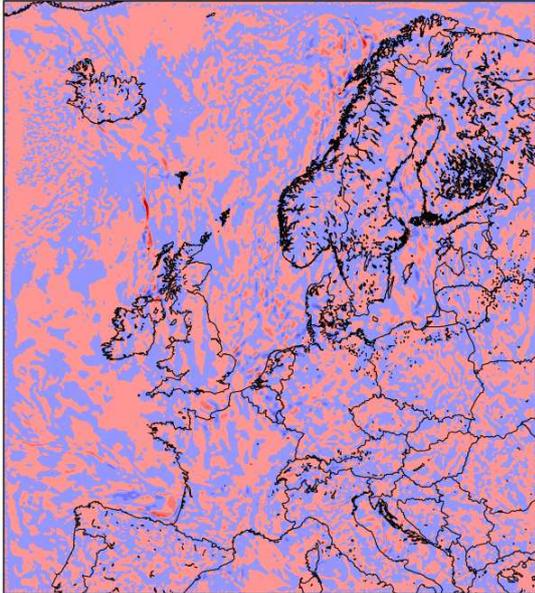
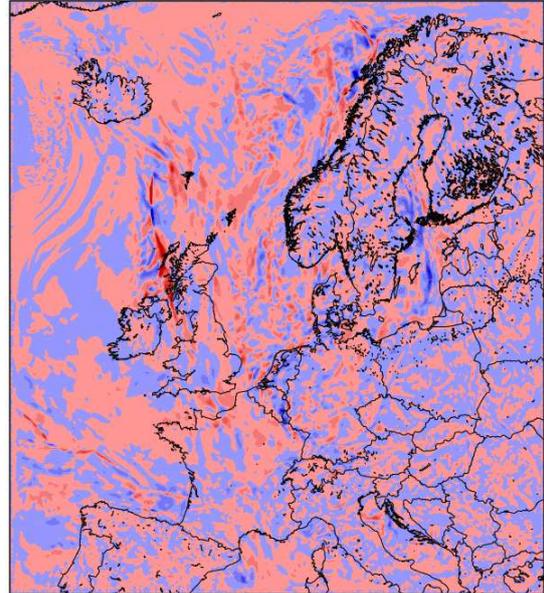


Abbildung 32: Differenz der 10m-Windgeschwindigkeit zwischen einem Experiment und dem Referenzexperiment, gemittelt über den Zeitraum eines Sturmereignisses (hier: Tilo 2007). Oben links Experiment 9, oben rechts 10, unten links 11 und unten rechts 13.

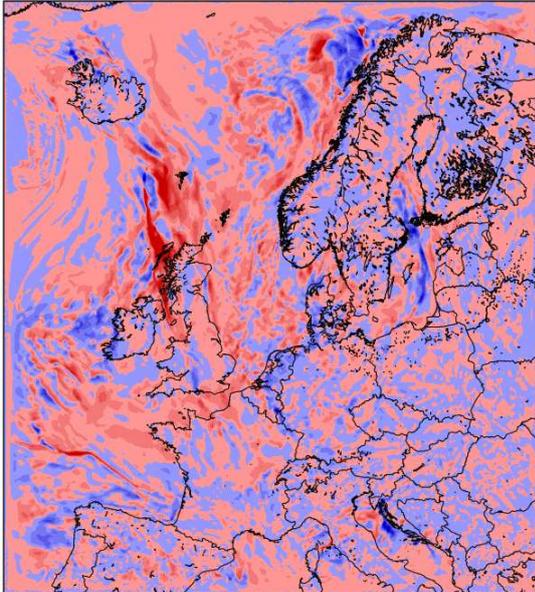
FF\_10m (Exp9-Exp12) / ms<sup>-1</sup> | 2007110700 + 55 h  
Area average: 0.00501451



FF\_10m (Exp10-Exp12) / ms<sup>-1</sup> | 2007110700 + 55 h  
Area average: 0.0713879



FF\_10m (Exp11-Exp12) / ms<sup>-1</sup> | 2007110700 + 55 h  
Area average: 0.209231



FF\_10m (Exp13-Exp12) / ms<sup>-1</sup> | 2007110700 + 55 h  
Area average: -0.264708

