



Deutscher Wetterdienst

---

Abschlussbericht

# **MUSE**

## **Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten**

Teilprojekt:

Numerische Berechnung physikalisch konsistenter  
Wetterlagen mit Atmosphärenmodellen

gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (bmbf) und fachlich begleitet  
vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen

bmbf Förderkennzeichen: 03KIS039  
KFKI Förderkennzeichen: 78

bearbeitet von: Dipl.-Met. Christian Koziar  
Dr. rer. nat. Volker Renner

Offenbach, 25. Mai 2005

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>                                                                                                              | <b>2</b>  |
| <b>I    EINLEITUNG .....</b>                                                                                                                 | <b>3</b>  |
| 1.1 AUFGABENSTELLUNG .....                                                                                                                   | 3         |
| 1.2 VORAUSSETZUNGEN .....                                                                                                                    | 3         |
| 1.3 PLANUNG UND ABLAUF .....                                                                                                                 | 4         |
| 1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND DER NUMERISCHEN WETTERVORHERSAGE (NWV) ..                                                       | 4         |
| 1.4.1 Datenassimilation .....                                                                                                                | 5         |
| 1.4.2 Reanalysen .....                                                                                                                       | 7         |
| 1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN .....                                                                                                 | 8         |
| <b>II    DETAILLIERTE DARSTELLUNG .....</b>                                                                                                  | <b>9</b>  |
| 2.1 DIE VERWENDETEN NWV-MODELLSYSTEME .....                                                                                                  | 9         |
| 2.1.1 Das Global-Modell des DWD (GME) .....                                                                                                  | 9         |
| 2.1.2 Das Lokal-Modell des DWD (LM) .....                                                                                                    | 11        |
| 2.1.3 Das Global-Modell des EZMW (IFS) .....                                                                                                 | 12        |
| 2.1.4 Das Ensemble Prediction System des EZMW (EPS) .....                                                                                    | 13        |
| 2.2 VORUNTERSUCHUNGEN .....                                                                                                                  | 15        |
| 2.2.1 Statistischer Vergleich von GME und EPS .....                                                                                          | 17        |
| 2.2.2 Der erfolgversprechendste Weg zu extremen Modellsturmfluten .....                                                                      | 19        |
| 2.3 EXPERIMENTE .....                                                                                                                        | 22        |
| 2.3.1 Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 .....                                                                                               | 24        |
| 2.3.2 Unterschiede zwischen IFS und LM .....                                                                                                 | 32        |
| 2.4 ERGEBNISSE DER UNTERSCHIEDLICHEN FÄLLE .....                                                                                             | 38        |
| 2.4.1 Sturmflut vom 23. Februar 1967 .....                                                                                                   | 39        |
| 2.4.2 Sturmflut vom 3. Januar 1976 .....                                                                                                     | 40        |
| 2.4.3 Sturmflut vom 27./28. Februar 1990 .....                                                                                               | 41        |
| 2.4.4 Sturmflut vom 28. Januar 1994 .....                                                                                                    | 42        |
| 2.4.5 Sturmflut vom 3. Dezember 1999 .....                                                                                                   | 43        |
| 2.4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse .....                                                                                                   | 44        |
| 2.5 ANALYSE DER EPS-ROUTINE DES WINTERHALBJAHRES 2003/04 .....                                                                               | 44        |
| 2.6 BEWERTUNG DER ERGEBNISSE .....                                                                                                           | 48        |
| <b>III    ZUSAMMENFASSUNG .....</b>                                                                                                          | <b>49</b> |
| <b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>                                                                                                            | <b>51</b> |
| <b>A    REANALYSE DER STURMFLUT VOM 16./17. FEBRUAR 1962 .....</b>                                                                           | <b>53</b> |
| <b>B    SYNOPTISCHER VERGLEICH VON IFS UND LM ANHAND VON MEMBER NR. 26 DES<br/>62'ER SUPER-ENSEMBLES, START: 15.02.1962, 12:00 UTC .....</b> | <b>55</b> |
| <b>C    TECHNISCHE DOKUMENTATION .....</b>                                                                                                   | <b>62</b> |
| 7.1 PROGRAMME .....                                                                                                                          | 62        |
| 7.2 SKRIPTE .....                                                                                                                            | 64        |
| 7.3 PRAKTISCHER ABLAUF EINES .....                                                                                                           | 65        |
| EPS/LM-EXPERIMENTS .....                                                                                                                     | 65        |
| <b>D    KURZBESCHREIBUNG ALLER MUSE-MODELLEXPERIMENTE .....</b>                                                                              | <b>67</b> |

# I Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Vorhabens „Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten“ (MUSE) war die Entwicklung von Methoden zur statistischen Einordnung physikalisch möglicher, aber noch nicht eingetretener, außergewöhnlich hoher Sturmfluten. Sturmzyklonen, die im deutschen Küstenbereich zu stark erhöhten Pegelständen führen können, treten tatsächlich nur sehr selten auf. Dieser beschränkte Wertevorrat an beobachteten Sturmflutwetterlagen sollte mit Hilfe von atmosphärischen Simulationsmodellen um modellierte Sturmflutereignisse im Hinblick auf Zeitreihenanalysen erweitert werden. Diese Datensätze der beobachteten und der modellierten Sturmfluten sollten anschließend in geeigneter Weise in einem homogenen Gesamtdatensatz vereint und einer statistischen Analyse unterzogen werden. Dabei oblag die numerische Berechnung von physikalisch möglichen Wetterlagen bzw. Windfeldern mit Atmosphärenmodellen dem Deutschen Wetterdienst (DWD), die Durchführung von Windstauberechnungen mit Ozeanmodellen dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und die Einordnung dieser Ergebnisse mit statistischen Verfahren hinsichtlich einer verbesserten Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen.

## 1.2 Voraussetzungen

Es hat bereits Anfang der achtziger Jahre Ansätze gegeben, mit deterministischen Verfahren Extremsturmfluten zu berechnen. So wurden für eine Studie von Hewer [Hewer (1980)] durch einen erfahrenen Synoptiker des DWD aus verschiedenen beobachteten Sturmflutwetterlagen die sturmflutförderlichsten Komponenten extrahiert und in neuen künstlichen Wetterlagen so kombiniert, dass sich extreme, aber nicht undenkbbare Wetterentwicklungen ergaben. Diesen wurden anschließend mit Hilfe eines 2-dimensionalen Wasserstandsmodells maximale Wasserstände zugeordnet.

In jüngerer Zeit - ausgelöst durch das Sturmtief Anatol im Dezember 1999 - sind Fragen nach möglichen noch höheren Sturmfluten, als sie in den Jahren 1976 und 1962 aufgetreten sind, laut geworden. Das Orkantief Anatol stellt einen der stärksten Stürme des 20. Jahrhunderts in Süddänemark dar und Untersuchungen zeigten, dass bei südlicherer Zugbahn und leicht modifiziertem zeitlichem Ablauf die Wasserstände in der Deutschen Bucht 1,5 bis 2m höher hätten eintreten können [Dick und Müller-Navarra (2000)].

Bei diesen beiden Studien kann jedoch die zeitliche Entwicklung der konstruierten Wetterlagen aus Anfangsverteilungen dynamisch nicht nachvollzogen werden. Die Wetterlagen sind somit zwar denkbar, jedoch nicht physikalisch konsistent. Die Studien können daher grundsätzlich in Frage gestellt und die Ergebnisse angezweifelt werden. Außerdem erlaubten die bisherigen Arbeiten keinerlei Aussagen zur Wahrscheinlichkeit derartiger Szenarien. Sie sind daher für Küstenschutzplanungen zunächst nicht verwertbar.

In dieser Hinsicht verfolgt das Projekt „MUSE“ einen verbesserten Ansatz: Zur Erzeugung von Sturmflutwetterlagen kommen numerische Simulationsmodelle zum Einsatz. Auf diese Weise ist es möglich, für jeden beobachteten Termin eine ganze Reihe physikalisch möglicher Wetterlagen zu erzeugen. Dies kommt zum einen dadurch zustande, dass für jedes Zieldatum mehrere Vorhersagen mit unterschiedlichen Startterminen und Vorhersagelängen gerechnet werden können. Zum anderen lassen sich auch direkt durch kleine Veränderungen an den Anfangsdaten eines Vorhersagemodells, welche die möglichen Variationen des Startzustandes innerhalb der Analysengenauigkeit widerspiegeln, weitere meteorologisch sinnvolle Wetterlagen für einen bestimmten

Zielzeitpunkt berechnen. Aus diesem Spektrum an Wetterlagen werden anschließend die Simulationen mit dem größten Sturmflutpotential herausgesucht und für die Versorgung von Ozeanmodellen mit Randbedingungen genutzt. Im letzten Schritt können dann mit statistischen Verfahren die zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten abgeschätzt werden. Die Zeitreihe mit den realen Sturmfluten der letzten 150 Jahre sollte dann mit diesen synthetischen Fällen erweitert und so die bestehenden Unsicherheiten zur Eintrittswahrscheinlichkeit im Extrembereich insgesamt verringert werden.

### **1.3 Planung und Ablauf**

Zu Beginn des Projektes war geplant, durch eine intensive Analyse der Archive globaler Vorhersagen beim Deutschen Wetterdienst (DWD) und beim Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW, bzw. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF) Fälle aufzuspüren, die ein Potential für Sturmfluten in der Nordsee erkennen ließen, und diese in die Bearbeitung einzubeziehen, d.h. insbesondere, diese Vorhersagen für eine Randwertversorgung des hochauflösenden DWD-Regionalmodells (LM, s.u.) zu benutzen. Im Projektverlauf erwiesen sich jedoch einige Anpassungen als notwendig.

So zeigte sich, dass in dem auf ein Jahr begrenzten Archiv des DWD kaum interessante Fälle zu finden waren. Dies war beim Archiv für das Ensemble-Vorhersage-System (EPS, s.u.) des EZMW kein Problem, weil hier jeweils viele Einzelvorhersagen gerechnet und die Ergebnisse längerfristig verfügbar gehalten werden. Dieses Archiv enthält jedoch nur einige ausgewählte Felder, die für die Randwertversorgung des LM nicht ausreichen. Sie hätten daher neu berechnet und vollständiger archiviert werden müssen. Dies scheiterte jedoch daran, dass ältere Vorhersagen nicht reproduzierbar sind.

Letztendlich wurde dann folgendes Vorgehen gewählt: Für bekannte herausragende Sturmflutwetterlagen der Vergangenheit wurden neue Ensemble-Experimente durchgeführt und aus dem so entstandenen Spektrum an Wetterlagen die Ensemble-Member mit dem höchsten Sturmflutpotential für die Randwertversorgung des LM verwendet.

### **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Numerischen Wettervorhersage (NWV)**

Numerische Wettervorhersagemodelle (NWV-Modelle) basieren auf einem geschlossenen Satz von Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht im Allgemeinen aus den Erhaltungsgleichungen für Impuls (Navier-Stokes Bewegungsgleichungen), Masse (Kontinuitätsgleichung) und Energie (1. Hauptsatz der Thermodynamik) sowie aus geeigneten Anfangs- und Randbedingungen und einer numerischen Methode, um das System von Gleichungen zeitlich zu integrieren. Dieser Satz von Gleichungen beschreibt eine ganze Fülle von atmosphärischen Phänomenen unterschiedlichster Größenordnungen, wie z.B. Schönwetterwolken, Gewitter, Hurrikane, Zyklonen.

Das prognostische Gleichungssystem wird meist dadurch integrierbar gemacht, dass unter Beachtung numerischer Stabilitäts- und Konvergenzkriterien alle Differentiale durch Differenzen ersetzt und die Modellvariablen nur an den diskreten Punkten eines Raum- und Zeitgitters definiert werden. Je geringer der horizontale Abstand (die Maschenweite) zwischen zwei Raumgitterpunkten ist, desto kleinere atmosphärische Strukturen können vom Modell simuliert werden. Das Modell kann keine Prozesse explizit simulieren, deren Größenordnung kleiner als die Maschenweite ist. Da aber auch diese so genannten subskaligen Prozesse in der realen Atmosphäre einen großen Einfluss auf den Verlauf des Wetters nehmen können, muss ihre Wirkung im Modell berücksichtigt werden. Dafür hat sich der Begriff „physikalische Parametrisierung“ eingebürgert.



Beim Deutschen Wetterdienst sind derzeit zwei NWV-Modelle im Einsatz: Das Globalmodell GME mit 40km Maschenweite und 40 Schichten<sup>1</sup> und das Lokalmodell LM mit 7 km Maschenweite und 35 Schichten [Majewski und Ritter (2002), Doms et al. (2002)]. Das Globalmodell stellt in einstündigem Rhythmus die seitlichen Randwerte für das genestete Lokalmodell bereit, dessen Vorhersagegebiet auf den mitteleuropäischen Raum beschränkt ist (siehe Abbildung 1.1).

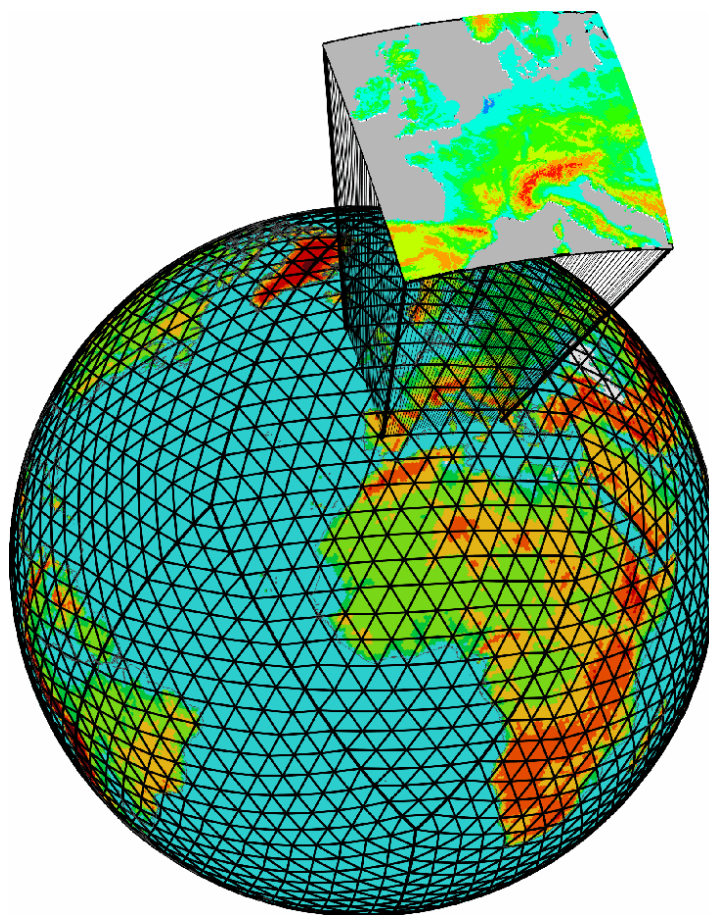


Abbildung 1.1: Nestung des LM-Gitters in das GME-Gitter

### 1.4.1 Datenassimilation

Unter „Assimilation“ wird gemeinhin „Angleichung“ oder „Überführung“ verstanden. In der NWV versteht man unter „Datenassimilation“ die Angleichung eines Modelllaufes an die wirkliche Entwicklung der Atmosphäre, wie sie durch die vorhandenen Beobachtungen beschrieben wird. Sinn des Assimilationsprozesses ist es, ein dreidimensionales Bild der Atmosphäre und deren Unterlage für einen festen Termin zu entwerfen, das z.B. als Anfangszustand für eine Vorhersage genutzt werden kann. Dieses Abbild der Atmosphäre wird auch als „Analyse“ bezeichnet.

Mathematisch gesehen stellt die NWV ein Anfangswertproblem dar. Für alle prognostischen Variablen wird an allen Gitterpunkten ein Anfangswert benötigt. So hatte z.B. die im Vorhaben benutzte Version des GME auf einer Modellfläche 166410 Gitterpunkte. Bei 31 Schichten in der Vertikalen und bei 5 prognostischen Variablen (2 Windkomponenten, Temperatur, spezifischer Gehalt an Wasserdampf und an

<sup>1</sup>Im Vorhaben wurde noch eine ältere Version mit 60km Maschenweite und 31 Schichten eingesetzt.

Wolkenwasser) ergeben sich somit  $25,8 \cdot 10^6$  benötigte Werte. Hinzu kommen die Anfangswerte für die Unterlage (Bodendruck, Temperatur der Grenzfläche zwischen Atmosphäre und Unterlage) sowie Werte für Bodenfeuchte und -temperatur in mehreren Tiefen im Erdboden. Im Idealfall sollten alle diese Werte durch präzise Beobachtungen belegt sein. In der Meteorologie ist dieses Bedürfnis frühzeitig formuliert worden und es sind große Anstrengungen unternommen worden, die Atmosphäre möglichst vollständig zu beobachten. Es ist jedoch offensichtlich, dass im Allgemeinen die Beobachtungen allein nicht ausreichen, den Anfangszustand für ein Vorhersagemodell festzulegen.

Das Anfangswertproblem der NWV ist also zunächst hochgradig unterbestimmt. Daher muss versucht werden, zusätzliche Informationen zu nutzen. Als erstes ist hier die Vorgeschichte zu nennen. Es liegen ja nicht nur Beobachtungen vom aktuellen Termin vor, sondern auch von zurückliegenden Zeiten. Ähnlich wie ein Synoptiker bei der Analyse einer Wetterlage die „Vorkarte“ nutzt, kommt es bei der Datenassimilation darauf an, die zeitliche Dimension mit in den Prozess der Definition des Anfangszustandes einzubeziehen. Es muss also eine Möglichkeit geschaffen werden, Information aus der Vergangenheit zeitlich zu extrapolieren, um sie für die Festlegung des augenblicklichen Zustandes der Atmosphäre nutzen zu können. Für die zeitliche Extrapolation wird in der Datenassimilation das Vorhersagemodell selbst genutzt, meist in Form einer Kurzfristvorhersage vom letzten Analysetermin. Diese Kurzfristvorhersage wird als ‘Erste Näherung’ bzw. ‘First Guess’ bezeichnet. Sie stellt eine Schätzung des wahrscheinlichen Zustandes der Atmosphäre dar, die aber dort, wo Beobachtungen davon abweichen, noch korrigiert werden muss. Dort, wo keine Beobachtungen vorliegen oder wo Beobachtungen und ‘First Guess’ übereinstimmen, ist die ‘Erste Näherung’ identisch mit der endgültigen Analyse. Durch die Nutzung des Vorhersagemodells im Assimilationsprozess erschließt sich eine weitere wichtige Informationsquelle: Das in den Modellgleichungen zusammengefasste Wissen über die Vorgänge in der Atmosphäre. Das Modell macht es möglich, aus räumlichen Strukturen auf zeitliche Tendenzen zu schließen und umgekehrt. Das Konzept der Datenassimilation beruht also im Wesentlichen auf der Verknüpfung eines Vorhersagemodells mit Beobachtungen, um eine möglichst präzise Analyse der Atmosphäre zu erreichen.

In Abbildung 1.2 ist das Prinzip der Datenassimilation für eine beliebige Variable als Funktion der Zeit grafisch dargestellt. Die durchgezogene rote Linie gibt die wirkliche zeitliche Entwicklung der Atmosphäre wieder, die natürlich prinzipiell unbekannt ist. Es liegen lediglich zu einigen Zeitpunkten Beobachtungen vor (gelbe Punkte). Diese Beobachtungen weisen im allgemeinen Beobachtungsfehler auf (grüne Ellipsen). Weiterhin haben wir einen Hintergrundwert (rotes Quadrat) und seinen Fehler (blaue Ellipsen). Beim erstmaligen Start eines Assimilationssystems, dem sog. „Urstart“, beruht dieser erste Hintergrund häufig auf klimatologischen Feldern und liegt somit zunächst recht weit von der Wahrheit entfernt. Im nächsten Schritt werden die beiden Informationen miteinander verknüpft und ergeben die Analyse (schwarze Kreuze) und ihre wahrscheinlichen Fehler (gelbe Ellipsen). Diese Verknüpfung ist der eigentliche Kern der Datenassimilation. Von der Analyse wird dann eine Kurzfristvorhersage gestartet, die die Information aus der Vergangenheit konsistent zum nächsten Analysenzeitpunkt extrapoliert. Dies ist der Hintergrund, der nun schon (hoffentlich) näher an der Wahrheit liegt. Zusammen mit den für diesen Zeitpunkt vorliegenden Beobachtungen ergibt sich eine neue Analyse. Dieser Prozess wird dann iterativ fortgesetzt.

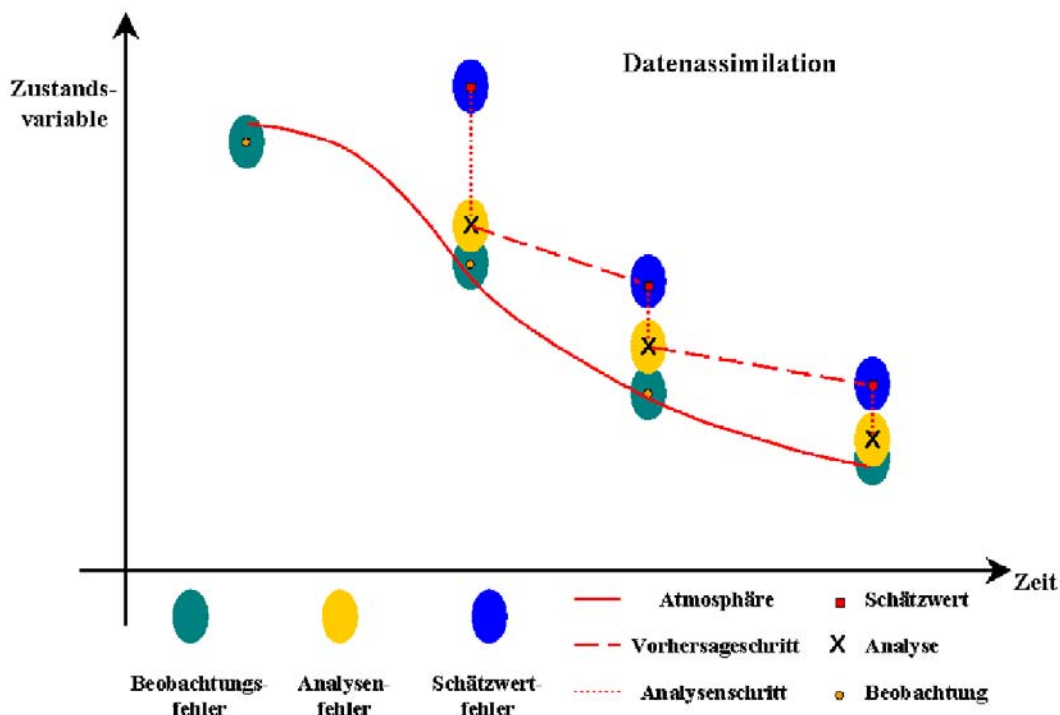


Abbildung 1.2: Prinzip der Datenassimilation für eine beliebige Variable als Funktion der Zeit

Beim DWD erfolgte der Urstart der Datenassimilation für das damalige globale Modell GM im Sommer 1989. Seither läuft dieser Prozess ununterbrochen. Beim Übergang zum aktuellen GME erfolgte kein Urstart, sondern die Analysenfelder wurden vom GM- auf das GME-Gitter interpoliert [Text nach Wergen (2002)].

## 1.4.2 Reanalysen

Für Modell-Simulationen von Zeiträumen, die vor dem Urstart der DWD-Datenassimilation, also vor dem Sommer 1989 liegen, kann somit nicht auf DWD-eigene Analysen zurückgegriffen werden. Länger zurückliegende Zeiträume können aber mit Hilfe so genannter Reanalysen zur Bestimmung des Modell-Anfangszustandes modelliert werden. Reanalysen sind Modell-Analysen, die unter Einbeziehung sämtlicher verfügbarer Beobachtungen mit einem aktuellen NWV-System durchgeführt werden. Sie werden als Reanalysen bezeichnet, um sie von den zeitnah zur Beobachtung durchgeführten Analysen zu unterscheiden.

Bei der Bestimmung des Modellanfangszustandes für den größten Teil der MUSE-Experimente bildeten die im Rahmen des EZMW-Projekts „ERA-40“ durchgeführte Reanalysen die Grundlage. Diese im Nachhinein mit Hilfe eines aktuellen NWV-Systems berechneten Analysen stehen für die vergangenen 40 Jahre (bis zurück zum 01.09.1957) für jeweils 00:00, 06:00, 12:00 und 18:00 UTC zur Verfügung.

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Einbeziehung der am EZMW entwickelten Modelle und Verfahren erforderte eine sehr enge Zusammenarbeit mit den entsprechenden Kollegen in Reading. Am Anfang stand dabei eine praktische Einweisung vor Ort. Dazu verbrachte der Projektangestellte des DWD, Herr Koziar, eine Woche in Reading. Anschließend war er in der Lage, Modellexperimente selbständig zu konfigurieren, zu starten, den Ablauf zu überwachen und die Ergebnisse zu analysieren und weiterzuverarbeiten. Darüber hinaus standen Herrn Koziar auch im weiteren Projektverlauf die Mitarbeiter des EZMW bei unzähligen Fragen und Problemen per E-Mail und telefonisch zur Verfügung.

## II Detaillierte Darstellung

### 2.1 Die verwendeten NWV-Modellsysteme

Modellentwicklung ist ein fortlaufender Prozess, in den aktuelle wissenschaftliche Entwicklungen sowie das Wissen über bestehende Modelldefizite einfließen. So wird nicht nur beim DWD und beim EZMW kontinuierlich daran geforscht, die operationellen Modellvorhersagen zu verbessern. Die sich daraus ergebenden Änderungen am Modellcode werden über ein Versionskontrollsystem verwaltet und in regelmäßigen Abständen zu einer neuen Modellversion vereint. Für gewöhnlich finden solche Versionswechsel mehrmals pro Jahr statt. Sie dienen also dazu, neue oder verbesserte Verfahren im Bereich der Datenassimilation, der Numerik und der physikalischen Parametrisierung in das Modellsystem einzubeziehen sowie neuartige Beobachtungsdaten für die Vorhersage nutzbar zu machen. Parallel dazu machen sich gelegentlich Überarbeitungen des Modellcodes erforderlich, die mehr technischer Art sind. Dies passiert z.B., wenn auf neue Hardware migriert wird oder um die Effizienz des Modells zu verbessern. Versionswechsel bestehen meist aus ein paar dieser Änderungen, zuweilen jedoch sind von den Neuerungen fast alle Systemkomponenten betroffen. Auf dem hohen Entwicklungsstand gegenwärtiger numerischer Wettervorhersagemodelle ist der meteorologische Einfluss der Modelländerungen meist relativ gering.

Genau genommen ist deshalb eine Modellbeschreibung immer mit einer bestimmten Modellversion verbunden. Die nachfolgenden Beschreibungen beschränken sich jedoch auf die grundlegenden Modelleigenschaften und bedürfen daher keiner genauen Angabe einer zugehörigen Modellversion. Für detailliertere, versionsabhängige Informationen sei auf die angegebene Fachliteratur verwiesen.

Grundsätzlich wurden alle Simulationen mit Hilfe einer Modellkette bestehend aus einem globalen und einem darin eingebetteten regionalen Atmosphärenmodell realisiert. Als regionales Modell kam das **Lokal-Modell (LM)** des Deutschen Wetterdienstes zum Einsatz. Als globales Modell wurde hingegen entweder das **Global-Modell** des DWD (**GME**) oder das **Integrated Forecast System (IFS)** des EZMW verwendet. Dabei wurde das IFS immer in Form des **Ensemble Prediction Systems (EPS)** genutzt. Das EPS ist eine Erweiterung des IFS, mit dem ausgehend von einem bestimmten Starttermin mehrere IFS-Modellvorhersagen berechnet werden können. Dieses meist 50 alternative Vorhersagen umfassende Prognosespektrum wird dadurch erzeugt, dass man den Anfangsbedingungen zufällige, im Bereich der Unsicherheiten des ungestörten Anfangszustandes liegende Variationen aufprägt. In Abbildung 2.1 ist die während des Projekts verwendete Modellkette schematisch dargestellt. In den vier nachfolgenden Kapiteln werden die grundlegenden Merkmale dieser Modellsysteme erläutert. Für eine ausführlichere Darstellung sei auf die dort zitierte Literatur verwiesen.

#### 2.1.1 Das Global-Modell des DWD (GME)

Der Deutsche Wetterdienst gehört zu den etwa 15 Wetterdiensten weltweit, die ein globales Wettervorhersagemodell betreiben. Alle anderen Wetterdienste mit eigener Modellierung beschränken sich auf so genannte Ausschnittsmodelle, die das Wetter nur für eine bestimmte geographische Region vorhersagen. Solche Modelle benötigen an den seitlichen Rändern des Modellgebietes die Vorhersagen eines globalen Modells als Antrieb.

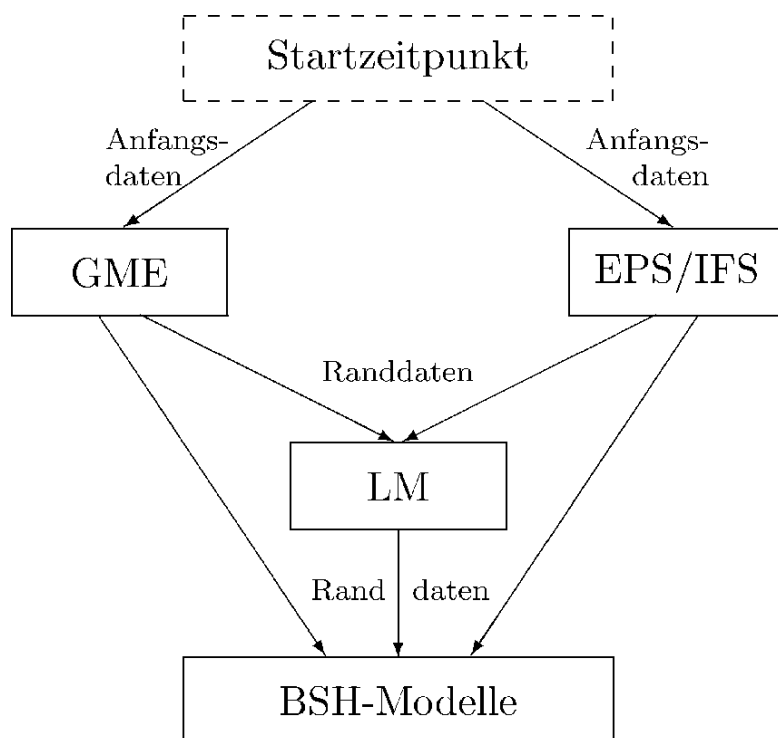


Abbildung 2.1: Modellkette für MUSE-Experimente, bestehend aus zwei globalen (GME + IFS) und einem regionalen Atmosphärenmodell (LM) sowie den Ozeanmodellen auf BSH-Seite

Das Global-Modell GME ist weltweit das erste operationelle Wettervorhersagemodell, das die Vorhersage auf der Basis eines den Globus vollständig umspannenden Dreiecksgitters für die Lösung des adiabatischen Teils der Modellgleichungen berechnet. Der DWD entwickelte das GME in den Jahren 1995 bis 1998 basierend auf Studien des amerikanischen Wissenschaftlers John Baumgardner (Los Alamos National Laboratories); s. hierzu [Majewski et al. (2002)]. Gegenüber konventionellen Gitterstrukturen wie dem geographischen Gitter bietet das Dreiecksgitter den Vorteil einer recht geringen Variabilität der Gitterflächengröße. So liegen die Variationen der Gitterweite bei unter 20 %. Das üblicherweise auftretende Polproblem, bedingt durch die Konvergenz der Meridiane mit Annäherung an den Pol, tritt im Dreiecksgitter nicht auf.

Ein in die Erdkugel platziertes Ikosaeder bildet den Kern der Gitterstruktur. Durch Verbindung der Ecken des Ikosaeders mit Großkreisabschnitten auf der Kugel entstehen 20 gleichseitige sphärische Dreiecke mit einer Seitenlänge von etwa 7054 km. Durch sukzessive Unterteilung (z.B. Halbierung) der sphärischen Dreiecke wird ein Gitter der erwünschten Modellauflösung erzeugt. Als Maschenweite wird dabei die mittlere Seitenlänge der kleinsten sphärischen Dreiecke bezeichnet; für die im Projekt MUSE eingesetzte GME-Version beträgt sie 60 km. Die Ecken der Dreiecke (Gitterpunkte) sind von sechs bzw. fünf Dreiecken umgeben. Die Gitterpunkte repräsentieren deshalb hexagonale bzw. pentagonale Flächen. Das GME-Gitter beschreibt also die Kugeloberfläche mit sehr vielen (bei 60 km Maschenweite: 163830) hexagonalen und 12 pentagonalen Flächen (nämlich an den Ecken des zugrunde liegenden Ikosaeders).

Die mittlere Größe der Flächenelemente beträgt bei 60 km Maschenweite 3100 km<sup>2</sup>. Alle Modellvariablen, z.B. Druck, Temperatur, Windgeschwindigkeit und Feuchte, sind als Mittelwerte über die Flächenelemente anzusehen. Auch die Orographie des Modells wird als Flächenmittelwert von hochaufgelösten Datensätzen bestimmt. Deshalb kann GME natürlich viele lokale Details der Landschaft, die aber durchaus einen prägenden Einfluss auf das Wetter haben können, nicht erfassen. Die Vorhersage solcher lokalen

Effekte, z.B. der Kanalisierung der Strömung im Rheintal oder die Entwicklung von Land-/Seewindzirkulationen an Nord- und Ostsee, ist die Aufgabe des hochauflösenden Lokal Modells LM mit einer Maschenweite von 7km.

Die prognostischen Variablen des GME sind: Bodendruck, horizontale Windkomponenten, Temperatur, Wasserdampf, Wolkenwasser und Wolkeneis in der Atmosphäre vom Boden bis in etwa 31 km Höhe, sowie Temperatur und Wassergehalt in zwei Bodenschichten, Schneemenge und Interzeptionswasser. Außerdem wird der großräumige Transport von (stratosphärischem) Ozon vorhergesagt.

Neben horizontalen und vertikalen Transportvorgängen (den so genannten adiabatischen Prozessen) spielen diabatische Prozesse wie Strahlung, Turbulenz, großräumiger und konvektiver Niederschlag eine wichtige Rolle für die Wettervorhersage. Die geeignete Beschreibung dieser diabatischen Prozesse ist das Ziel der physikalischen Parametrisierungen.

Im täglichen Routineeinsatz des GME ist zwischen dem Datenassimilationszyklus und dem Vorhersagemodus zu unterscheiden. Um den Anfangszustand für die GME-Vorhersagen zu bestimmen, werden im Rahmen der Datenassimilation jeweils dreistündige GME-Vorhersagen (der so genannte First Guess: Schätzwert) durch alle für diesen Zeitpunkt vorliegenden Beobachtungen so korrigiert, dass im Mittel diese Analyse dem wahren Zustand der Atmosphäre möglichst nahe kommt. Dreimal am Tage werden für die Wettervorhersage längere Modellrechnungen durchgeführt, und zwar ausgehend von 00 und 12 UTC<sup>2</sup> bis 174 Stunden, und von 18 UTC aus 48 Stunden. Je Vorhersagetag benötigt GME etwa 15 Minuten Rechenzeit und erzeugt eine Datenmenge (Vorhersagefelder in stündlichem (dreistündigem) Abstand) von rund 14 GByte für eine 7-Tage-Prognose.

Neben der globalen Wettervorhersage dienen die vorhergesagten Felder des GME auch als seitliche Randwerte für Ausschnittsmodelle, z.B. für das Lokal Modell LM beim DWD. GME-Felder bilden auch die Basis für globale Ausbreitungsrechnungen im Falle von Störfällen in kerntechnischen Anlagen.

Der vorangegangene Text beschreibt die im Vorhaben verwendete ältere GME-Modellversion. Abweichend davon hat die zum Ende des Projekts in der DWD-Routinevorhersage eingesetzte Version eine Maschenweite von 40 km, 40 vertikale Schichten sowie 7 Schichten im Erdboden [Darstellung nach DWD (2004a); eine ausführlichere Modellbeschreibung findet sich in Majewski und Ritter (2002)].

## 2.1.2 Das Lokal-Modell des DWD (LM)

Das LM bildet zusammen mit dem GME den Kern des numerischen Wettervorhersagesystems des DWD.

Das LM ist eines der ersten operationellen Wettervorhersagemodelle weltweit, das die dynamischen Grundgleichungen „Eulersche Gleichungen“ ohne skalenabhängige Näherungsannahmen verwendet. Solche nichthydrostatischen Modelle lösen im Gegensatz zu traditionellen hydrostatischen Modellen eine prognostische (statt einer diagnostischen) Gleichung für die Vertikalbewegung. Nichthydrostatische Modelle können im Prinzip beliebig kleine Gittermaschenweiten, z.B. 100 m x 100 m, nutzen. Natürlich muss z.Z. für die operationelle Wettervorhersage wegen der beschränkten Rechnerressourcen eine gröbere Auflösung verwendet werden.

Das LM überdeckt ganz Mitteleuropa mit einem quadratischen Gitter der Kantenlänge 7km. Die mittlere Größe der Flächenelemente ist im LM also nur 49 km<sup>2</sup>, während sie im GME 3100 km<sup>2</sup> beträgt. Deshalb kann LM viele lokale Details der Landschaft, die einen

---

<sup>2</sup>Koordinierte Weltzeit (UTC, engl.: Coordinated Universal Time)

prägenden Einfluss auf das Wetter haben, explizit erfassen. Die detaillierte Vorhersage von Land-/Seewindzirkulationen an Nord- und Ostsee, der Kanalisierung der Strömung im Rheintal, der Modifikation der Wolken und Niederschläge durch die Mittelgebirge und die Erfassung anderer wetterrelevanter, kleinräumiger meteorologischer Strukturen ist die Hauptaufgabe des LM. Es ist deshalb das wichtigste Wettervorhersagemodell des DWD für den Zeitbereich bis 48 Stunden.

Die prognostischen Variablen des LM sind: Horizontale und vertikale Windkomponenten, Druck, Temperatur, Wasserdampf, Wolkenwasser, Wolkeneis und turbulente kinetische Energie vom Boden bis etwa 22 km Höhe. Zusätzlich werden die Temperatur und der Wassergehalt in zwei Bodenschichten, Schneemenge und Interzeptionswasser vorhergesagt.

Neben horizontalen und vertikalen Transportvorgängen (den so genannten adiabatischen Prozessen) spielen diabatische Prozesse wie Strahlung, Turbulenz, großräumiger und konvektiver Niederschlag eine wichtige Rolle für die Wettervorhersage. Die geeignete Beschreibung dieser diabatischen Prozesse ist das Ziel der physikalischen Parametrisierungen.

Im täglichen Routineeinsatz des LM ist zwischen dem Datenassimilationszyklus und dem Vorhersagemodus zu unterscheiden. Der Anfangszustand der LM-Vorhersagen wird im Rahmen der kontinuierlichen Datenassimilation mittels einer so genannten „Nudging“-Analyse<sup>3</sup> bestimmt. Dreimal am Tage werden für die Wettervorhersage 48-stündige Modellrechnungen durchgeführt, und zwar ausgehend von den Analysen für 00, 12 und 18 UTC.

Die weitere Entwicklung des LM findet in internationaler Kooperation mit anderen Wetterdiensten in Europa statt. Am **Consortium for Small scale Modelling COSMO** sind z.Z. die Wetterdienste aus Deutschland, Schweiz, Italien, Griechenland und Polen beteiligt. In jedem dieser Länder forschen Wissenschaftler auf den verschiedensten Arbeitsgebieten, z.B. Datenassimilation, Numerik, physikalische Parametrisierungen, Softwaredesign, Verifikation, Diagnostik und Interpretation. Diese internationale Arbeitsteilung erlaubt es den beteiligten Wetterdiensten, mit relativ geringen Personalressourcen ein sehr komplexes Modellsystem zu entwickeln und in jedem Land operationell zu betreiben.

Für wissenschaftliche Untersuchungen wird das LM an vielen Universitäten und Großforschungseinrichtungen in Deutschland und weltweit eingesetzt [Darstellung nach DWD (2004b); eine ausführlichere Modellbeschreibung findet sich in Doms et al. (2002)].

### 2.1.3 Das Global-Modell des EZMW (IFS)

Das globale Modell des EZMW benutzt dieselben Grundgleichungen wie das des DWD. Im Unterschied zu diesem ist es jedoch ein so genanntes Spektralmodell. Dabei sind die prognostischen Variablen nicht durch Werte auf einem horizontalen Gitter, sondern als Koeffizienten von Kugelflächenfunktionen definiert.

Die Konfiguration der für die deterministische 10-Tage-Vorhersage benutzten Modellversion wird mit TL511L60 wiedergegeben. Dabei gibt die erste Ziffer an, dass auf einem Großkreis der Erde maximal 511 Wellen berücksichtigt werden. Die (durch den Abstand von Maximum und Minimum der kleinsten Wellen definierte) horizontale

---

<sup>3</sup>Bei der Methode des „Nudging“, zu übersetzen als „stupsen“ oder „leicht anstoßen“, werden in einer zeitlichen Integration des Modells die prognostischen Variablen an die jeweils verfügbaren Beobachtungen relaxiert. Diese Integration liefert damit eine Nachbildung der Atmosphäre, der zu beliebigen Zeitpunkten Analysen entnommen werden können.