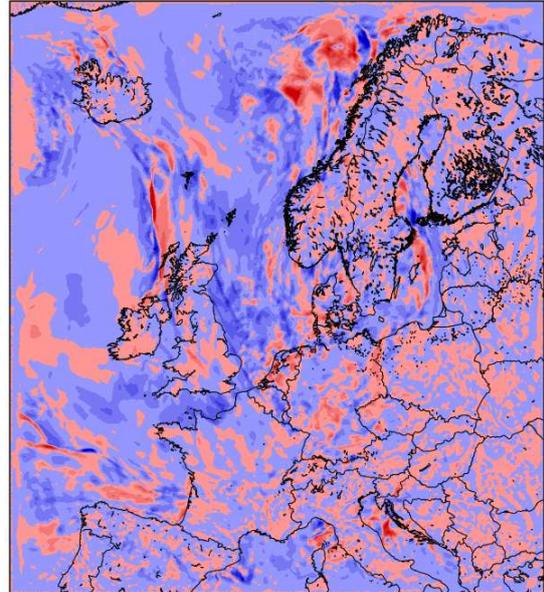
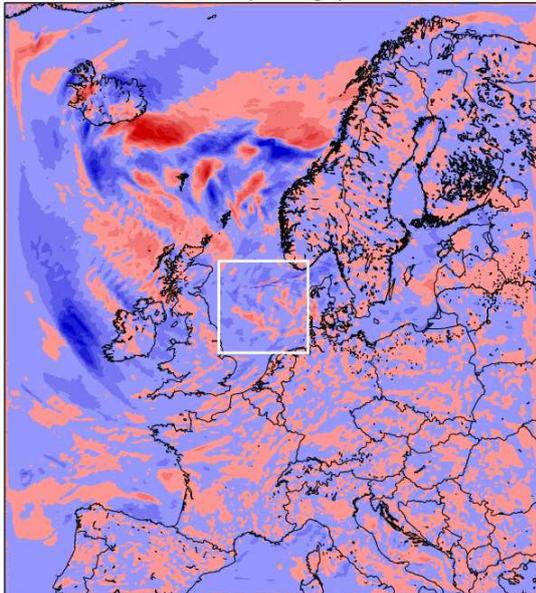
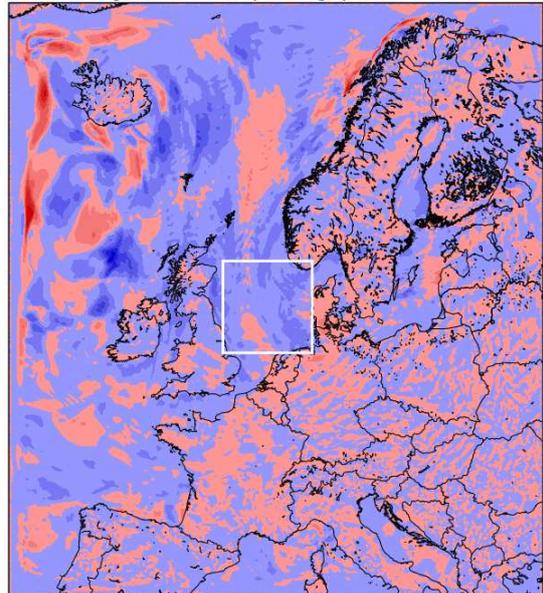


Abbildung 33: Differenz der 10m-Windgeschwindigkeit zwischen einem Experiment und dem Referenzexperiment drei Stunden vor dem höchsten Wasserstand am Pegel Norderney für Sturm Tilo, 2007. Oben links ist Experiment 9, oben rechts 10, unten links 11 und unten rechts Experiment 13 dargestellt.

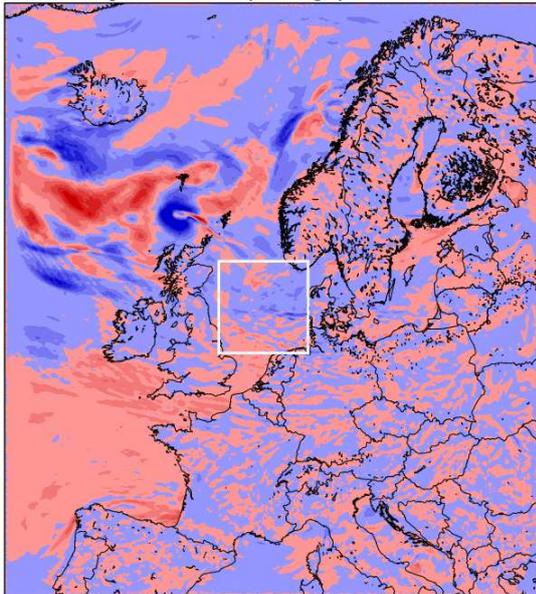
FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 1999113000+ave(90m6)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.440474



FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 2006102900+ave(76m6)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.646333



FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 2007011600+ave(68m6)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.189234



FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 2007110700+ave(58m6)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.848057

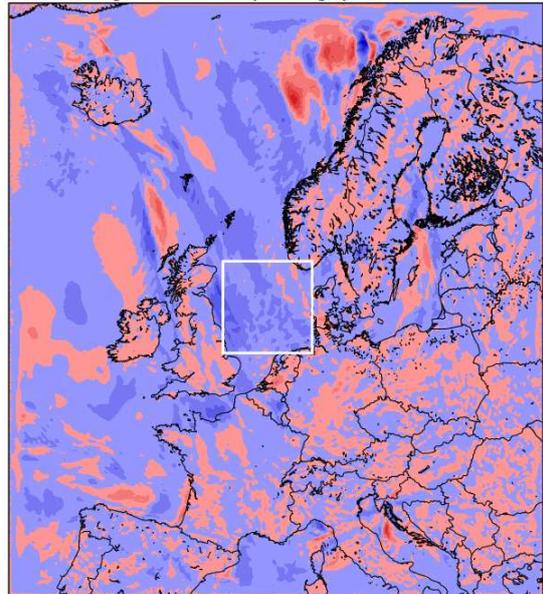
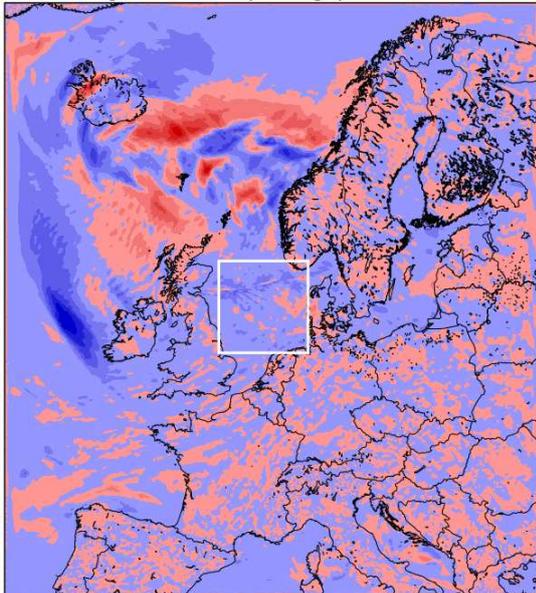
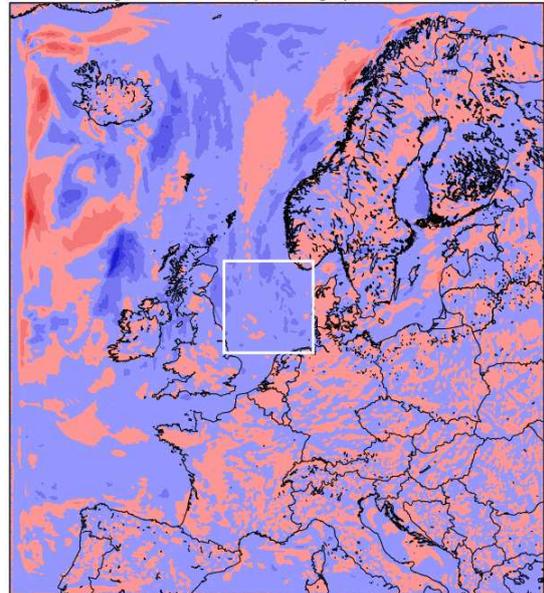


Abbildung 34: Differenz des 6-stündigen Mittels (Höchstwasserstand - 6 Stunden) der 10m-Windgeschwindigkeit zwischen Experiment 13 und dem Referenzexperiment am Pegel Norderney für die Stürme 28, 31, 33 und 35. Oben links Sturm 28 (Anatol, 1999), oben rechts Sturm 31 (Britta, 2006), unten links Sturm 33 (Kyrill, 2007) und unten rechts Sturm 35 (Tilo, 2007).