Auflösung beträgt demnach etwa 40 km. Die zweite Ziffer besagt, dass das Modell 60 vertikale Schichten hat. Die reduzierte Auflösung des Ensemble-Vorhersage-Systems (s. nachfolgendes Kapitel 2.1.4) wird entsprechend mit TL255L40 wiedergegeben.

Die Berechnung der physikalischen Parametrisierungen geschieht nach einer Transformation auf ein so genanntes Gauß-Gitter. Dabei werden in Nähe der Pole die in zonaler Richtung sehr dicht benachbart liegenden Punkte ausgedünnt. Die physikalischen Parametrisierungen dienen dem gleichen Zweck wie im GME, auch wenn im Einzelnen natürlich unterschiedliche Ansätze benutzt werden. Ein für unser Vorhaben wichtiger Unterschied besteht darin, dass bei der Berechnung der bodennahen Flüsse über See der gleichzeitig vorhergesagte Seegang berücksichtigt wird. Bei den DWD-Modellen ist der Seegang dagegen entkoppelt, d.h., er wird durch die Vorgänge in der Atmosphäre erzeugt, wirkt aber nicht auf diese zurück. Die Rückwirkung ist bekanntermaßen relativ gering und muss daher nicht unbedingt modelliert werden; die unterschiedliche Behandlung trägt aber dazu bei, dass die Ansätze für die bodennahen Impulsflüsse über See praktisch nicht vergleichbar sind.

Ein wesentlicher Unterschied zum GME besteht auch in der Bestimmung des Anfangszustandes. Dafür wird beim EZMW eine so genannte vierdimensionale variationelle Datenassimilation benutzt. Sie bestimmt den Anfangszustand mit Hilfe einer zeitlichen Vor- und Rückwärtsintegration unter Minimierung einer Kostenfunktion für die Abweichungen zwischen Modellzustand und verfügbaren Beobachtungen.

Detailliertere Informationen zum IFS finden sich unter EZMW, eine sehr ausführlichere Modellbeschreibung ist unter EZMW einsehbar.

## 2.1.4 Das Ensemble Prediction System des EZMW (EPS)

In den letzten sechs bis acht Jahren erfuhr die Güte numerischer Wettervorhersagen beachtliche Verbesserungen. So ist es heute möglich, Wetterumstellungen im großskaligen Bereich, beispielsweise winterliche Kaltluftausbrüche oder die Umstellung von blockierenden auf zonale Wetterlagen im mittelfristigen Bereich mit NWV-Modellen erfolgreich vorherzusagen. Eklatante Fehler in den Vorhersagen für Tag fünf treten nur in etwa 5 % aller Fälle auf. Einhergehend mit dieser Entwicklung erlangt eine andere Fehlerquelle immer mehr an Gewicht: Die unvermeidlichen Ungenauigkeiten im Modell-Anfangszustand und ihre nichtlinearen Auswirkungen. Für die Abschätzung der Auswirkungen dieser Analysefehler auf die Vorhersage wurde am EZMW ein praktisches Hilfsmittel entwickelt: Das Ensemble Prediction System (EPS).

Die Berechnung der zeitlichen Entwicklung einer atmosphärischen Strömung ausgehend von einem aus Beobachtungen abgeleiteten Anfangszustand ergibt die deterministische Vorhersage. Man kann nun eine Reihe zusätzlicher Simulationen durchführen, indem man den Anfangszustand im Rahmen der Beobachtungsunsicherheiten variiert. Die Instabilitäten der atmosphärischen Strömung verstärken die Anfangsvariationen. Diese Technik nennt man Monte Carlo Ensemble Simulationen. Wettervorhersagen werden durch diese Technik zu Szenariobeschreibungen für den zukünftigen Zustand der Atmosphäre, die einen wahrscheinlichsten Weg und mögliche, u.U. extreme Abweichungen skizzieren.

Zur Erfassung der Ungewissheit in der deterministischen Vorhersage und zur Erweiterung der Vorhersagemöglichkeiten in der Mittelfrist (3-10 Tage) werden am EZMW seit 1992 routinemäßig Ensemblevorhersagen auf der globalen Skala erstellt. Zentraler Bestandteil des Ensemblevorhersagesystems ist das am EZMW entwickelte globale NWV-Modell „IFS“ (Integrated Forecast System), welches für die Ensemblevorhersagen mit halbiertem horizontaler Auflösung und mit 40 statt 60 Schichten im Vergleich zur deterministischen Vorhersage betrieben wird. Ein Experiment mit dem

EPS besteht dementsprechend aus einer ungestörten Vorhersage (dem sog. „Control“) und 50 zum gleichen Zeitpunkt gestarteten, mehr oder weniger unterschiedlich ablaufenden IFS-Modellsimulationen. Die Unterschiede innerhalb eines solchen Ensembles sind dadurch bedingt, dass das EPS die räumlich-zeitlich variablen Unsicherheiten im Anfangszustand und in einer pragmatischen Form auch Unsicherheiten in den Parametrisierungen berücksichtigt. Letztere werden im EZMW-System dadurch einbezogen, dass die Tendenzen der prognostischen Variablen durch subskalige Prozesse mit Hilfe von Zufallsamplituden verändert werden, die horizontal und zeitlich variieren. Diese Methode berücksichtigt also einerseits die Ungenauigkeiten in den Parametrisierungen der subskaligen physikalischen Prozesse. Andererseits spiegeln sich im EPS auch die Schwankungsbreiten der Randwerte bei starker horizontaler Inhomogenität in Rauigkeit, Bewuchs oder Orographie durch statistische Ansätze in der Vorhersage wieder [nach EZMW (2002b)].

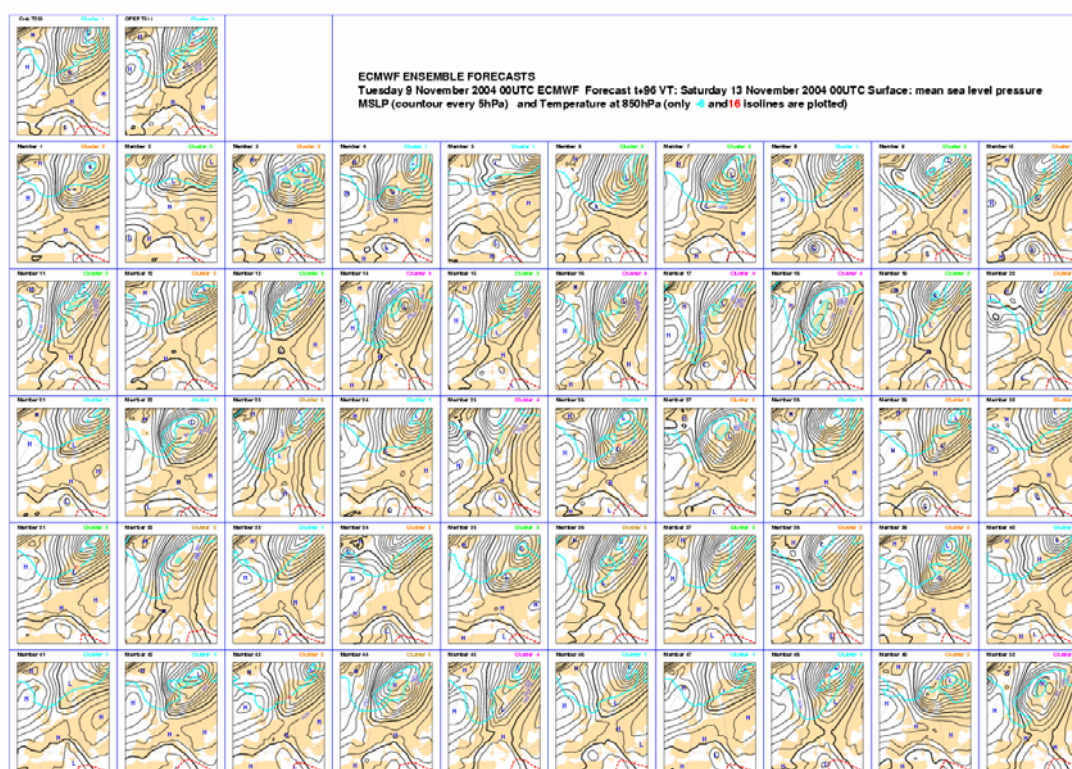


Abbildung 2.2: EZMW Ensemble Vorhersage vom 09.11.2004, 00:00 UTC  
für den 13.11.2004, 00:00 UTC

In Abbildung 2.2 ist das Ergebnis einer solchen EPS-Vorhersage am Beispiel des auf NN reduzierten Luftdrucks und der Temperatur in 850 hPa dargestellt. Oben links sind zum Vergleich die ungestörte EPS-Kontrollvorhersage („Cntr T255“) und die deterministische operationelle Vorhersage („Oper T511“) abgebildet. Darunter sind in 5 Zeilen zu je 10 Spalten die 50 Member des Ensembles zu sehen.

Mit einem solchen Ensemblevorhersagesystem ist es also möglich, die Wetterentwicklung statistisch zu erfassen und somit eine Aussage über die Eintrittswahrscheinlichkeiten erwarteter Wetterereignisse zu treffen.

## 2.2 Voruntersuchungen

Für das Projekt „MUSE“ sind primär solche Fälle interessant, bei denen Vorhersagemodelle Wetterlagen simulieren, die im Bereich der Deutschen Bucht zu einem außergewöhnlich starken Hochwasser führen würden. Solche Lagen sind gekennzeichnet durch starke und/oder lang anhaltende westliche Winde und einen dadurch bewirkten Stau von Nordseewasser an der Küste. Der entscheidende Modellparameter ist demnach der bodennahe Horizontalwind. Sturmfluten werden nach Auskunft der Projektpartner beim BSH unter den folgenden Bedingungen erwartet:

|               |                                                                   |
|---------------|-------------------------------------------------------------------|
| Gebiet:       | Innere Deutsche Bucht<br>(53,8 – 54,75 ° n.Br., 7,5 – 9,0 ° ö.L.) |
| Windrichtung: | WSW – NNW<br>(247,5 ° – 337,5 °)                                  |
| Windstärke:   | ab 8 (~17m/s)                                                     |
| Entwicklung:  | von SW auf NW drehend                                             |
| Zeitskala:    | 3 h vor Hochwasser sind entscheidend                              |

Um dies objektiv und auf einen Blick beurteilen zu können, wurde eine aus Windstärke und Windrichtung zusammengesetzte Größe definiert: Der Effektivwind. Er wurde festgelegt als Anteil des 10m-Horizontalwindes, der aus Richtung 295 ° kommt (siehe Abbildung 2.3). Diese spezielle Windrichtung wurde laut Auskunft des BSH in empirischen Studien als der Wert ermittelt, bei dem die Windschubspannung in die Deutsche Bucht hinein kulminiert. Im Flächenmittel über die Deutsche Bucht ist der Effektivwind demzufolge ein Maß dafür, wie stark sich durch den Wind das Wasser an der Küste der Deutschen Bucht aufstaut. Somit kann er im Rahmen dieses Forschungsvorhabens als erste Orientierung für das Sturmflutpotenzial einer Wettersituation herangezogen werden.

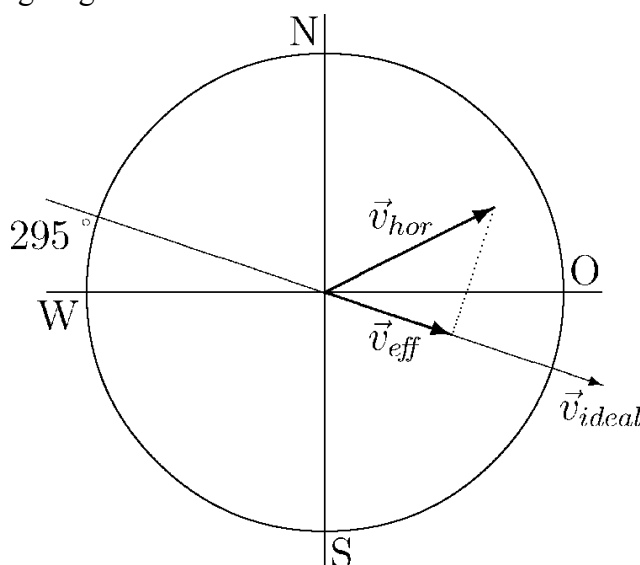


Abbildung 2.3: Definition des Effektivwindes  $\vec{v}_{eff}$  durch vektorielle Zerlegung des Horizontalwind-Vektors  $\vec{v}_{hor}$

Die Schnittstelle, über die NWV-Modelle ihre Eingabedaten erhalten und über die sie ihre Ergebnisse herausgeben, ist so optimiert, dass die Daten möglichst wenig Speicherplatz beanspruchen. Für gitterbasierte Modelle hat sich hier das international normierte „GRIB“-Format (**GR**idded **I**n **B**inary) etabliert. Dieses binäre Datenformat ist ein effizientes Hilfsmittel zur Übertragung großer Mengen an gitterorientierten Daten.

Durch die Kodierung der Informationen im GRIB-Code werden die Dateien kompakter, als dies bei zeichenbasierten Kodierungen möglich wäre.

Um also eine modellierte Wettersituation schon vor der Bearbeitung mit den Ozeanmodellen des BSH auf ihr Sturmflutpotential hin, einfach und trotzdem aussagekräftig begutachten zu können, wurde ein Programm entwickelt, welches aus einer GRIB-Datei die 10m-Windfelder extrahiert und analysiert. D.h., das Programm berechnet den Effektivwind für alle Gitterpunkte in der Inneren Deutschen Bucht in 10m Höhe (7,5 – 9,0 ° ö.L., 53,8 – 54,75 ° n.Br.; siehe Abbildung 2.4) und ermittelt anschließend den Mittelwert über die so gebildeten Einzelwerte.

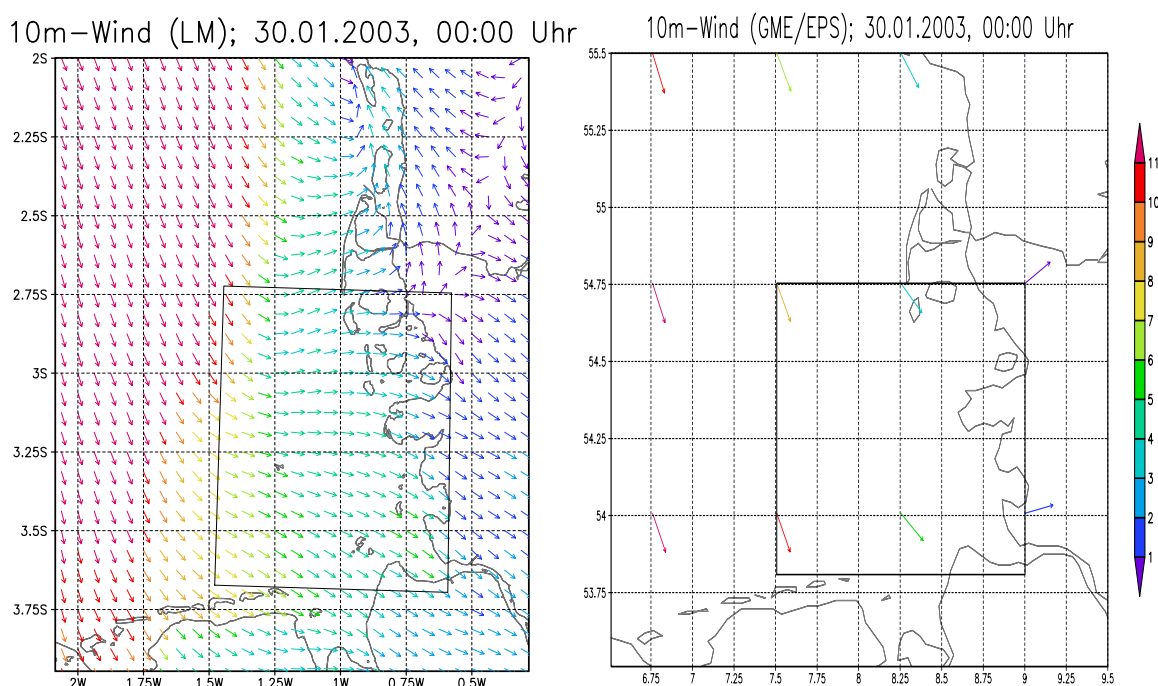


Abbildung 2.4: Verteilung der Gitterpunkte von LM und GME/EPS am Beispiel des 10m-Horizontalwindes über der Deutschen Bucht; dem GME-/EPS-Bild liegen die Windwerte eines regulären  $\lambda$ - $\phi$ -Gitters zugrunde

Analysiert man mit Hilfe dieses Programms eine einzelne Modellvorhersage, ergibt sich typischerweise ein Bild wie im linken Teil von Abbildung 2.5. Dort sind Betrag und Richtung des gemittelten 10m-Windes sowie der Effektivwind als Funktion der Zeit aufgetragen. Anhand dieser Grafik wird auch sehr schön der Zusammenhang zwischen Effektivwind und Windgeschwindigkeit/Windrichtung ersichtlich: Wenn der Wind aus Richtung 295 ° kommt, ist Effektivwind gleich absolutem Horizontalwind. Bei davon abweichenden Windrichtungen ist der Effektivwind immer kleiner als der Absolutwind. Der Effektivwind kann auch negative Werte annehmen. Allgemein gilt: Positiver Effektivwind steht für auflandigen Wind und zeigt an, dass vom Wind Wasser in die Deutsche Bucht hinein verdriftet wird. Negativer Effektivwind dagegen steht für ablandigen Wind und bewirkt ein Verdriften von Nordseewasser aus der Deutschen Bucht heraus.

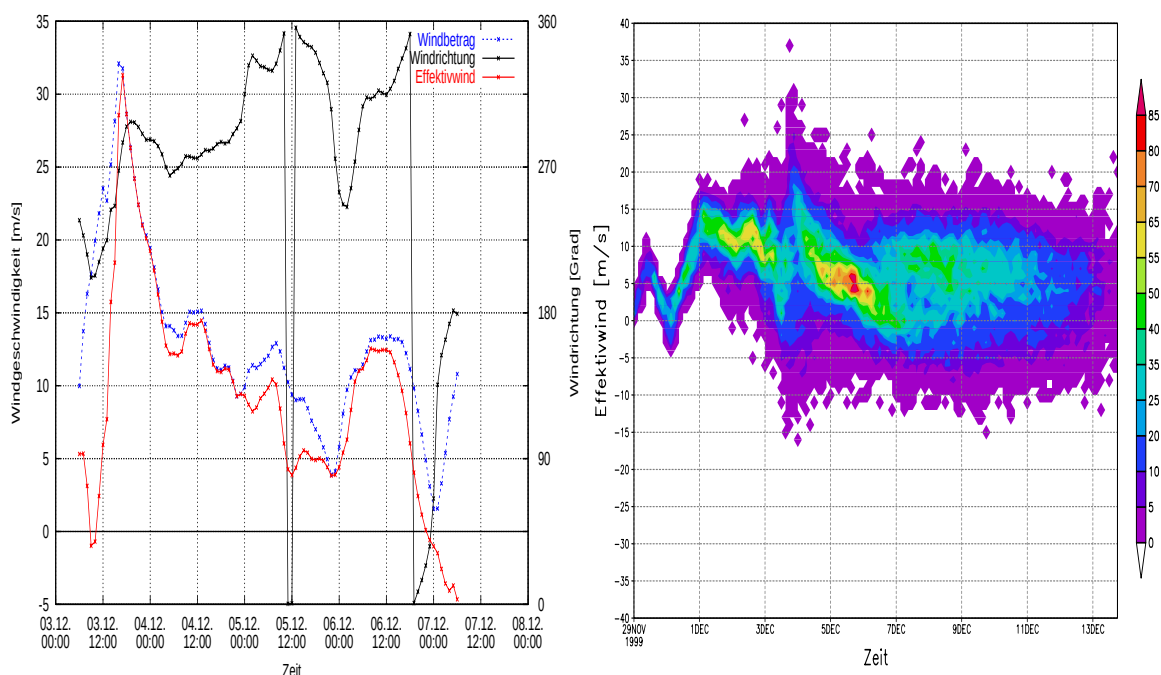


Abbildung 2.5: Effektivwind einer LM-Vorhersage (links) und eines Ensemble-Experiments bestehend aus 1000 IFS-Vorhersagen (rechts)

Im rechten Teil von Abbildung 2.5 ist der Effektivwind eines Experiments mit dem Ensemble Prediction System dargestellt. Da ein EPS-Lauf aus 50 einzelnen Vorhersagen des Globalmodells IFS besteht, und ein EPS-Experiment wiederum aus mehreren EPS-Läufen bestehen kann (vgl. Kapitel 2.3), existiert für einen bestimmten vorhergesagten Zeitpunkt nicht mehr nur eine Vorhersage, sondern mehrere Vorhersagen mit unterschiedlichen Startzeitpunkten und unterschiedlicher Vorhersagelänge. Das Ergebnis lässt sich somit nicht mehr als einzelne Zeitreihe visualisieren. Um trotzdem noch einen Überblick über die gesamte Bandbreite der unterschiedlichen Vorhersagen zu erhalten, bietet sich hier die Darstellung des Effektivwinds als dreidimensionaler Konturplot an. Dazu werden nahe beieinander liegende Werte des Effektivwinds in einer Klasse zusammengefasst. Da das Spektrum des für einen bestimmten Zeitpunkt vorhergesagten Effektivwinds im Rahmen der MUSE-Simulationen nie außerhalb des Bereichs von  $-40,0$  m/s bis  $+40,0$  m/s lag, wurde eine Klasseneinteilung in 81 Klassen mit der Klassenbreite 1 m/s gewählt. Die kleinste Klasse umfasst demzufolge die Effektivwindwerte von  $-40,50$  m/s bis  $-39,49$  m/s, Klassenmitte und gleichzeitig repräsentativer Wert für die ganze Klasse ist  $-40,0$  m/s. Die Zuordnung des Effektivwinds in die entsprechenden Klassen erfolgt also anschaulich durch mathematisches Runden auf ganze Zahlen. Stellt man diese Häufigkeitsverteilungen farbig als Funktion der Zeit dar, wie dies im rechten Teil von Abbildung 2.5 stellvertretend für das EPS-Experiment zur Sturmflut vom 3. Dezember 1999 gemacht wurde, lassen sich mit dieser Technik komplexe EPS-Experimente letztendlich durch eine einzige Grafik illustrieren und charakterisieren.

## 2.2.1 Statistischer Vergleich von GME und EPS

In den Routinevorhersagen des DWD werden für die Randsteuerung des LM Daten aus einer vorgeschalteten GME-Simulation verwendet. Dieses Schema wurde anfangs auch im Projekt „MUSE“ zur Simulation der Sturmflutwetterlagen genutzt. Parallel dazu wurde eine weitere Methode zur Bereitstellung von Anfangs- und Randdaten für das LM angewendet: Die LM-Randsteuerung direkt durch EPS-Modellergebnisse (siehe auch Abbildung 2.1 auf Seite 10).

Zunächst sollte untersucht werden, ob es systematische Unterschiede zwischen beiden Modellen bezüglich des 10 m-Horizontalwindes gibt. Als Untersuchungsgebiet diente wiederum die Innere Deutsche Bucht. Dazu wurde der 10m-Horizontalwind über die Gitterpunkte in der Deutschen Bucht gemittelt und einer statistischen Untersuchung unterzogen. D.h., dass

- mittlerer Betrag des Windes  $\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$ ,
- Varianz des Windes  $\sigma = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{v} - v_i)^2$ ,
- 90%-Perzentil des Windes  $Pe_{90\%} = \text{Wert, der in 10\% aller Fälle überschritten wird}^4$

für EPS und GME für die Monate Januar und Februar 2003 berechnet wurden. Das Ergebnis ist Tabelle 2.1 zu entnehmen. Daraus wird ersichtlich, dass die Werte von EPS und GME im betrachteten Zeitraum bzgl. des mittleren Windes nahe beieinander liegen. Die systematischen Unterschiede zwischen beiden Modellen bewegen sich in einem Bereich von weniger als  $\pm 0,5$  m/s, wobei im Januar der GME-Mittelwert geringfügig über dem des EPS liegt, im Februar jedoch kein wesentlicher Unterschied besteht.

In der Varianz gibt es dagegen deutlichere Abweichungen, die sich im Gegensatz zum Mittelwert hinsichtlich ihres Vorzeichens für die beiden betrachteten Monate nicht unterscheiden: Im Januar liegt das EPS 1,43 m/s über dem GME, im Februar 0,25 m/s. Dies hängt sicherlich mit dem unterschiedlichen Einsatz der beiden Modellsysteme zusammen: Beim EPS wird mit Hilfe von Variationen der Ausgangsanalysen und der Modellphysik (s.u.) bewirkt, dass sich die Einzelvorhersagen deutlich auseinander entwickeln, womit unterschiedliche Entwicklungsmöglichkeiten des jeweiligen Ausgangszustandes aufgezeigt und Aussagen über die Unsicherheit der Vorhersagen abgeleitet werden sollen. Beim GME wird hingegen jeweils nur eine Vorhersage berechnet, die der Realität möglichst nahe kommen soll.

---

<sup>4</sup>Für die Berechnung des Perzentils wurde die Häufigkeitsverteilung in 101 Klassen eingeteilt, welche einen Effektivwindbereich von -50 m/s bis +50 m/s linear abdecken. Dabei repräsentiert eine Klasse jeweils den Bereich, der sich durch normales Runden des tatsächlichen Wertes ergibt (z.B. Klasse Nr. 3: 2,50 m/s ... 3,49 m/s).



Tabelle 2.1: Ausgewählte statistische Parameter des über die Deutsche Bucht gemittelten Horizontalwindes von IFS- und GME-Simulationen für die Monate Januar und Februar 2003

| Modell |          | Zeitraum                                                         | Mittelwert<br>[m/s] |       |       | Varianz<br>[m/s] |         | 90%-Perzentil<br>[Klassen–Nr.] |
|--------|----------|------------------------------------------------------------------|---------------------|-------|-------|------------------|---------|--------------------------------|
|        |          | 01/2003                                                          | 7,50                |       |       | 11,80            |         | 12                             |
|        |          | 02/2003                                                          | 5,77                |       |       | 7,44             |         | 9                              |
|        |          | 01/2003                                                          | 7,46                |       |       | 11,96            |         | 12                             |
|        |          | 02/2003                                                          | 5,36                |       |       | 5,81             |         | 9                              |
|        |          | 01/2003                                                          | 7,64                |       |       | 10,53            |         | 12                             |
|        |          | 02/2003                                                          | 5,35                |       |       | 5,56             |         | 9                              |
| Modell | Zeitraum | Mittelwert [m/s] (aufgeschlüsselt nach $t_{sim}$ [h])            |                     |       |       |                  |         |                                |
|        |          | 1-24                                                             | 25-48               | 49-72 | 73-96 | 97-120           | 121-144 | 145-168                        |
|        | 01/2003  | 7,08                                                             | 7,13                | 7,20  | 7,44  | 7,77             | 7,92    | 7,66                           |
|        | 02/2003  | 5,08                                                             | 4,99                | 5.02  | 5,13  | 5,34             | 5,67    | 6,07                           |
|        | 01/2003  | 7,35                                                             | 7,12                | 7.43  | 8,01  | 7,76             | 7,79    | 8,00                           |
|        | 02/2003  | 5,53                                                             | 5,16                | 5.03  | 4,91  | 5,11             | 5,44    | 5,94                           |
|        |          |                                                                  |                     |       |       |                  |         |                                |
| Modell | Zeitraum | Varianz [m/s] (aufgeschlüsselt nach $t_{sim}$ [h])               |                     |       |       |                  |         |                                |
|        |          | 1-24                                                             | 25-48               | 49-72 | 73-96 | 97-120           | 121-144 | 145-168                        |
|        | 01/2003  | 11,39                                                            | 11,54               | 11,47 | 12,30 | 12,57            | 12,39   | 11,49                          |
|        | 02/2003  | 4,19                                                             | 4,69                | 5,18  | 5,19  | 5,83             | 6,32    | 7,48                           |
|        | 01/2003  | 10,92                                                            | 10,67               | 11,07 | 8,59  | 11,26            | 8,75    | 12,18                          |
|        | 02/2003  | 3,82                                                             | 4,69                | 6,54  | 5,87  | 4,64             | 6,04    | 6,35                           |
|        |          |                                                                  |                     |       |       |                  |         |                                |
| Modell | Zeitraum | 90%-Perzentil [Klassen–Nr.] (aufgeschlüsselt nach $t_{sim}$ [h]) |                     |       |       |                  |         |                                |
|        |          | 1-24                                                             | 25-48               | 49-72 | 73-96 | 97-120           | 121-144 | 145-168                        |
|        | 01/2003  | 11                                                               | 12                  | 12    | 12    | 13               | 13      | 12                             |
|        | 02/2003  | 8                                                                | 8                   | 8     | 8     | 8                | 9       | 10                             |
|        | 01/2003  | 12                                                               | 11                  | 12    | 12    | 12               | 12      | 13                             |
|        | 02/2003  | 8                                                                | 8                   | 8     | 8     | 8                | 9       | 9                              |

## 2.2.2 Der erfolgsversprechendste Weg zu extremen Modellsturmfluten

Eine Untersuchung von extremen Sturmfluten im deutschen Küstenbereich ist wegen der beschränkten Zahl tatsächlich aufgetretener Fälle problematisch. Benötigt wird ein Szenario denkbarer und physikalisch konsistenter Wetterlagen mit hohen Windgeschwindigkeiten aus nordwestlichen Richtungen. Prinzipiell ermöglichen hier Vorhersagemodelle eine Erweiterung dieser Basis, denn sie erlauben es, für jeden beobachteten Termin eine ganze Reihe physikalisch möglicher Wetterlagen zu erzeugen.

Dies kommt zum einen dadurch zustande, dass für jedes Zieldatum mehrere Vorhersagen mit unterschiedlichen Startterminen und Vorhersagelängen gerechnet werden können. Zum anderen lassen sich auch direkt durch kleine Veränderungen an den Anfangsdaten eines Vorhersagemodells, welche die möglichen Variationen des Startzustandes innerhalb der Analysengenauigkeit widerspiegeln, weitere physikalisch sinnvolle Wetterlagen für einen bestimmten Zielzeitpunkt produzieren.

Beide Vorgehensweisen werden bereits routinemäßig abgedeckt. Zum einen werden alle operationell eingesetzten globalen Modelle mehrmals täglich über einen längeren

Zeitraum integriert, so dass für jeden bestimmten Zeitpunkt überlappend mehrere Vorhersagen vorliegen. Außerdem werden an einigen Zentren Ensemble-Systeme benutzt, bei denen ausgehend von jedem Starttermin eine größere Anzahl unterschiedlicher Einzelvorhersagen gerechnet wird.

Für das Projekt MUSE war die Verwendung der Vorhersagen des DWD-Globalmodells GME und des Ensemble-Vorhersagesystems (EPS) des EZMW vorgesehen. Das GME wird zweimal täglich (ausgehend von 00 und 12 UTC) über sieben Tage integriert, so dass für jeden Zeitpunkt 14 Vorhersagen verfügbar sind.

Das EPS wird ebenfalls zweimal täglich über insgesamt zehn Tage integriert. Dabei werden zusätzlich zu der als „Control“ bezeichneten Vorhersage, die von der ungestörten Analyse ausgeht, noch 50 weitere Vorhersagen berechnet. Sie berücksichtigen einerseits Unsicherheiten in der Anfangslage durch ein System von aufgeprägten Störungen (auf der Basis der so genannten „Singular Vectors“), andererseits auch Unsicherheiten der Modellierung über einen groben Ansatz einer stochastisch variierten Modellphysik. Insgesamt sind hier für jeden Zeitpunkt ca. 1000 Vorhersagen verfügbar.

Damit erweist sich von den beiden Vorgehensweisen in Abbildung 2.1 auf Seite 10 die rechte als die deutlich mehr Erfolg versprechende bei der Suche nach extremen Sturmflutlagen. Das EPS-System produziert nicht nur insgesamt wesentlich mehr Fälle, sondern diese sind auch noch so angelegt, dass sie möglichst alternative Entwicklungsmöglichkeiten aufzeigen. Hinzu kommt noch, dass die GME-Vorhersagen nur für ein Jahr archiviert werden, so dass man ältere, eventuell interessante Fälle nicht mehr auffinden kann, ohne die Simulationen mit einem immensen Aufwand zu wiederholen. Aus diesem Grunde wurde letztlich der linke Weg in Abbildung 2.1 im Vorhaben nur für einige Voruntersuchungen benutzt, insbesondere für eine schon vor dem Projekt begonnene, derzeit noch nicht veröffentlichte Arbeit zur Simulation der Sturmflut von 1962 [Müller-Navarra et al. (voraussichtlich 2005)]. Die im vorliegenden Bericht dokumentierten Ergebnisse beziehen sich alle auf Experimente unter Verwendung des EPS-Systems.

Leider trat hier aber eine nicht erwartete Schwierigkeit auf. Wegen des enormen Datenumfangs werden die EPS-Vorhersagen nur auszugsweise archiviert. Dabei ist zwar der 10m-Wind verfügbar, so dass man für Sturmfluten interessante Fälle identifizieren kann. Die gespeicherten Parameter reichen aber nicht für die Anfangs- und Randwertversorgung des LM aus. Es war daher geplant, die ausgewählten Einzelvorhersagen des EPS neu zu berechnen und vollständig zu archivieren.

Diese Vorgehensweise scheiterte jedoch daran, dass sich Simulationen einzelner Ensemble-Member aus dem operationellen Routine-Zyklus nicht hundertprozentig reproduzieren lassen. Dieses Verhalten wurde in mehreren Experimenten für unterschiedliche Simulationszeiträume untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass eine Wiederholung der Simulationen zwar möglich ist, dass die Ergebnisse von Routine und Experiment jedoch entscheidend divergieren. Diese Unterschiede äußern sich letztendlich darin, dass die Extrema des Horizontalwindes in der Deutschen Bucht deutlich anders ausfallen können, wie z.B. in dem in Abbildung 2.6 dokumentierten Fall.



Dieses Verhalten wurde auch von Seiten der Wissenschaftler am EZMW bestätigt. Die Ursachen liegen nach Auskunft der dortigen Experten in den seit dem damaligen Routinelauf vorgenommenen Veränderungen am Modellcode in Kombination mit mehreren Rechner- und Compilerwechseln. Aber auch ohne diese Code-Änderungen wäre die damals aktuelle Modellversion nicht ohne Auswirkungen auf die Modellergebnisse auf den heute aktuellen Rechner übertragbar. Der letzte Rechnerwechsel am EZMW fand am 4. März 2003 statt, als die operationelle Vorhersage von einem Fujitsu VPP5000– auf ein IBM Cluster 1600–System migriert wurde.<sup>5</sup>

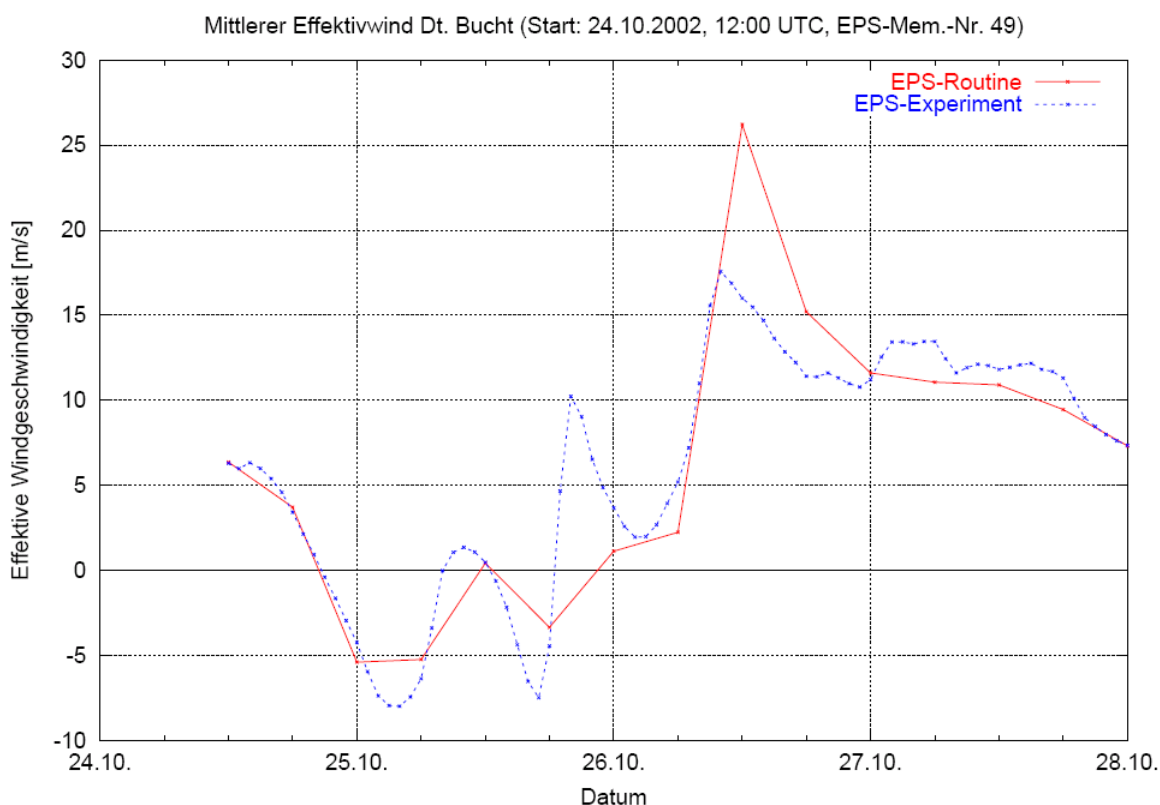


Abbildung 2.6: Vergleich von EPS-Routine und EPS-Experiment, Zeitraum  
24.10.2002, 12:00 UTC + 84 Stunden

Sucht man - wie ursprünglich beabsichtigt - aus dem EPS-Archiv die Fälle mit den stärksten Effektivwinden heraus, so führt die Nicht-Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nahe liegender Weise praktisch durchweg dazu, dass die neu berechneten Vorhersagen schwächere Winde aufweisen und damit für das Vorhaben uninteressant sind. Es wurde daher eine geänderte Vorgehensweise beschlossen: Für Zeiträume mit beobachteten Sturmfluten wurden Serien von Ensemble-Vorhersagen mit unterschiedlichen Startzeitpunkten durchgeführt in der (berechtigten) Hoffnung, darin einzelne Member zu finden, die zu noch extremeren Sturmfluten, als die beobachteten geführt hätten. Diese Einzelvorhersagen wurden dann erneut berechnet und vollständig archiviert.

<sup>5</sup>An dieser Stelle sei eine in diesem Zusammenhang scherzhaft geäußerte Bemerkung eines Kollegen vom EZMW sinngemäß wiedergegeben, da sie die Problematik sehr anschaulich verdeutlicht: 'Wir könnten die 50 EPS-Member auch dadurch erzeugen, dass wir mit 50 verschiedenen, mit unterschiedlichen Compilereinstellungen übersetzten Executables unseres IFS-Modellcodes rechnen...'

## 2.3 Experimente

Den Ausführungen in Kapitel 2.2.2 entsprechend wurde im Rahmen von MUSE auf DWD-Seite nach der folgenden Vorgehensweise verfahren:

1. Zeitraum und Intervall für EPS-Starttermine festlegen
2. EPS-Experimente durchführen
3. Identifizierung der EPS-Member mit den stärksten Effektivwinden über der Deutschen Bucht
4. Neuberechnung dieser Member mit vollständiger Archivierung der Ergebnisse
5. Nutzung dieser Simulationen für die Randsteuerung der Anschlussmodelle (LM und/oder BSHcmod/BSHsmod)

Die Auswahl der Zeiträume erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem BSH. Die Basis bildete dabei eine Liste mit den höchsten Pegelständen der letzten 50 Jahre für verschiedene Beobachtungsorte an der deutschen Nordseeküste, die mit Hilfe des BSH-Archivs zusammengestellt wurde. Daraus wiederum wurden die extremsten Sturmfluten herausgesucht, wobei das Kriterium der Absolutwert des Wasserstandes sowie die Dauer des erhöhten Pegelstandes waren. Diese Liste wurde dann zuerst unter den am Projekt beteiligten Wissenschaftlern und später auch mit der begleitenden KFKI-Projektgruppe diskutiert und optimiert. Die ausgewählten Sturmfluten sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

Tabelle 2.2: Ausgewählte Sturmfluten mit Pegelstandsmaxima für Cuxhaven

| Zeitpunkt [MEZ]   | Pegelstand [mNN] |
|-------------------|------------------|
| 16.02.1962, 22:40 | 4,95             |
| 23.02.1967, 23:20 | 3,99             |
| 03.01.1976, 14:20 | 5,10             |
| 27.02.1990, 01:42 | 4,44             |
| 28.01.1994, 13:08 | 4,51             |
| 03.12.1999, 20:18 | 4,53             |

Somit waren 6 Experimente mit dem EPS notwendig. Jedes dieser EPS-Experimente besteht dabei aus mehreren EPS-Simulationen, wobei wiederum jede EPS-Simulation aus 50 einzelnen IFS-Simulationen, dem eigentlichen Ensemble besteht. Die Kontrollvorhersage wurde im Rahmen von MUSE zunächst nicht weiter betrachtet. Alle IFS-Simulationen eines EPS-Experiments zusammen bilden dann ein Super-Ensemble. Die EPS-Simulationen eines EPS-Experiments unterscheiden sich also primär durch ihren Starttermin, wohingegen die 50 IFS-Simulationen alle den gleichen Starttermin haben. Dies wird durch Abbildung 2.7 anhand des EPS-Experiments zur 76'er Sturmflut veranschaulicht. Jeder diagonale Pfeil in der Grafik stellt darin eine EPS-Simulation mit 50 Ensemble-Membern dar.