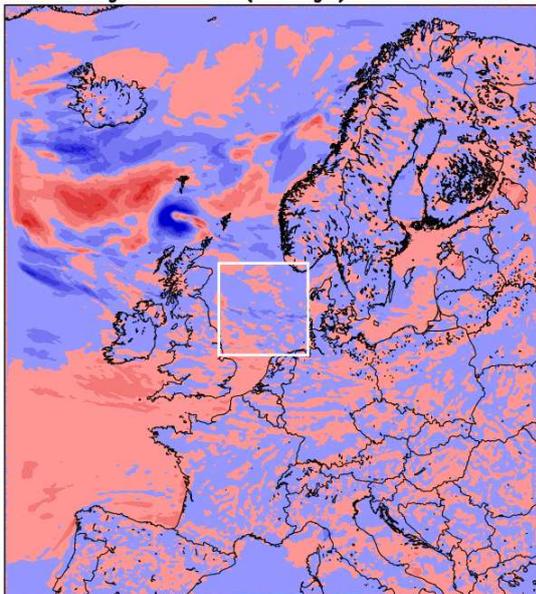
FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 1999113000+ave(90m12)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.504722



FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 2006102900+ave(76m12)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.648391



FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 2007011600+ave(68m12)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.15101



FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 2007110700+ave(58m12)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.601974

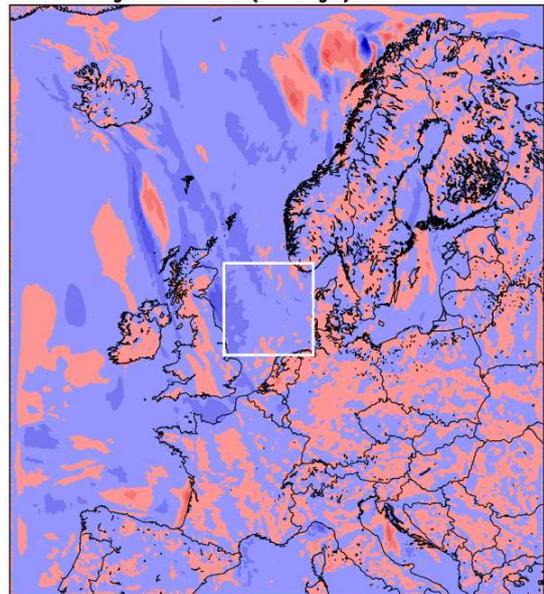
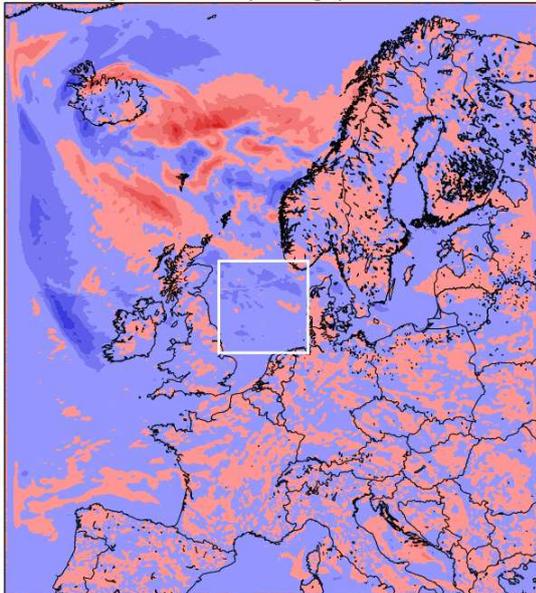
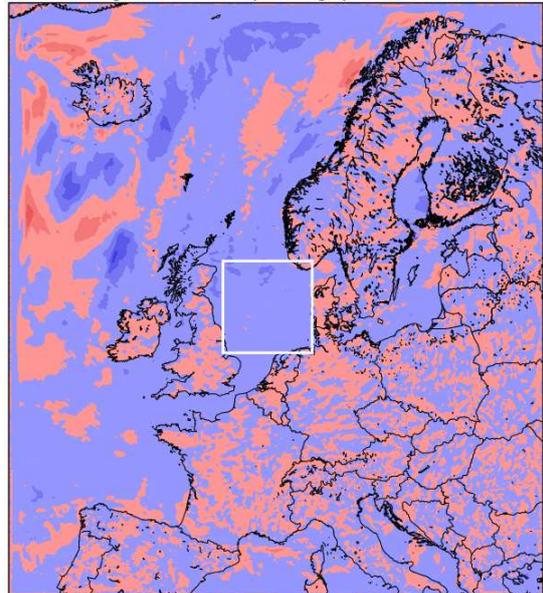