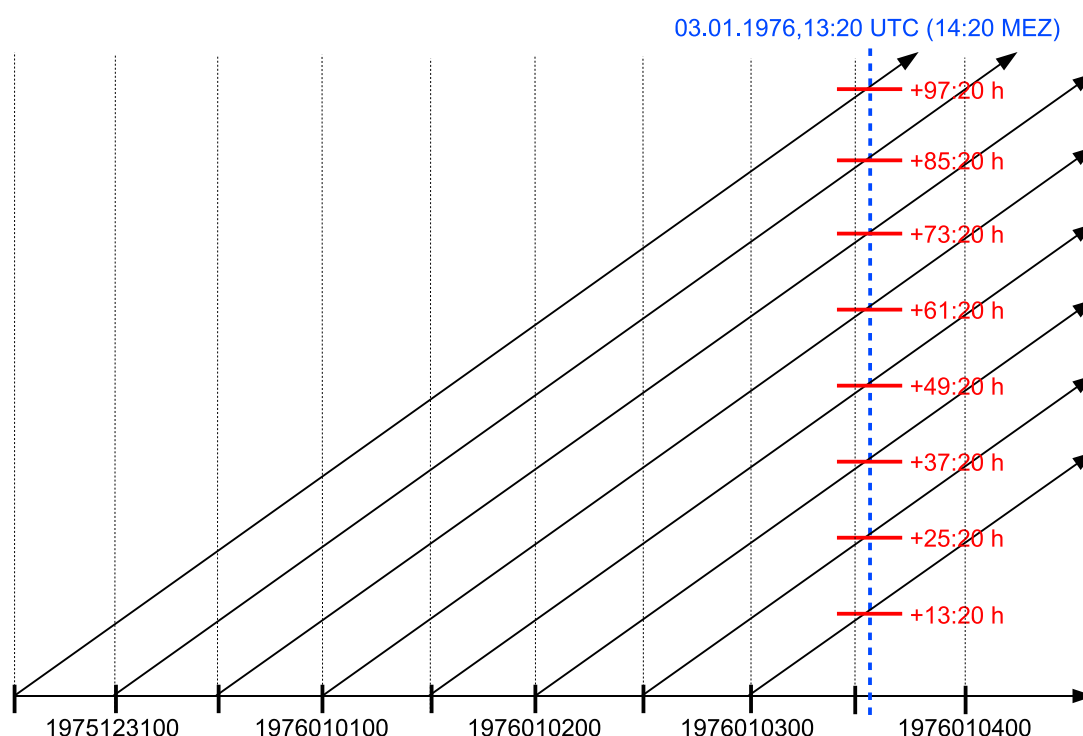


Abbildung 2.7: Prinzip eines EPS-Experiments anhand der Sturmflut vom 3. Januar 1976; die Beschriftung der horizontalen Zeitachse am unteren Bildrand ist im Format "YYYYMMDDHH", wobei YYYY = Jahr (4-stellig), MM = Monat (2-stellig), DD = Tag (2-stellig), HH = Stunde (2-stellig), wobei als Referenzzeit UTC gewählt wurde

Die Auswahl der Zeiträume ist bestimmt durch die Startzeitpunkte sowie die Länge der Simulationen. Beides wurde für die MUSE-Experimente so gewählt, dass der mit Simulationen abgedeckte Zeitbereich sich von ca. 96 Stunden vor dem Pegelstandsmaximum bis mindestens 12 Stunden danach erstreckt. Dadurch ist in jedem Fall gewährleistet, dass der Zeitbereich, für den die Unterschiede zwischen den gestörten und der ungestörten Vorhersage systembedingt maximal sind, erreicht wird.<sup>6</sup> Für die 6 durchzuführenden EPS-Experimente ergibt sich dementsprechend die in Tabelle 2.3 dargestellte Grundkonfiguration.

Tabelle 2.3: Zeitfenster und Intervall geeigneter MUSE-Extremwetterlagen zur Bearbeitung mit dem EPS

| Experiment-Reihenfolge | Startzeitpunkte |            | Intervall | Member-Anzahl |
|------------------------|-----------------|------------|-----------|---------------|
|                        | von             | bis        |           |               |
| 1                      | 1962021112      | 1962021512 | 12h       | 9 x 50        |
| 2                      | 1975123012      | 1976010300 | 12h       | 8 x 50        |
| 3                      | 1999112900      | 1999120318 | 6h        | 20 x 50       |
| 4                      | 1967022000      | 1967022318 | 6h        | 16 x 50       |
| 5                      | 1994012418      | 1994012812 | 6h        | 16 x 50       |
| 6                      | 1990022300      | 1990022800 | 6h        | 21 x 50       |

<sup>6</sup>Im EPS wird der Anfangszustand für die 50 Ensemble-Member erzeugt, indem man dem ungestörten Anfangszustand kleine Störungen überlagert, welche durch sog. „Singular Vectors“ beschrieben werden. Sie sind so optimiert, dass das Ensemble erst nach 48h seine volle Variabilität entfaltet.

Für die Experimente Nr. 1 und 2 wurde ein Startintervall von 12 Stunden gewählt. Für die restlichen Experimente wurde das Startintervall auf 6 Stunden halbiert. Dadurch verdoppelt sich die Anzahl der durchgeführten Simulationen. Somit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass im Super-Ensemble eine Simulation mit extremen Windverhältnissen über der Deutschen Bucht enthalten ist. Allerdings steigt dadurch auch der Bedarf an Rechnerressourcen. So hatte z.B. das EPS-Experiment zur 99'er Sturmflut mit seinen 1000 Mitgliedern eine Gesamtverweildauer von ca. 7 Tagen auf dem Hochleistungs-Clusterrechner des EZMW!

Die Startzeitpunkte selber können nicht beliebig gewählt werden, da die Modellstartzustände unmittelbar auf Modellanalysen basieren. So liegen die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens benutzten EZMW-Analysen lediglich alle 6h vor (vergleiche mit den Ausführungen am Ende von Kapitel 1.4.2). Diese Zeiten stellen also gleichzeitig die vier möglichen Startzeiten pro Tag für EPS-Simulationen im Rahmen von MUSE dar.

Im Folgenden wird der praktische Einsatz der MUSE-Modellkette aus Abbildung 2.1 auf Seite 10 am Beispiel der 62'er Sturmflut beschrieben. Im anschließenden Kapitel werden dann die Ergebnisse aller 6 bearbeiteten Sturmfluten dargestellt, mit denen analog zur 62'er Sturmflut verfahren wurde.

### **2.3.1 Sturmflut vom 16./17. Februar 1962**

Am 16./17. Februar 1962 brach über die deutsche Nordseeküste die schwerste Sturmflut seit über 100 Jahren herein. Orkanböen bis 200 Kilometer pro Stunde und meterhohe Wassermassen ließen die Deiche an der Küste, an der Elbe und Weser brechen. Am schlimmsten jedoch traf die Flutkatastrophe das 100 Kilometer von der Küste entfernte Hamburg. Ganze Stadtteile standen unter Wasser, über 300 Menschen kamen ums Leben. Über 60.000 Bewohner südlich der Elbe wurden obdachlos. Strom, Gas und Wasser fielen in der Zwei-Millionen-Stadt aus. Ursache war das Orkantief „Vincinette“, das über Skandinavien hinweg zur Ostsee gezogen war und das Wasser der Nordsee in der Deutschen Bucht aufgestaut hatte [NDR (2004)]. Die 62'er Sturmflut fällt unter die Kategorie „Skandinavien-Typ“. Bei dieser Art von Sturmfluten werden die besonders hohen Wasserstände durch die lange Dauer stauintensiver Winde aus nordwestlicher Richtung erreicht [vgl. Petersen und Rhode (1991)].

Um einen besseren Überblick über die Entwicklung der Wetterlage zu bekommen, wurden die für jeweils 00:00, 06:00, 12:00 und 18:00 UTC vorliegenden EZMW-Reanalysen vom 15. bis 17. Februar visualisiert. D.h., es wurden für die aus dem ERA-40-Projekt (vgl. Kapitel 1.4.2) stammenden Felder des Horizontalwindes in 10m über Grund und des auf NN reduzierten Luftdruck Grafiken erstellt, die einen synoptischen Überblick über die Wetterlage vermitteln. Die Ergebnisse befinden sich im Dokumentanhang auf den Seiten 53 und 54. Stellvertretend für alle 12 Bilder sind an dieser Stelle zwei Modellanalysen sowie die zeitlich zugehörigen Bodenwetterkarten aufgeführt (siehe Abbildung 2.8).

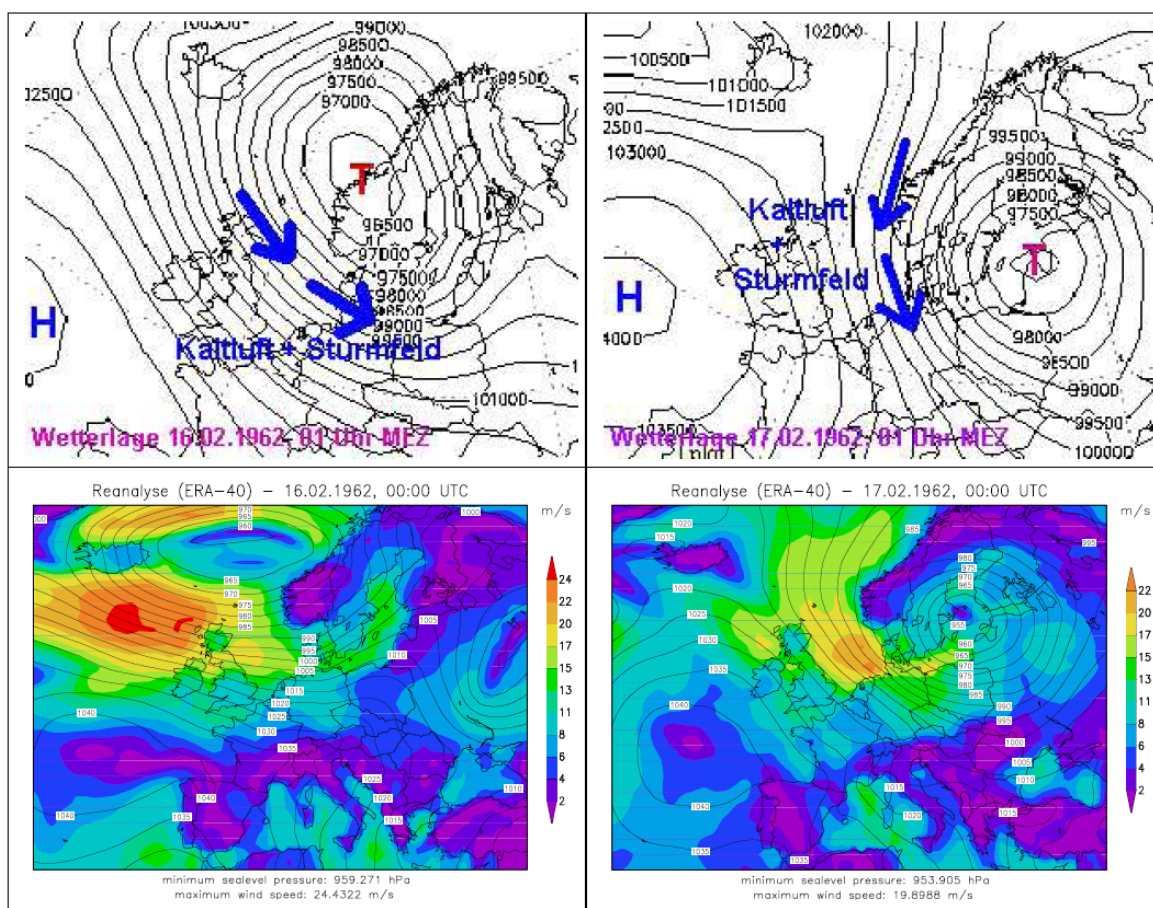


Abbildung 2.8: Bodenwetterkarten + Reanalysen für den 16. und 17. Februar 1962, jeweils 00:00 UTC; bei den Reanalysen wurde zusätzlich zu den Isobaren das 10m-Windfeld geplottet

Wie kam es zu dieser verheerenden Sturmflut? Bereits Tage zuvor zogen mehrere Sturmtiefs vom Seegebiet südlich Islands zur nördlichen Nordsee und weiter nach Skandinavien. Die eigentliche Geburt des für die Küsten der Deutschen Bucht und für Hamburg und Nordwestdeutschland so folgenreichen Orkantiefs begann etwa am 14. Februar 1962. Grönlandkaltluft spaltete von einem Tief nahe Island ein kleines Teiltief ab, das sich danach verstärkte und als Schnellläufer mit einem breiten Niederschlagsband aus gewittrigen Regenschauern, Schneeregen und Graupel südostwärts zog. Am Morgen des 16. erreichte es mit einem Kerndruck von nur 950 hPa Südsandinavien. In der nachfolgenden Nordmeerkaltluft steigerte sich über der Nordsee der Nordwest-Sturm allmählich zum Orkan [vgl. Defant et al. (1972)].

Die Bordwetterwarte des Fischereischutzbootes „Meerkatze“ meldete inmitten der Nordsee gegen 13 Uhr Windstärke 11, um 19 Uhr dann bereits Orkan-Windstärke 12. Das norwegische Wetterschiff „Eger“ geriet in Seenot. Hinter der deutschen Küstenlinie und in Hamburg traten in der Nacht mehrmals Orkanböen auf. Die mittleren Windgeschwindigkeiten lagen jedoch deutlich niedriger; das eigentliche Hauptsturmfeld zog glücklicherweise weiter nördlich vorbei (vgl. Abbildung 2.8). Trotzdem behinderten die anhaltenden, massiven Nordwestwinde des Orkans ab Nachmittag des 16. das Zurückströmen des Elbewassers in die Deutsche Bucht in fataler Weise. Dadurch erreichte das nächste Hochwasser in der Nacht dann auch diese katastrophale Höhe, was zu der Elbe-Flutwelle mit den verheerenden Auswirkungen für Hamburg führte.

Die Wetterlage vom 16./17. Februar 1962 wurde bereits im Vorfeld von MUSE mit Hilfe numerischer Modelle untersucht. Dazu wurden am EZMW auf Anfrage des DWD Reanalysen für den Zeitbereich vom 9. Februar 1962, 18:00 UTC bis 20. Februar 1962, 12:00 UTC im 6 Stundenabstand erstellt.<sup>7</sup> Diese 44 Reanalysen wurden dann zur Bereitstellung von Anfangsdaten für das GME des DWD genutzt. Die auf diese Weise zustande gekommenen GME-Simulationen wurden wiederum zur Randsteuerung des LM genutzt. Die resultierenden Modelloutputs wurden dann zum BSH transferiert und dort als Antriebsdaten für die Pegelstandsmodelle genutzt.

Für das Projekt MUSE sind diese Hindcasts zwar sehr interessant, jedoch von geringerem Nutzen - schließlich sollten primär mit Hilfe von probabilistischen Ensemble-Vorhersagen Möglichkeiten für alternative, evtl. noch verheerendere Entwicklungen der damaligen Wettersituation abgeschätzt werden.

Das eigentliche EPS-Experiment für die 62'er Sturmflut besteht gemäß Tabelle 2.3 aus 9 EPS-Läufen zu je 50 Member. Die Vorhersagezeit für alle Member des Experiments betrug konstant 240 Stunden. Die ersten 50 Member haben zum Zeitpunkt des realen Pegelstandsmaximums eine Vorhersagelänge von 129 h 40 min, die letzten 50 Member dagegen nur noch 33 h 40 min. Insgesamt resultieren aus diesem Experiment  $9 \times 50 = 450$  IFS-Simulationen. Um eine Übersicht über alle Läufe zu bekommen und vor allem um abschätzen zu können, welche Member des Super-Ensembles für das Projekt interessant sind, kam das in Kapitel 2.2 beschriebene Verfahren zur Berechnung des Effektivwinds zum Einsatz. Auf die 450 EPS-Member der 62'er Sturmflut angewendet ergibt sich das im oberen Teil von Abbildung 2.9 dargestellte Bild.

---

<sup>7</sup>Diese aufwändige Sonderbehandlung war damals noch notwendig, da zu diesem Zeitpunkt die Reanalysen aus dem ERA-40-Projekt für diese Termine noch nicht verfügbar waren.



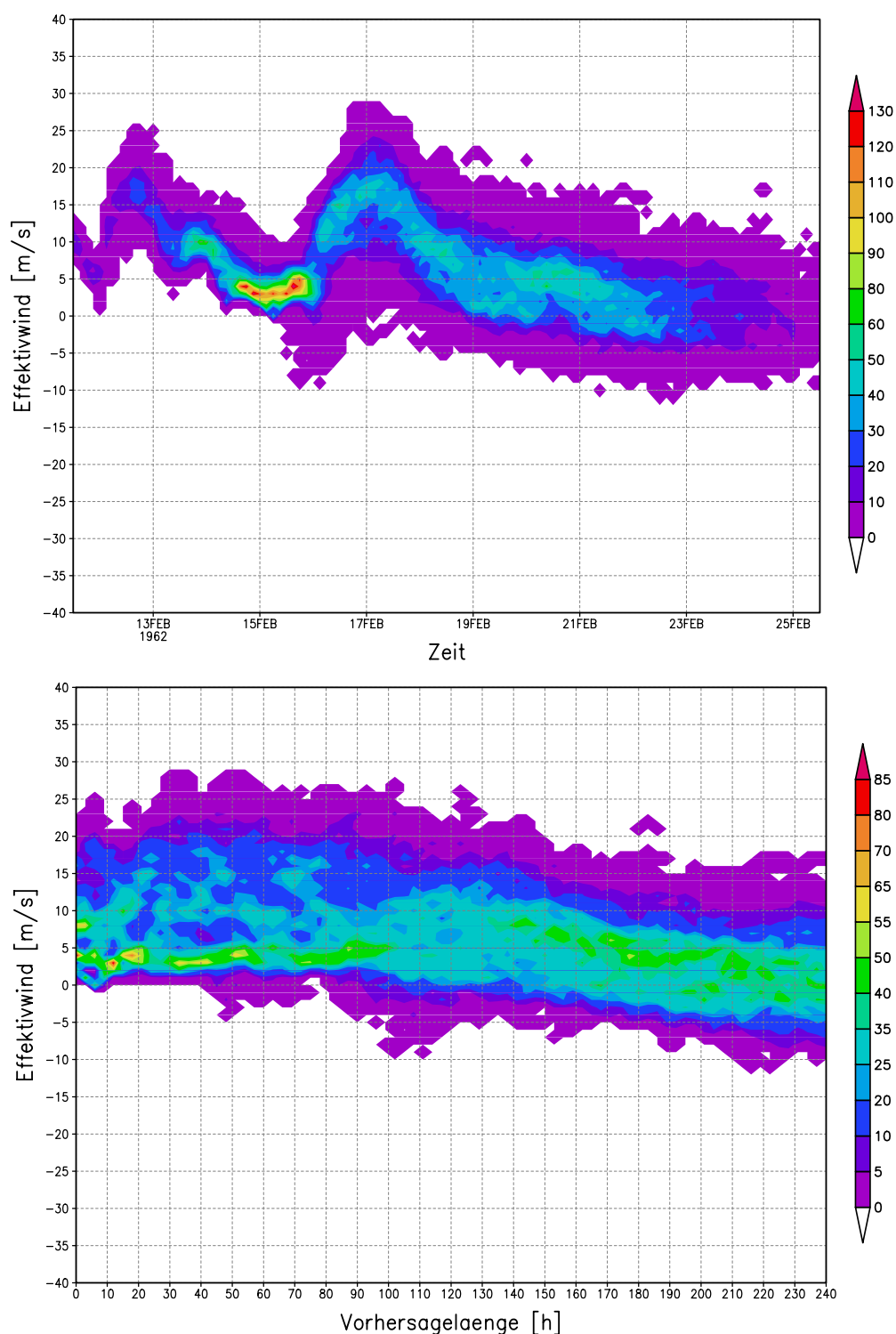


Abbildung 2.9: Häufigkeitsverteilungen des Effektivwindes für die 62'er Sturmflut als Funktion der Zeit (oben) und der Vorhersagelänge (unten)

Daraus wird ersichtlich, dass zu Zeiten, an denen real hohe Pegelstände auftraten, der Anteil der EPS-Modellsimulationen mit hohem Effektivwind deutlich höher ist als sonst. Typischerweise hat der Effektivwind des vollständigen Super-Ensembles eine Streubreite von ca. 20-25 m/s, wenn man von einzelnen Ausreißern absieht. Betrachtet man nur den Bereich des Effektivwinds, innerhalb dessen mindestens 2 Member pro Klasse verzeichnet werden, beträgt die Streubreite typischerweise sogar nur ca. 10m/s.

Anhand dieser Darstellung wird außerdem deutlich, dass die Häufigkeiten von Beginn des Experiments an kontinuierlich zunehmen. Die Ursache dafür liegt darin, dass alle 12 Stunden 50 Member zum Super-Ensemble dazukommen, bis dann ab 15.02., 12:00 UTC das Super-Ensemble vollständig ist. Ab 11.02., 12:00 UTC + 240 h = 21.02., 12:00 UTC wird das Super-Ensemble dann wieder alle 12 Stunden um 50 Member reduziert, was sich im Bild zum Ende hin durch geringere Häufigkeiten über den gesamten Streubereich widerspiegelt.

Eine andere interessante und aufschlussreiche Darstellungsart der EPS-Ergebnisse ist im unteren Teil von Abbildung 2.9 zu sehen. Hier wurden wiederum die Häufigkeiten des Effektivwinds dargestellt, aber nicht als Funktion der Zeit wie im oberen Teil, sondern als Funktion der Vorhersagelänge. Die x-Achse reicht also von 0 h (Beginn der Vorhersagen) bis 240 h (Ende der Vorhersagen). In Kombination mit der oberen Darstellung ist diese Grafik insofern aufschlussreich, als dass man an ihr erkennen kann, dass es nahezu gleichgültig ist, wie lange vor der realen Sturmflut ein Ensemble-Lauf startet - er wird in den allermeisten Fällen für den Zeitbereich des tatsächlichen Pegelstandsmaximums die höchsten Effektivwinde produzieren. Dies kommt in der Grafik dadurch zum Ausdruck, dass die höchsten Werte der Verteilung im Vorhersagelängenbereich von 34 bis 130 h auftreten. Für kürzere und längere Vorhersagen wurden tendenziell weniger hohe Effektivwinde produziert, weil in diesen Fällen nicht der Zeitbereich der realen Sturmflut abgedeckt wird. Durch die Grenzen der Vorhersagbarkeit sind diesem Verhalten jedoch natürliche Grenzen gesetzt.

Nach der Durchführung des Ensemble-Experiments sind als nächstes die extremsten Member aus dem Super-Ensemble herauszusuchen. Ein bestimmtes Member ist dabei durch seinen Startzeitpunkt sowie seine Nummer innerhalb des Ensembles eindeutig definiert. Für die 62'er Sturmflut wurden die in Abbildung 2.10 dargestellten 5 Member für weitere Untersuchungen ausgesucht. Sie heben sich von den restlichen Membern des Super-Ensembles dadurch ab, dass sie ein höheres Effektivwind-Maximum aufweisen und/oder dass die hohen Effektivwindwerte über einen längeren Zeitraum anhalten.

Startzeitpunkt von Member Nr. 8, 30 und 37 ist dabei der 15.02.1962, 00:00 UTC, Member Nr. 26 und 50 wurden 12 Stunden später, also am 15.02.1962, 12:00 UTC gestartet. Die schwarze Kurve wurde aus den Reanalysen abgeleitet, sie dient also dem Vergleich mit der Realität. Es wird ersichtlich, dass das Effektivwind-Maximum der Reanalyse ca. 20 m/s beträgt, wohingegen die Ensemble-Member Maxima von ca. 29 m/s aufzuweisen haben. Auch gestaltet sich die zeitliche Entwicklung bei den Extrem-Membern anders, als in der Reanalyse. Das Maximum des Effektivwinds weist außer bei Member Nr. 50 immer eine zeitlich Verschiebung zur Reanalyse auf.

Es bleibt festzuhalten, dass mit der Ensemble-Technik für den Wind in der Deutschen Bucht im Falle der 62'er Sturmflut ein um ca. 9 m/s höherer Wert ermittelt werden konnte. Dass sich diese Tatsache auch in extremeren Pegelständen widerspiegelt, wird in den Ausführungen des BSH noch detailliert gezeigt. Um nicht zu weit vorzugreifen, sei an dieser Stelle nur folgendes vermerkt: Bei Randsteuerung des 3-dimensionalen Staumodells des BSH „BSHcmod“ mit Daten von Member Nr. 26 wurde für Cuxhaven ein Pegelstand von 5,17 mNN berechnet, wohingegen real 4,96 mNN beobachtet wurden.

Die BSH-Modelle benötigen zur Versorgung mit Randdaten relativ wenig an Dateninput von den Atmosphärenmodellen. So sind zum Betreiben des 3-dimensionalen Zirkulationsmodells lediglich 6 Ein-Flächenfelder erforderlich: Bodenluftdruck, Wolkenbedeckungsgrad, zonale und meridionale Komponente des 10 m-Winds sowie Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit in der bodennächsten Modellschicht. Das LM



hingegen ist in dieser Hinsicht um einiges anspruchsvoller: Hier werden die (überwiegend dreidimensionalen) Felder der prognostischen Variablen des Globalmodells benötigt. Außerdem sind zur LM-Randsteuerung noch weitere 13 Ein-Flächenfelder notwendig, die an dieser Stelle jedoch nicht einzeln aufgeführt werden sollen. Wichtig ist, dass bei der Einbettung des Regionalmodells LM in das globale Modell IFS umfangreiche Datensätze bereitgestellt werden müssen.

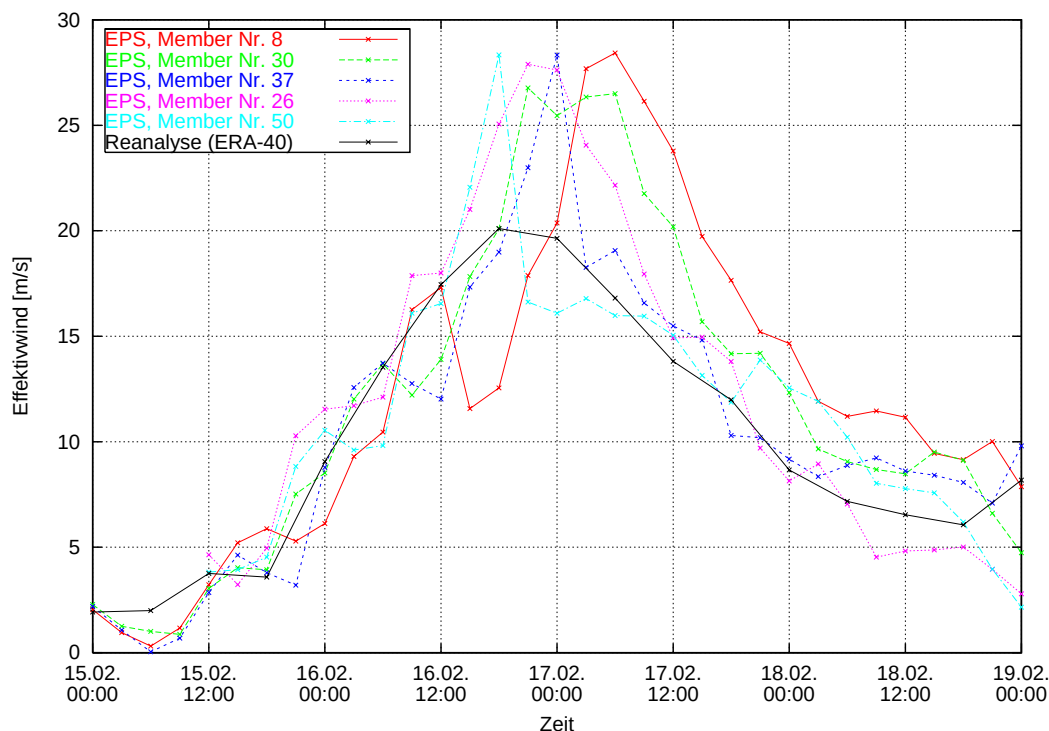


Abbildung 2.10: Effektivwind ausgewählter Member aus dem 62'er Super-Ensemble

Zum Zeitpunkt der Durchführung der MUSE-Experimente war es nicht möglich, den für einen nachgeschalteten LM-Lauf erforderlichen IFS-Modelloutput von vornherein für alle Member eines Super-Ensembles zu archivieren. Die anfallenden Datenmengen unterbinden dies - deshalb werden in der EZMW-Routine vom EPS-Output nur ausgewählte essentielle Modellparameter auf ausgewählten Höhenniveaus ins Archiv eingebracht. Demzufolge wurde vom Super-Ensemble zunächst im Prinzip nur der Horizontalwind in 10 m über Grund abgespeichert, was für die Berechnung des Effektivwinds und somit für die Auswahl der extremsten Member genügte. Um dann die selektierten Extrem-Member auch wirklich für nachgeschaltete Lokal- und Staumodellsimulationen nutzbar zu machen, müssen als Folge des vorher stark reduzierten Modelloutputs zunächst die Member durch separate IFS-Läufe reproduziert werden. Dies ist im Gegensatz zu länger zurückliegenden Modellsimulationen (wie z.B. in Abbildung 2.6) auch relativ unproblematisch und wird dadurch realisiert, dass man das IFS mit den gleichen Anfangsbedingungen und der gleichen „stochastischen“ Physik versorgt, wie das zu reproduzierenden EPS-Member. Diese Vorgehensweise ist also nicht der direkte Weg, aber sie ist der direkteste praktisch umsetzbare Weg!

Jedes ausgewählte Extrem-Member wurde also im Anschluss an das Super-Ensemble mit Hilfe eines separaten IFS-Laufes unter Abspeicherung des kompletten Modelloutputs reproduziert. Die für einen LM-Lauf mit IFS-Randsteuerung notwendigen Daten wurden dann im Anschluss wieder aus dem Archiv extrahiert und von Reading nach Offenbach transferiert. Pro Member und pro Stunde Simulationszeit des IFS war dabei eine Datenmenge von ca. 5 MB zu bewegen, wobei der größte Zeitanteil für diese Aufgabe

nicht auf den Transfer per Internet, sondern auf das Entarchivieren aus der EZMW-Datenbank entfiel. In Offenbach wurden die über mehrere Dateien verteilten Daten zusammengefasst, sodass pro Stunde Simulationszeit eine Datei existiert. Gleichzeitig wurden die Daten auf die speziellen Gegebenheiten im DWD-GRIB-Format angepasst.

Um die Daten vom IFS praktisch als Anfangs- und Randdaten im LM nutzen zu können, muss außerdem eine Interpolation der Modellfelder vom IFS- auf das LM-Modellgitter stattfinden. Gleichzeitig wurden die aus der Interpolation resultierenden GRIB-Dateien den DWD-Konventionen entsprechend benannt. Dafür wurde das beim DWD in Kooperation mit dem italienischen Regionalwetterdienst „ARPA-SMR“ entwickelte Programmpaket „IFS2LM“ [Schättler und Doms (1999)] eingesetzt. Im letzten Schritt wurden die so produzierten Daten in die DWD-Datenbank eingebracht, wo sie dann über eine definierte Ein-/Ausgabe-Schnittstelle dem LM zur Verfügung standen.

Primärer Sinn und Zweck dieser nachgeschalteten LM-Simulationen war es, die mit dem EPS erzeugten Extremwetterlagen realistischer abzubilden. Das ist nicht so zu verstehen, dass die mit dem EPS produzierten Wettersituationen unrealistisch oder gar physikalisch inkonsistent wären. Vielmehr ist es einfach so, dass das EPS letztendlich ein globales Modell mit einer relativ groben räumlichen Auflösung darstellt. Das LM dagegen ist ein regionales Modell, dessen Modellgebiet immer nur einen kleinen Ausschnitt der Erdatmosphäre umfasst. Es ist daher auf Randwerte aus einem überregionalen Modell wie dem IFS angewiesen, ist dafür jedoch in der Lage, auch kleinskalige Wettererscheinungen wie z.B. Land-Seewind-Zirkulationen zu erfassen und zu beschreiben. Nachvollziehbar wird das, wenn man berücksichtigt, dass in den beiden Vorhersagemodellen jeder Gitterpunkt einen Gitterbereich von etwa  $80 \times 80 \text{ km}^2$  (IFS) bzw.  $7 \times 7 \text{ km}^2$  (LM) vertritt. Dadurch sind die an den Gitterpunkten stehenden Zustandsvariablen wie z.B. Druck, Temperatur und Wind als Mittelwerte über den Gitterbereich zu verstehen. Eine höhere räumliche Auflösung ermöglicht daher realitätsgetreuere Simulationen.

Die Nestung des LM in das IFS bedeutet praktisch also nichts anderes, als den relevanten Teil des IFS-Modelloutputs so aufzubereiten, dass das LM diesen über seine definierten Eingabeschnittstellen einlesen und verarbeiten kann. Für die praktische Durchführung von Modellexperimenten existieren sowohl am EZMW als auch beim DWD sog. Experimentiersysteme. Dies sind komplexe Softwaresysteme, die mit dem Ziel entwickelt wurden, die technischen Details wie z.B. Syntax von Datenbankaufrufen, Abschicken von Batchjobs etc. vor dem Nutzer zu verbergen. Dadurch vereinfacht sich die Nutzerschnittstelle zu den Modellen erheblich. Einfach gesagt reduziert sich die Experimentkonfiguration dadurch auf die Spezifikation grundlegender technischer und meteorologischer Parameter, wie z.B. Art des Experiments, Modellversion und -auflösung, zu archivierende Variablen, Ausgabeintervall, Zeitschritt, Starttermin, Vorhersagelänge oder Modultyp zur Behandlung der Wolkenphysik. Auch der LM-Output wird standardmäßig in einer Datenbank gespeichert und muss vor weiteren Bearbeitungen von dort wieder extrahiert werden.

In Abbildung 2.11 ist der Effektivwind eines solchen LM-Laufes dargestellt. Zum Vergleich wurde in diese Grafik der Effektivwind des zugehörigen IFS-Laufes und der Reanalyse mit einbezogen. Die rote Kurve aus Abbildung 2.11 ist also identisch mit der violetten aus Abbildung 2.10. Zunächst fällt auf, dass es zwischen roter und grüner Kurve kleine Unterschiede gibt. Der Effektivwind aus dem EPS-Experiment wurde also durch den separaten IFS-Lauf nicht identisch nachgebildet, obwohl die Modellkonfiguration exakt vom EPS auf das IFS übertragen wurde. Die auftretenden Unterschiede sind aber alles in allem geringfügig. Im Falle von Member Nr. 26 gestaltete sich der Effektivwind im IFS sogar um  $1 \text{ m/s}$  extremer als im EPS. Grundsätzlich jedoch können diese

Differenzen zwischen EPS- und IFS-Extremwert sowohl ein positives, als auch ein negatives Vorzeichen aufweisen. Genauso können leichte zeitliche Verschiebungen die Folge sein.

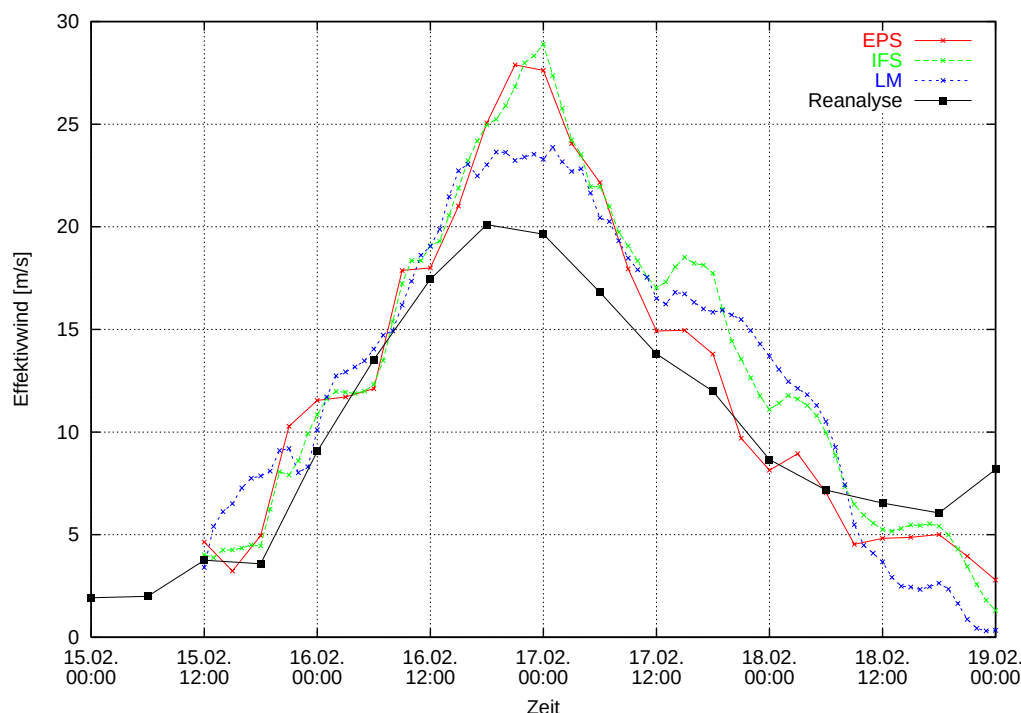


Abbildung 2.11: Effektivwind für das extremste Member des 62'er Super-Ensembles (Start: 15.02.1962, 12:00 UTC, Member Nr. 26) + nachgeschaltete Modellsimulationen mit IFS und LM

Weiterhin fällt auf, dass sich zwischen EPS/IFS und LM die Maximalwerte des Effektivwinds signifikant unterscheiden. Member Nr. 26 stellt in dieser Hinsicht keinen Einzelfall dar. Vielmehr hielt dieser Effekt systematisch über alle MUSE-Experimente hinweg an. Daher ist diesem Thema nachfolgend ein eigenes Kapitel (Seite 32 u. ff.) gewidmet. Vorerst wird aber nicht weiter darauf eingegangen.

In Tabelle 2.4 sind die Maxima des simulierten Effektivwinds für das 62'er Super-Ensemble zusammengefasst. Die darin aufgeführten Zahlenwerte charakterisieren zunächst nur die Windverhältnisse innerhalb der Deutschen Bucht. Um sich auch einen Überblick über die synoptische Situation innerhalb der beiden verwendeten Modelle verschaffen zu können, wurden im Dokumentanhang, ab Seite 55 für ausgewählte Vorhersagezeiten die Felder von Horizontalwind in 10 m über Grund und von auf NN reduziertem Luftdruck visualisiert. Anhand dieser Grafiken wird zunächst deutlich, dass nicht jede durchgeführte Modellsimulation innerhalb dieses Dokuments synoptisch analysiert werden kann, da auf Grund der Vielzahl der synoptischen Parameter und der z.T. relativ langen Vorhersagezeiten zu viele Bilder anfallen würden. Für die Analyse einer Sturmflut wurden Wind und Luftdruck für die Darstellung ausgewählt, weil sie in dieser Hinsicht am meisten Aufschluss geben. Bei den Grafiken selber ist außerdem zu beachten, dass die dargestellten Gebiete beider Modelle sich sowohl hinsichtlich Größe und Lage, als auch hinsichtlich der Projektion unterscheiden. Um trotzdem eine Orientierung zu geben, wurde in den Bildern des IFS das Modellgebiet des LM durch eine schwarze Linie veranschaulicht. Die Isobaren sind beschriftet und beim Wind gilt für beide Modelle die gleiche Farbskala.

Tabelle 2.4: Maximaler Effektivwind (Flächenmittel über die Deutsche Bucht) der 5 ausgewählten Extrem-Member aus dem 62'er Super-Ensemble, Maximum der Reanalyse: 20,1 m/s

| Startzeitpunkt<br>[YYYYMMDDHH] | Member<br>Nr. | max. Eff.-wind [m/s] |      |
|--------------------------------|---------------|----------------------|------|
|                                |               | IFS                  | LM   |
| 1962021500                     | 8             | 26,4                 | 24,7 |
| 1962021500                     | 30            | 27,7                 | 23,4 |
| 1962021500                     | 37            | 28,3                 | 24,3 |
| 1962021512                     | 26            | 28,9                 | 23,9 |
| 1962021512                     | 50            | 24,5                 | 23,6 |

Betrachtet man die Modellresultate, so wird ersichtlich, dass sich trotz aller Unterschiede im Effektivwind die synoptischen Verhältnisse in beiden Modellen sehr ähnlich gestalten. Dies gilt vor allem im Zeitbereich vor und nach dem Auftreten des Windmaximums. Worin die Differenzen im Extrembereich ihre Ursache haben könnten, wird im nachfolgenden Kapitel eingehender untersucht.