Abbildung 35: Differenz des 12-stündigen Mittels (Höchstwasserstand - 12 Stunden) der 10m-Windgeschwindigkeit zwischen Experiment 13 und dem Referenzexperiment am Pegel Norderney für die Stürme 28, 31, 33 und 35. Oben links Sturm 28 (Anatol, 1999), oben rechts Sturm 31 (Britta, 2006), unten links Sturm 33 (Kyrill, 2007) und unten rechts Sturm 35 (Tilo, 2007).

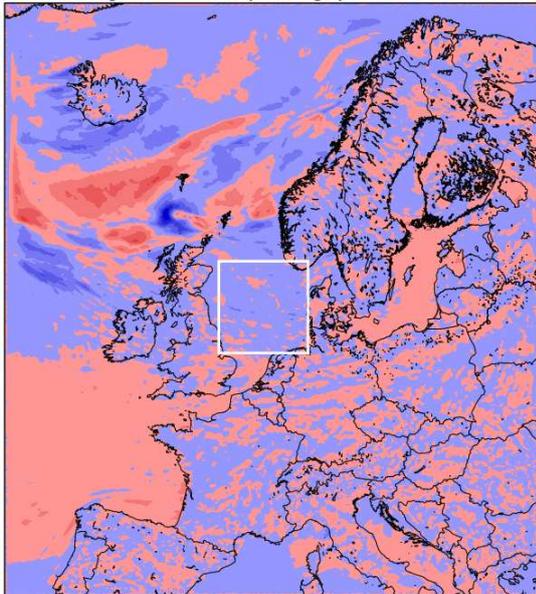
FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 1999113000+ave(90m24)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.607699



FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 2006102900+ave(76m24)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.520001



FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 2007011600+ave(68m24)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.2651



FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 2007110700+ave(58m24)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.546967

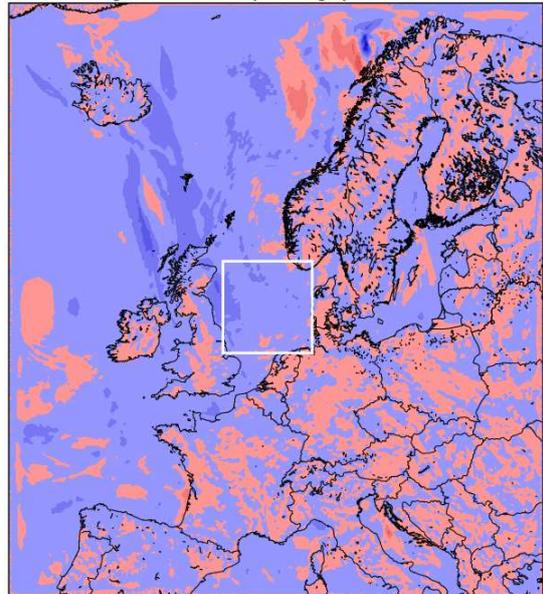
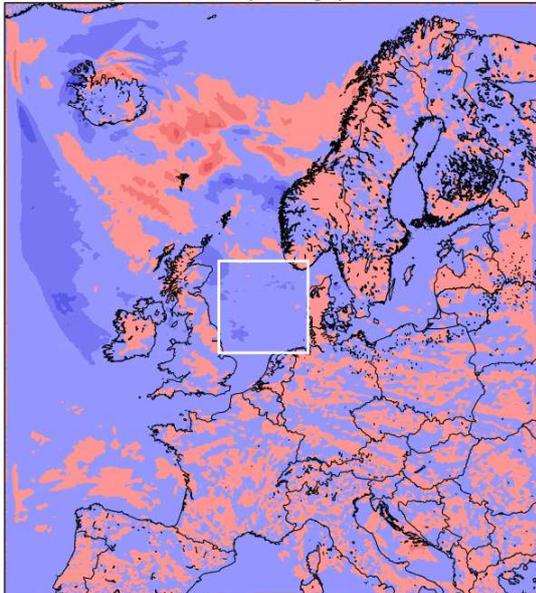
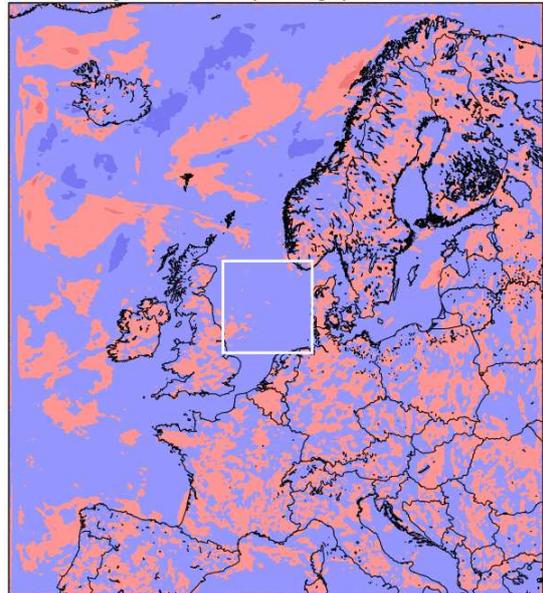


Abbildung 36: Differenz des 24-stündigen Mittels (Höchstwasserstand - 24 Stunden) der 10m-Windgeschwindigkeit zwischen Experiment 13 und dem Referenzexperiment am Pegel Norderney für die Stürme 28, 31, 33 und 35. Oben links Sturm 28 (Anatol, 1999), oben rechts Sturm 31 (Britta, 2006), unten links Sturm 33 (Kyrill, 2007) und unten rechts Sturm 35 (Tilo, 2007).

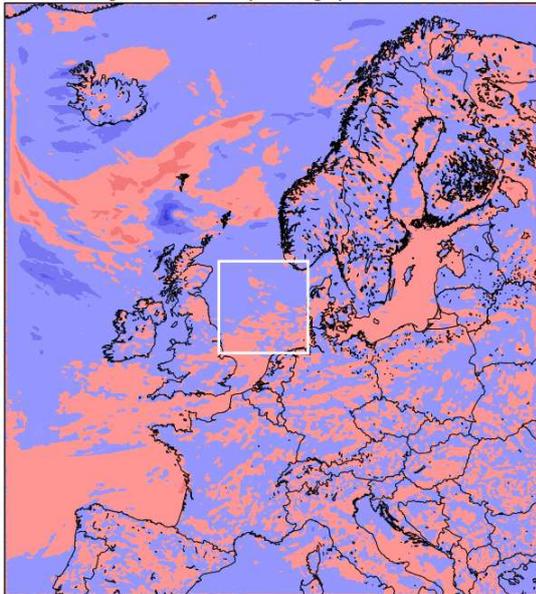
FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 1999113000+ave(90m48)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.585706



FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 2006102900+ave(76m48)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.284293



FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 2007011600+ave(68m48)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.127796



FF\_10m(Exp13-Exp12)/ms<sup>-1</sup> | 2007110700+ave(58m48)h  
Area average North Sea (rectangle): -0.391986