### 2.3.2 Unterschiede zwischen IFS und LM

Wie in Abbildung 2.11 zu sehen ist, liefert das IFS im Vergleich mit dem LM die höheren Spitzenwerte des Effektivwinds. Zudem ist das dort dargestellte Ensemble-Member Nr. 26 in dieser Hinsicht kein Einzelfall - vielmehr war dieser Effekt systematisch über fast alle IFS-LM-Experimente hinweg zu beobachten. Auch beschränkte er sich nicht auf den Effektivwind, der ja ein Flächenmittel über die Deutsche Bucht darstellt, sondern wurde genauso auch beim Vergleich einzelner Gitterpunkts-Windwerte registriert.

Dieser Effekt ist zunächst sehr überraschend: Im Allgemeinen sollte das räumlich höher auflösende Modell gerade infolge der kleineren pro Gitterpunkt zu repräsentierenden Fläche die höheren Windwerte liefern, da es kleinskaligere Strukturen im Starkwindfeld besser abbilden kann. Somit sollten die höchsten Gitterpunktswerte im LM auftreten. Und auch im Mittel über das relativ kleine Gebiet in der Deutschen Bucht würde man die Spitzenwerte eher beim LM erwarten, das vermutlich prägnantere kleinräumige Entwicklungen simulieren kann.

Bei der Analyse weiterer Experimente kam außerdem folgender, zunächst ebenfalls überraschender Effekt hinzu: In manchen EPS- bzw. IFS-Simulationen lief die zeitliche Entwicklung der 10m-Windfelder sehr unstetig, bisweilen geradezu sprunghaft ab, was sich dann besonders im Bereich hoher Absolutwerte stärker bemerkbar machte. Anhand der Simulation von Member Nr. 8, Startzeitpunkt 15.02.1962, 00:00 UTC (siehe Abbildung 2.10 auf Seite 29, rote Kurve) kann man dies sehr schön nachvollziehen: Ab 16.02., 06:00 UTC steigt der Effektivwind innerhalb von 6 Stunden um ca. 7 m/s an, um anschließend innerhalb von 3 Stunden wieder um ca. 6 m/s abzuflauen. Der gleiche Effekt tritt dann noch einmal ca. 18 Stunden später auf, dort sogar noch etwas ausgeprägter.

Die Ursachen für beide Effekte könnten z.B. in den unterschiedlichen Parametrisierungen der atmosphärischen Grenzschicht liegen. Die verwendeten Ansätze sind jedoch sehr komplex, zumal im IFS, wo auch eine Rückwirkung des modellierten Seegangs auf die Atmosphäre berücksichtigt wird. Im Rahmen des Projektes ließ sich daher nicht untersuchen, ob bzw. wie weit diese Parametrisierungen zu den Unterschieden beitragen. Es bliebe daher in jedem Fall nur festzuhalten, dass sowohl IFS als auch LM erfolgreich operationell eingesetzte Modelle sind, so dass man beide Lösungen als nach dem heutigen Stand der Modellierung gleichwertig ansehen müsste.

Als zweite mögliche Ursache der Unterschiede wurde die Wirkung der unterschiedlich aufgelösten Orographie untersucht. Das LM berücksichtigt ja wegen seiner größeren Horizontalauflösung insbesondere in Großbritannien deutlich höhere Gebirgszüge als das im EPS eingesetzte IFS (siehe Abbildung 2.12), wodurch eventuell eine dämpfende Wirkung auf westliche Winde in der Nordsee zustande kommen könnte. Die Wiederholung einer LM-Vorhersage mit der Orographie des IFS zeigte jedoch nur einen vernachlässigbaren Effekt, wie aus Abbildung 2.13 ersichtlich wird.

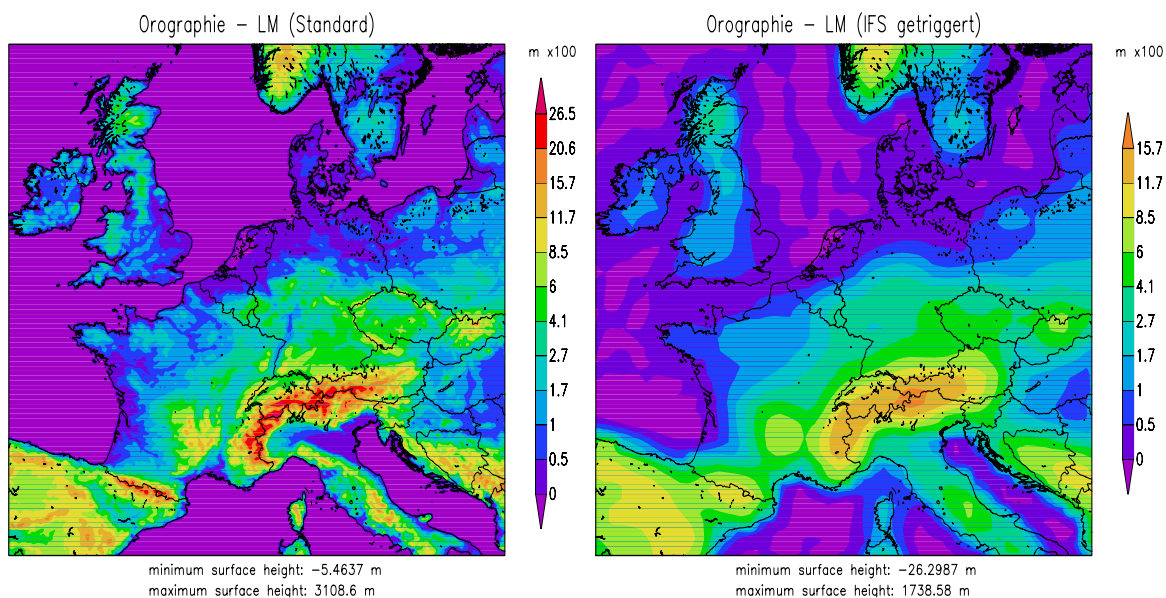


Abbildung 2.12: Vergleich von standardmäßiger LM-Modell-Orographie (links) und auf das LM-Modellgebiet adaptierter IFS-Modell-Orographie (rechts); höchste Modellerhebung im Schottischen Hochland: 850 m/410m

In dieser Grafik wurde außerdem das Resultat einer weiteren LM-Simulation dargestellt, die der Untersuchung des Einflusses der reibungsbedingten Turbulenz auf den 10m-Wind diente. Dazu wurde ein LM-Experiment durchgeführt, bei dem ein diagnostisches Schema zur Behandlung der turbulenten kinetischen Energie (TKE) zum Einsatz kam. Das derzeit operationell eingesetzte TKE-Schema beschreibt die atmosphärischen Turbulenzprozesse dagegen prognostisch. Im Vergleich zum früher eingesetzten diagnostischen Verfahren werden mit dem neueren prognostischen Schema auch in der stabil geschichteten Stratosphäre physikalisch plausible TKE-Muster erzeugt. Bei Verifikationsexperimenten im Vorfeld der Überführung des neueren TKE-Schemas in die Routine wurde festgestellt, dass mit dem prognostischen Verfahren der 10m-Wind systematisch verringert wurde.

Wie aus Abbildung 2.13 hervor geht, bewirkt die Änderung des TKE-Schemas genau wie die Änderung der Modell-Orographie nahezu keine Veränderungen im Effektivwind. Rote, grüne und blaue Kurve liegen über den gesamten Vorhersagebereich hinweg dicht beisammen, wobei der Unterschied zum Effektivwind des IFS für alle gleich groß ist.

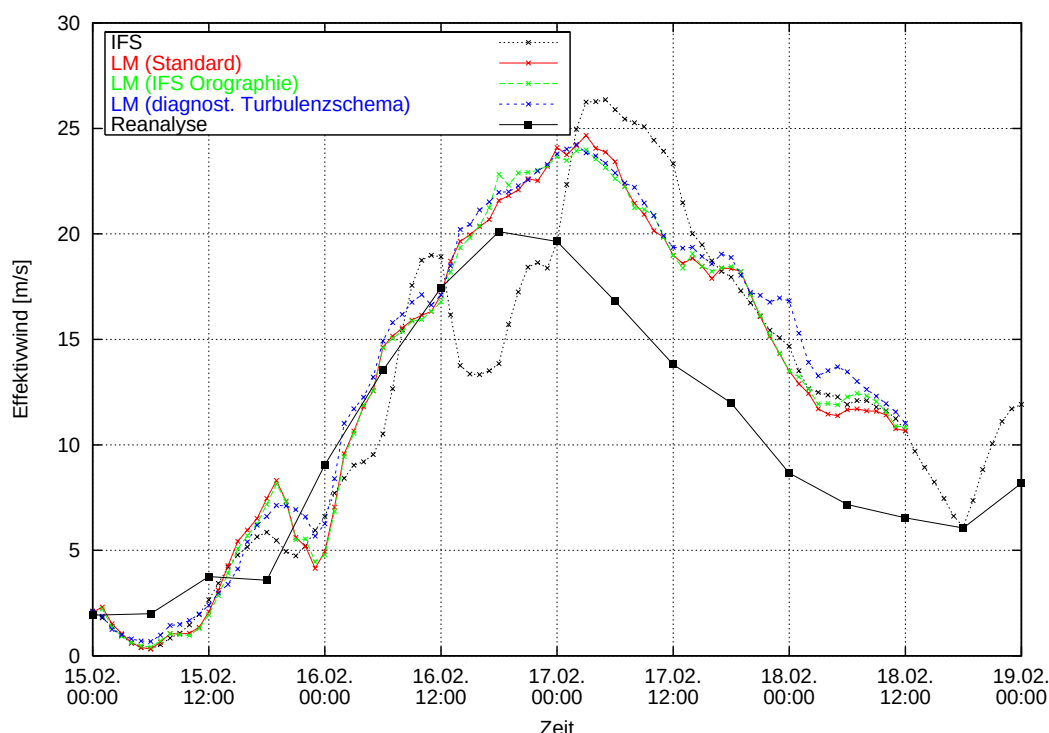


Abbildung 2.13: Einfluss verschiedener Modellkonfigurationen auf den Effektivwind anhand von Member Nr. 8, Startzeitpunkt 15.02.1962, 00:00 UTC; rot: Standard-LM, grün: LM mit IFS-Orographie, blau: LM mit diagnostischem (statt standardmäßig prognostischem) Turbulenzschema

Als Drittes wies schließlich die sprunghafte Entwicklung des Effektivwindes im IFS auf eine mögliche Beteiligung der im EPS stochastisch variierten Modellphysik hin [Hinweis von Beljaars]. Diese stellt - wie in Kapitel 2.2 erwähnt - einen groben Ansatz zur Berücksichtigung der Modell-Unsicherheiten dar und dient natürlich außerdem auch der Erhöhung der Variabilität im Ensemble. Praktisch umgesetzt wird die stochastisch variierte Modellphysik im EPS dadurch, dass die durch nicht-adiabatische Effekte in den prognostischen Gleichungen entstehenden Terme mit zufällig gewählten Faktoren zwischen 0,5 und 1,5 skaliert werden. Diese Faktoren sind in Gebieten von  $10 \times 10$  Breitengraden und in der Vertikalen identisch; sie werden außerdem über Perioden von jeweils sechs Stunden konstant gehalten. An den Grenzen dieser Raumgebiete und Zeitperioden variieren sie jedoch unstetig (zufällig). Außerdem hängen sie vom jeweiligen Modellparameter ab und werden z.B. für meridionale und zonale Windkomponente, Temperatur und spezifische Feuchte unterschiedlich gewählt.

Anhand dieser Fakten ist es plausibel, dass dieses Verfahren nicht optimal für Prozesse wie die turbulente Diffusion in Erdbodennähe ist: Hat sich ein Gleichgewicht zwischen Druckgradientkraft, Corioliskraft und den anderen beteiligten Kräften eingestellt, wird es spätestens nach 6 Stunden durch einen schlagartig veränderten Stochastik-Koeffizienten aus der Balance gebracht und muss sich erneut ausbalancieren.

Zur Untersuchung dieses Einflusses wurden verschiedene IFS-Experimente unter Deaktivierung der stochastischen Physik wiederholt, so z.B. Member Nr. 8, Startzeitpunkt 15.02.1962, 00:00 UTC. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.14 zu sehen.

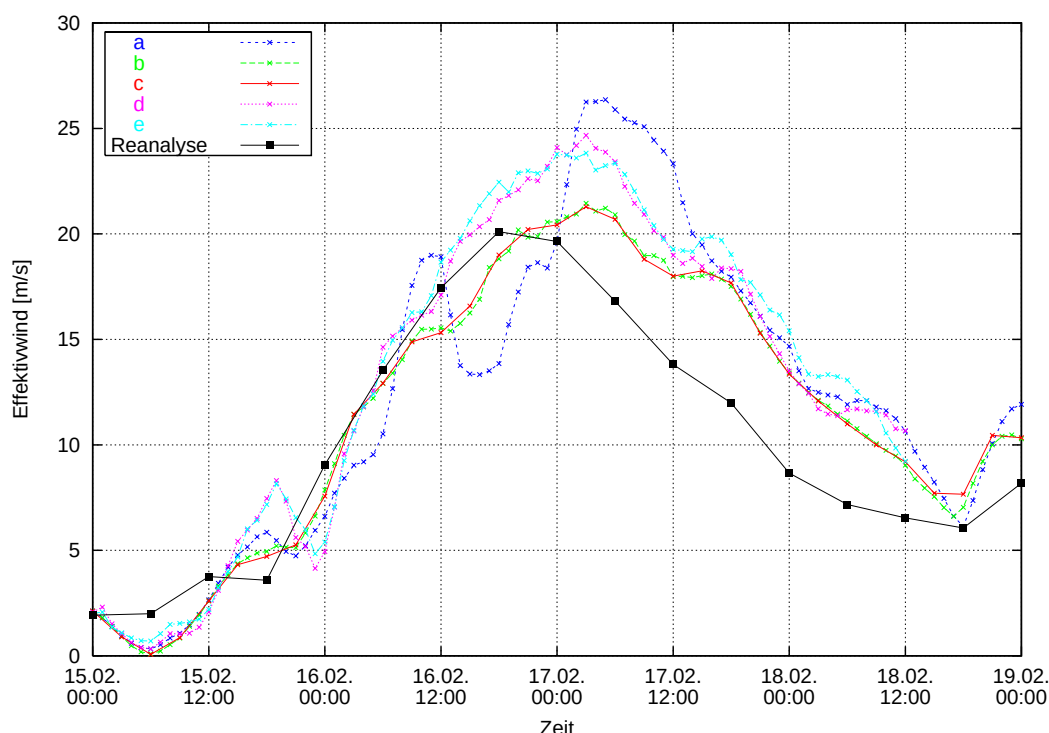


Abbildung 2.14: Vergleiche zum Einfluss der stochastisch variierten Modellphysik anhand von Member Nr. 8, 15.02.1962, 00:00 UTC + 96 h

Dargestellt sind dort analog zu Abbildung 2.11 Effektivwind von IFS („a“), LM („d“) und Reanalyse. Zusätzlich gibt es hier jedoch drei weitere Linien: „c“ ist die Kontrollvorhersage des am 15.02., 00:00 UTC gestarteten Ensembles. Sie basiert auf dem ungestörten Anfangszustand und unterliegt keiner stochastisch variierten Modellphysik. „b“ gehört zu einer IFS-Simulation, die analog zum IFS-Lauf „a“ konfiguriert war, mit dem einzigen Unterschied, dass die stochastische Physik deaktiviert war. „e“ entspricht dem Effektivwind einer LM-Simulation, die von „b“ randgesteuert wurde. Tabelle 2.5 gibt eine anschauliche Übersicht über die Unterschiede in den Modellkonfigurationen.

Tabelle 2.5: Unterschiede der Modellkonfigurationen der Abbildung 2.14 zugrunde liegenden Experimente

| Index | Modell | Störung des/der  |              |
|-------|--------|------------------|--------------|
|       |        | Anfangszustandes | Modellphysik |
| a     | IFS    | ja               | ja           |
| b     | IFS    | ja               | nein         |
| c     | IFS    | nein             | nein         |
| d     | LM     | ja               | ja           |
| e     | LM     | ja               | nein         |

Aus der Graphik geht hervor, dass beim EPS-Member 8 sowohl die hohen Spitzenwerte des Effektivwindes als auch seine starke zeitlich Variation eine Folge der stochastischen Variation der Modellphysik sind. Dagegen ergeben sich allein durch das veränderte Anfangsfeld nur minimale Unterschiede gegenüber der Kontrollvorhersage. Man entnimmt der Abbildung 2.14 außerdem, dass das LM bei Randsteuerung durch den ursprünglichen Member Nr. 8 nahezu identische Ergebnisse liefert, wie im Falle der Randsteuerung durch den Member Nr. 8 ohne stochastische Physik. Dies deutet darauf hin,



dass der in den beiden IFS-Vorhersagen extrem unterschiedliche 10m-Wind nicht oder allenfalls wenig zusammenhängt mit Unterschieden in den prognostischen Variablen, die zum Antrieb des LM verwendet werden.

Als weiteres Beispiel wurde Member Nr. 26 des 12 h später gestarteten Ensembles untersucht (siehe Abbildung 2.15 sowie Tabelle 2.6). Er fällt weniger durch starke zeitliche Variationen des Effektivwindes auf als durch ein länger anhaltendes hohes Maximum. In der Abbildung wurde auf die Darstellung der zweiten LM-Simulationen verzichtet, da genau wie in Abbildung 2.14 die IFS-Änderungen auch hier keine wesentlichen Veränderungen bewirkten. Auch in diesem Fall sind offensichtlich die Unterschiede zwischen Member 26 und Control praktisch vollständig auf die stochastische Physik zurückzuführen.

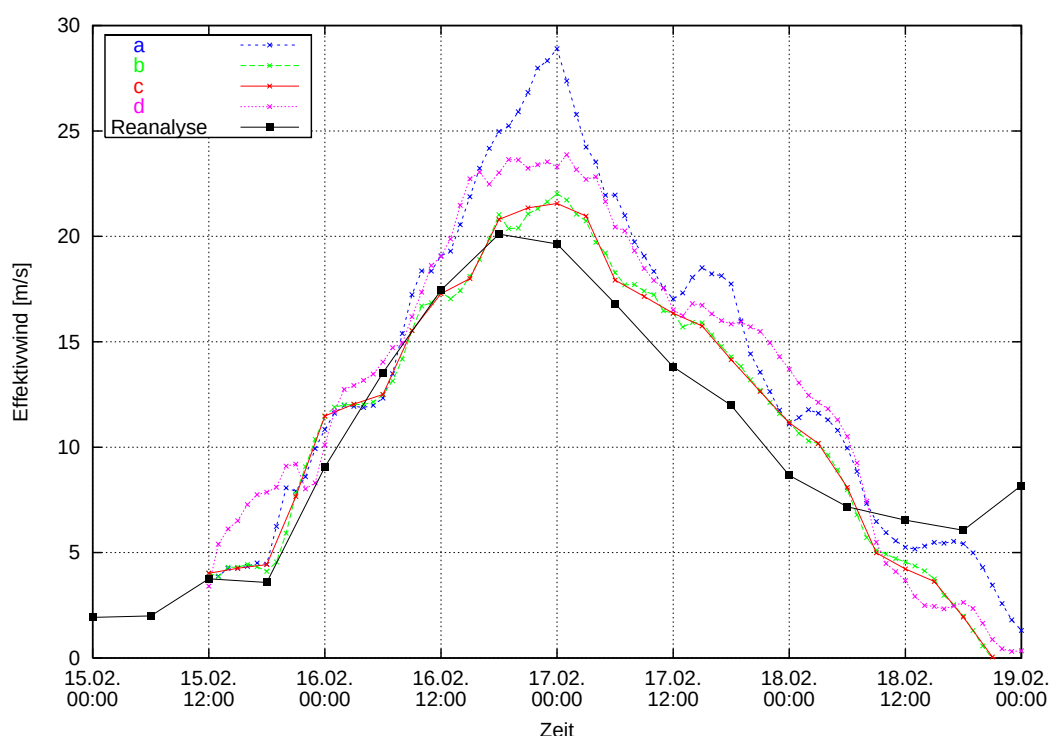


Abbildung 2.15: Vergleiche zum Einfluss der stochastisch variierten Modellphysik anhand von Member Nr. 26, Startzeitpunkt 15.02.1962, 12:00 UTC

Tabelle 2.6: Unterschiede der Modellkonfigurationen der Abbildung 2.15 zugrunde liegenden Experimente

| Index | Modell | Störung des/der  |              |
|-------|--------|------------------|--------------|
|       |        | Anfangszustandes | Modellphysik |
| a     | IFS    | ja               | ja           |
| b     | IFS    | ja               | nein         |
| c     | IFS    | nein             | nein         |
| d     | LM     | ja               | ja           |

Bemerkenswert ist auch der Unterschied im Effektivwind zwischen LM und IFS ohne stochastische Physik, wo in beiden Fällen das LM im Zeitbereich um das beobachtete Maximum höhere Werte liefert als das IFS, so wie man es eigentlich erwartet hätte.