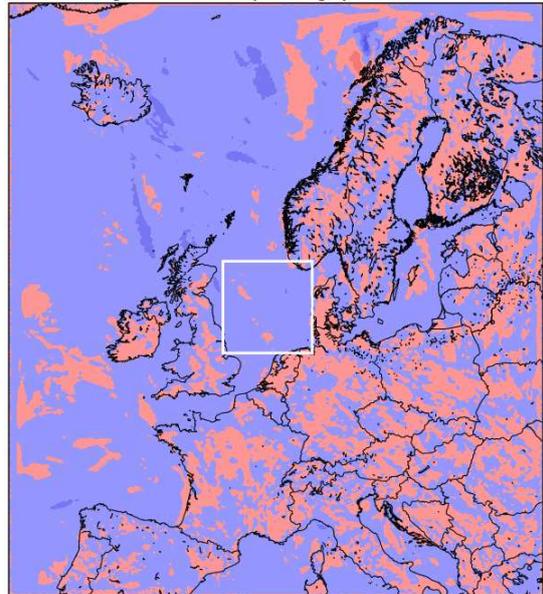


Abbildung 37: Differenz des 48-stündigen Mittels (Höchstwasserstand - 48 Stunden) der 10m-Windgeschwindigkeit zwischen Experiment 13 und dem Referenzexperiment am Pegel Norderney für die Stürme 28, 31, 33 und 35. Oben links Sturm 28 (Anatol, 1999), oben rechts Sturm 31 (Britta, 2006), unten links Sturm 33 (Kyrill, 2007) und unten rechts Sturm 35 (Tilo, 2007).

## Literatur

- Arino, O., Bicheron, P., Achard, F., Latham, J., Witt, R., & Weber, J.-L. 2008. GlobCover: The most detailed portrait of Earth. *ESA Bulletin*, NOV, 24–31.
- Baldauf, M. 2013. A new fast-waves solver for the Runge-Kutta dynamical core. *COSMO Technical Report*, **21**.
- Baldauf, M., Seifert, A., Förstner, J., Majewski, D., Raschendorfer, M., & Reinhardt, T. 2011. Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities. *Mon. Weather Rev.*, **139**(12), 3887–3905.
- Bartholomé, E., & Belward, A. S. 2005. GLC2000: A new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *Int. J. Remote Sens.*, **26**(9), 1959–1977.
- Brecht, B., & Frank, H. 2014. High resolution modelling of wind fields for optimization of empirical storm flood predictions. *Adv. Sci. Res.*, **11**, 1–6.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B. K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., & Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **137**(656, A), 553–597.
- Doms, G., Förstner, J., Heise, E., Herzog, H.-J., Mironov, D., Raschendorfer, M., Reinhardt, T., Ritter, B., Schrodin, R., Schulz, J.-P., Vogel, G., Schraff, C., Hess, R., & Schättler, U. 2014. *COSMO model documentation*. <http://www.cosmo-model.org>. Accessed: 2014-07-15.
- Frank, H., & Majewski, D. 2006. Hindcasts of historic storms with the DWD models GME, LMQ and LMK using ERA-40 reanalyses. *ECMWF Newsletter*, **109**, 16–21.
- Gönnert, G., Dube, S. K., Murty, T., & Siefert, W. 2001. Global Storm Surges. *Die Küste*, **63**, 167–169.
- Lilly, Douglas K. 1966. On the Instability of Ekman Boundary Flow. *J. Atmos. Sci.*, **23**, 481–494.
- Majewski, D., Liermann, D., Prohl, P., Ritter, B., Buchhold, M., Hanisch, T., Paul, G., Wergen, W., & Baumgardner, J. 2002. The operational global icosahedral-hexagonal gridpoint model GME: Description and high-resolution tests. *Mon. Weather Rev.*, **130**(2), 319–338.

- Petersen, M., & Rohde, H. 1991. *Sturmflut: Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe*. Neumünster: Karl Wachholtz Verlag.
- Schraff, C. H. 1997. Mesoscale data assimilation and prediction of low stratus in the Alpine region. *Meteorol. and Atmos. Phys.*, **64**(1-2), 21–50.
- Schraff, C. H., & Hess, R. 2002. Datenassimilation für das LM. *PROMET*, **27**(3/4), 156–164.
- Stauffer, D. R., & Seaman, N. L. 1990. Use of Four-Dimensional data assimilation in a Limited-Area Mesoscale Model Part I: Experiments with synoptic scale data. *Mon. Weather Rev.*, **118**, 1250–1277.
- Stauffer, D. R., & Seaman, N. L. 1994. Multiscale Four-Dimensional data assimilation. *J. Appl. Meteorol.*, **33**, 416–434.
- Uppala, S. M., Kållberg, P., Simmons, A. J., Andrae, U., Bechtold, V. D., Fiorino, M., Gibson, J., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M., Beljaars, A., Van De Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B., Isaksen, L., Janssen, P., Jenne, R., McNally, A. P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N., Saunders, R., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., & Woollen, J. 2005. The ERA-40 re-analysis. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **131**(612, B), 2961–3012.