Als letztes wurde Member Nr. 5 aus dem 99'er Super-Ensemble (Start: 03.12.1999, 06:00 UTC) untersucht. Auch hier wurden mehrere Modellexperimente mit und ohne stochastischer Physik bzw. gestörtem Anfangszustand gemacht (siehe Abbildung 2.16 sowie Tabelle 2.7). Hier bewirkte zwar die Änderung des Anfangszustandes eine Erhöhung des Effektivwindes. Hinzu kam aber ein etwa ebenso großer Effekt der stochastischen Physik, ohne den der Spitzenwert wiederum für das Vorhaben weniger interessant gewesen wäre.

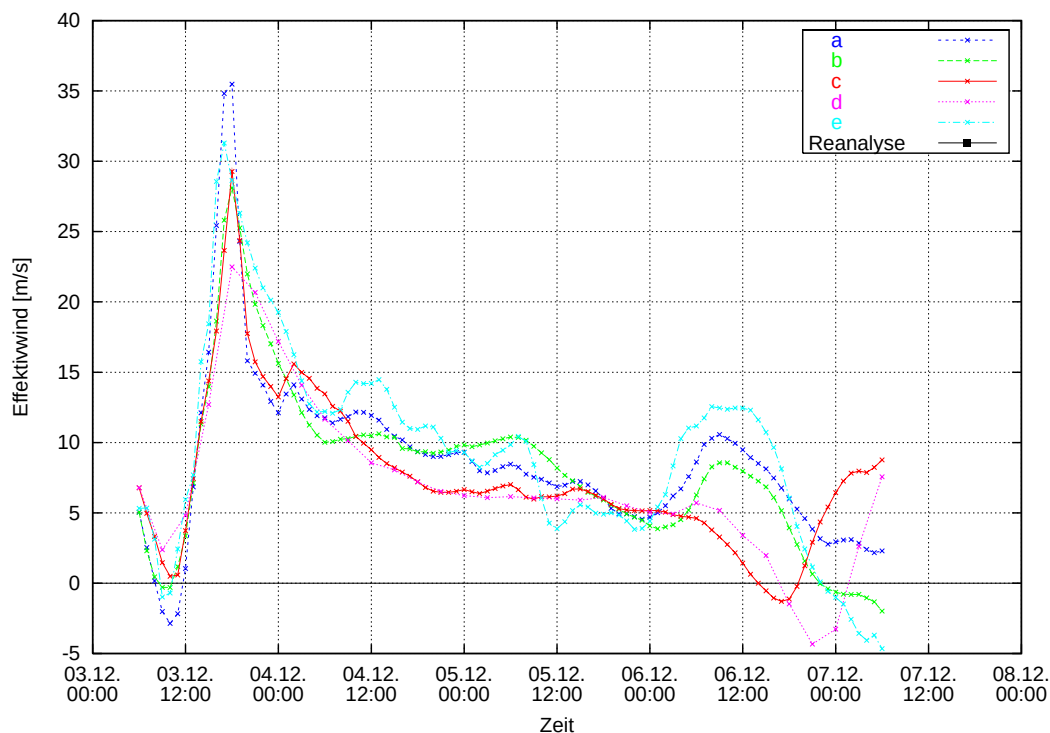


Abbildung 2.16: Vergleiche zum Einfluss der stochastisch variierten Modellphysik mittels Member Nr. 5, Startzeitpunkt 03.12.1999, 06:00 UTC

Tabelle 2.7: Unterschiede der Modellkonfigurationen der Abbildung 2.16 zugrunde liegenden Experimente

| Index | Modell | Störung des/der  |              |
|-------|--------|------------------|--------------|
|       |        | Anfangszustandes | Modellphysik |
| a     | IFS    | ja               | ja           |
| b     | IFS    | ja               | nein         |
| c     | IFS    | nein             | ja           |
| d     | IFS    | nein             | nein         |
| e     | LM     | ja               | ja           |

Zusätzlich zu den eben beschriebenen Untersuchungen wurde für die durchgeführten Modellexperimente der Effektivwind in verschiedenen Höhen analysiert. Dabei zeichnete sich ein weiterer interessanter Effekt ab: Der in Bodennähe dominante Einfluss der stochastischen Physik auf den EPS-Spread spielt in 500 hPa Höhe kaum noch eine Rolle. Dafür bilden hier die Störungen des Anfangszustandes die Hauptursache für den Spread des EPS. Dieser Effekt ist am EZMW bekannt und wurde bereits 1999 näher untersucht [Buizza et al. (1999)].

Es hätte sicherlich den Rahmen unseres Projektes gesprengt, diese Angelegenheit umfassender zu untersuchen. Die drei Experimente legen jedoch den Schluss nahe, dass die stochastische Physik wesentlich oder ausschließlich dafür verantwortlich ist, dass in fast allen im Vorhaben untersuchten Fällen im IFS höhere Effektivwinde auftraten als im LM. Dabei ist natürlich zu bedenken, dass im Vorhaben gezielt nach Fällen mit hohem Effektivwind im EPS gesucht wurde. Es bleibt daher offen, ob die stochastische Physik systematisch erhöhte Werte liefert. Jedoch liegt die Vermutung nahe, dass die hier gefundenen Spitzenwerte darauf zurückgehen.

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch das Ergebnis einer bisher unveröffentlichten EZMW-Studie, nach der im EPS starker Wind mit einer höheren Wahrscheinlichkeit beobachtet wurde, als man es auf Basis deterministischer Vorhersagen erwarten konnte [Beljaars (2004)]. Gegenwärtig laufen am EZMW Untersuchungen mit dem Ziel, den derzeitigen groben Ansatz für die stochastische Physik durch ein theoretisch besser fundiertes Verfahren zu ersetzen [Shutts (2004)].

Ein abschließendes Urteil darüber, wie vertrauenswürdig die im EZMW-EPS aufgetretenen Starkwinde sind, ist den Autoren dieses Berichtes leider nicht möglich. Die im Verlaufe dieser Untersuchung aufgetretenen Zweifel könnten nur durch umfangreiche Zusatzuntersuchungen geklärt werden, die aber auch bei frühzeitigem Erkennen des Sachverhaltes den Rahmen unseres Vorhabens gesprengt hätten.

Auch Email-Anfragen an zwei Spezialisten brachten keine wirkliche Klarheit. Der beim EZMW für das EPS zuständige Wissenschaftler, Roberto Buizza (2005; pers. Mitteilung, siehe Anhang C) betont, die Wirkung der stochastischen Physik sei vor ihrer operationellen Einführung sorgfältig untersucht worden. Zusätzlich zu der schon oben genannten Arbeit [Buizza, et al. (1999)] zitiert er weitere Veröffentlichungen [Mullen und Buizza (2001), Buizza und Chessa (2002)], die sich allerdings schwerpunktmäßig mit der Vorhersage des Niederschlages, im zweiten Fall auch des Bodendrucks befassen. Bezüglich des bodennahen Windes in der Nordsee vermutet er (wörtlich: „I would tend to think“), dass die statistischen Eigenschaften des EPS durch die stochastische Physik verbessert würden; geklärt werden könne dies aber nur durch zusätzliche Untersuchungen.

Etwas kritischer äußert sich der beim Britischen Wetterdienst beschäftigte Wissenschaftler Glenn Shutts (2005; pers. Mitteilung, siehe Anhang C), dessen neu entwickeltes Verfahren vermutlich die stochastische Physik ersetzen soll (s.o.). Er schreibt, dass man seiner Meinung nach („My feeling is“) besser auf die stochastische Störung der Vertikaldiffusion verzichtet hätte. Außerdem berichtet er über Erfahrungen (deren Urheber ihm leider nicht Erinnerlich sind), wonach das EPS exzessive kurzperiodische Starkwinde bzw. Böen produziere. Auch er hat aber leider in seinen EPS-Experimenten mit der operationellen und seiner alternativen Version nicht speziell den bodennahen Wind untersucht.

## 2.4 Ergebnisse der unterschiedlichen Fälle

Für die 62'er Sturmflut wurden bereits im vorangehenden Kapitel die Ergebnisse detailliert dargestellt und mit mehreren Grafiken untermauert. Analog wurde mit den 5 verbleibenden Sturmfluten der Jahre 1967, 1976, 1990, 1994 und 1999 verfahren. Die verwendeten Verfahren und Programme blieben dabei unverändert und so beschränkt sich die Darstellung der Ergebnisse pro Sturmflut auf eine Grafik für den Effektivwind der extremsten Member und eine Tabelle mit den Maxima des Effektivwinds. Damit sind die

modellierten Wetterlagen hinsichtlich ihres Sturmflutpotentials umfassend charakterisiert. In Bezug auf die Spitzenwerte im IFS sollten allerdings die Ausführungen am Ende des vorangestellten Kapitels 2.3.2 und im folgenden Abschnitt 2.6 bedacht werden.

Anhand der nachfolgenden Abbildungen und Tabellen zu den noch nicht betrachteten 5 Sturmfluten wird ersichtlich, dass die aufgetretenen extremen Sturmflutereignisse und Wetterlagen mit Hilfe der Ensemble-Technik nochmals deutlich extremer gestaltet werden konnten, wobei trotz aller Extremwerte diese „synthetischen“ Wetterlagen physikalisch konsistent sind und aus Anfangsverteilungen dynamisch nachvollzogen werden können.

### 2.4.1 Sturmflut vom 23. Februar 1967

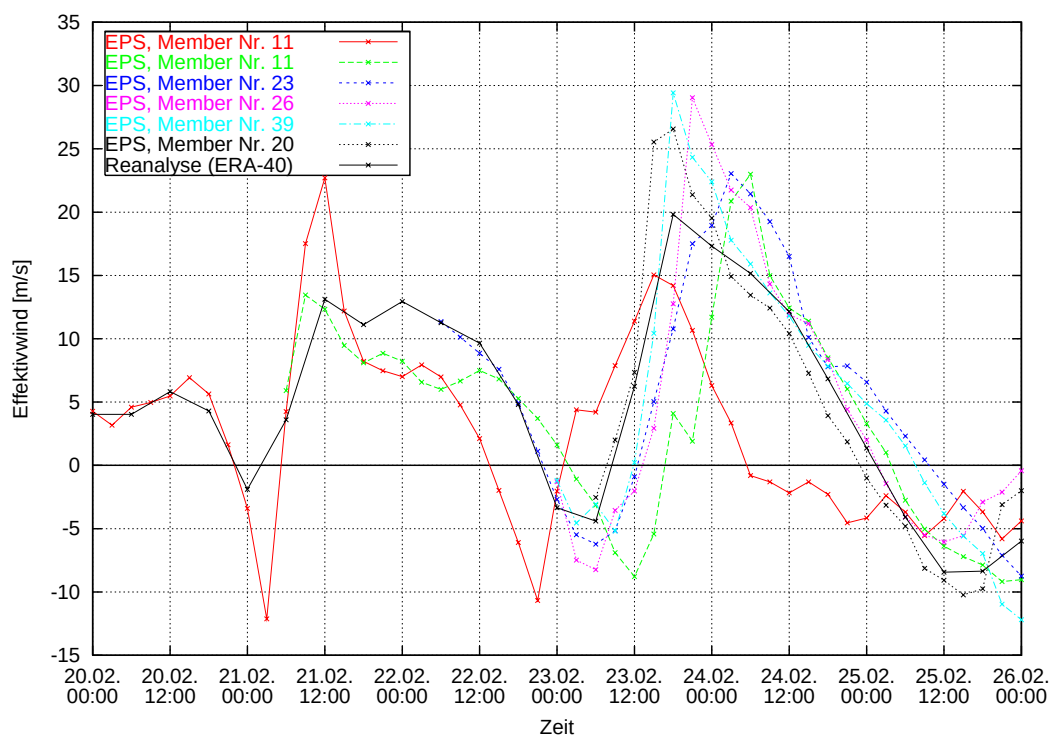


Abbildung 2.17: Ausgewählte Member aus dem 67'er Super-Ensemble

Tabelle 2.8: Maximaler Effektivwind (Flächenmittel über die Deutsche Bucht) der 6 ausgewählten Extrem-Member aus dem 67'er Super-Ensemble; Maximum der Reanalyse: 19,8m/s

| Startzeitpunkt<br>[YYYYMMDDHH] | Member<br>Nr. | max. Eff.-wind [m/s] |      |
|--------------------------------|---------------|----------------------|------|
|                                |               | IFS                  | LM   |
| 1967022000                     | 11            | 25,1                 | 21,7 |
| 1967022106                     | 11            | 13,7                 | 15,2 |
| 1967022206                     | 23            | 17,0                 | 17,2 |
| 1967022300                     | 26            | 27,0                 | 21,2 |
| 1967022300                     | 39            | 28,8                 | 23,0 |
| 1967022306                     | 20            | 24,7                 | 20,6 |

## 2.4.2 Sturmflut vom 3. Januar 1976

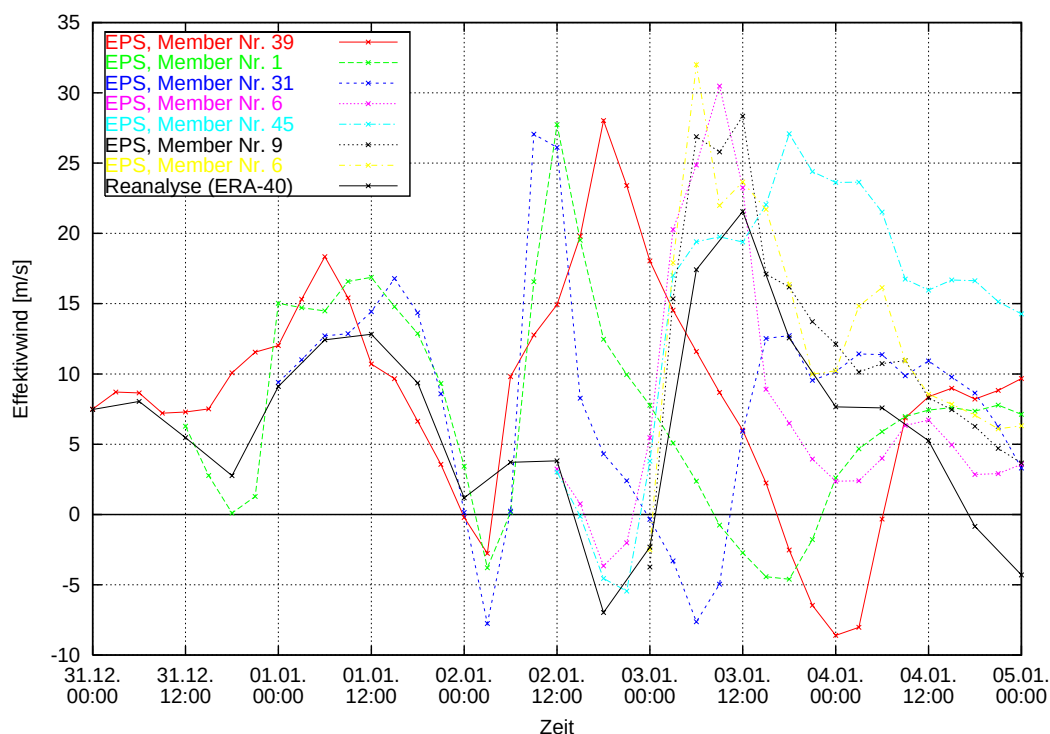


Abbildung 2.18: Ausgewählte Member aus dem 76'er Super-Ensemble

Tabelle 2.9: Maximaler Effektivwind (Flächenmittel über die Deutsche Bucht) der 7 ausgewählten Extrem-Member aus dem 76'er Super-Ensemble; Maximum der Reanalyse: 21,6m/s

| Startzeitpunkt<br>[YYYYMMDDHH] | Member<br>Nr. | max. Eff.-wind [m/s] |      |
|--------------------------------|---------------|----------------------|------|
|                                |               | IFS                  | LM   |
| 1975123100                     | 39            | 28,3                 | 24,9 |
| 1975123112                     | 1             | 28,6                 | 29,5 |
| 1976010100                     | 31            | 30,3                 | 27,5 |
| 1976010212                     | 6             | 31,7                 | 27,6 |
| 1976010212                     | 45            | 28,6                 | 28,7 |
| 1976010300                     | 6             | 32,3                 | 27,4 |
| 1976010300                     | 9             | 29,2                 | 26,4 |

### 2.4.3 Sturmflut vom 27./28. Februar 1990

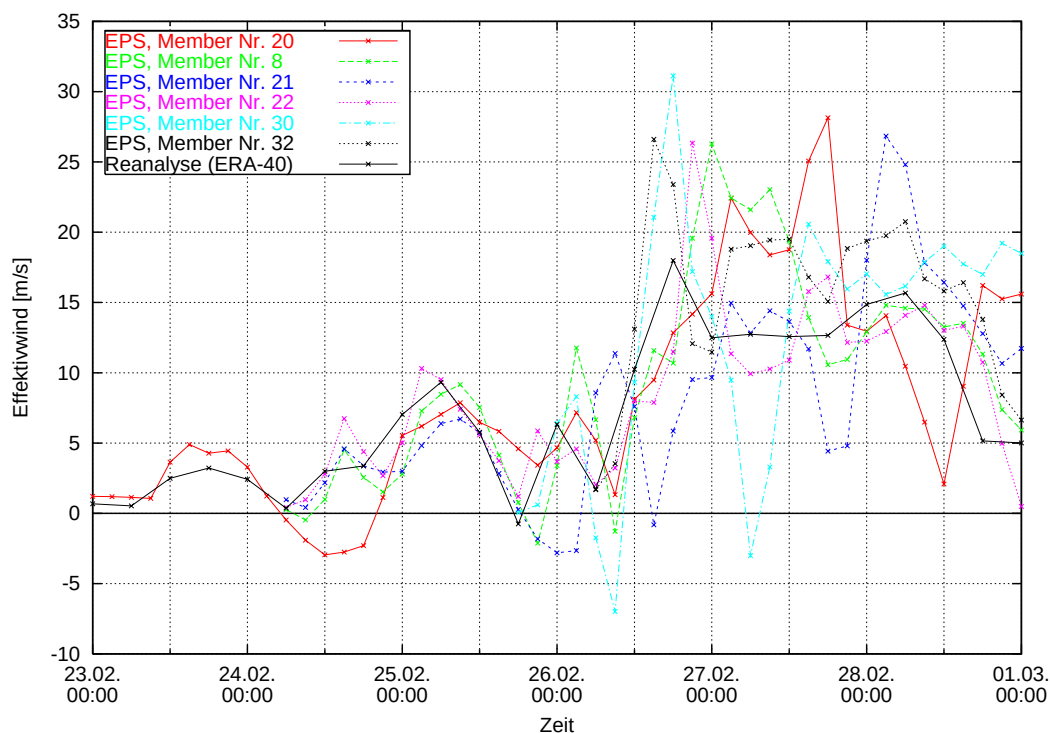


Abbildung 2.19: Ausgewählte Member aus dem 90'er Super-Ensemble

Tabelle 2.10: Maximaler Effektivwind (Flächenmittel über die Deutsche Bucht) der 6 ausgewählten Extrem-Member aus dem 90'er Super-Ensemble; Maximum der Reanalyse: 18,0m/s

| Startzeitpunkt<br>[YYYYMMDDHH] | Member<br>Nr. | max. Eff.-wind [m/s] |      |
|--------------------------------|---------------|----------------------|------|
|                                |               | IFS                  | LM   |
| 1990022300                     | 20            | 29,2                 | 24,1 |
| 1990022406                     | 8             | 27,6                 | 25,7 |
| 1990022406                     | 21            | 29,3                 | 24,7 |
| 1990022406                     | 22            | 27,5                 | 25,7 |
| 1990022518                     | 30            | 34,4                 | 27,9 |
| 1990022606                     | 32            | 27,1                 | 25,7 |

## 2.4.4 Sturmflut vom 28. Januar 1994

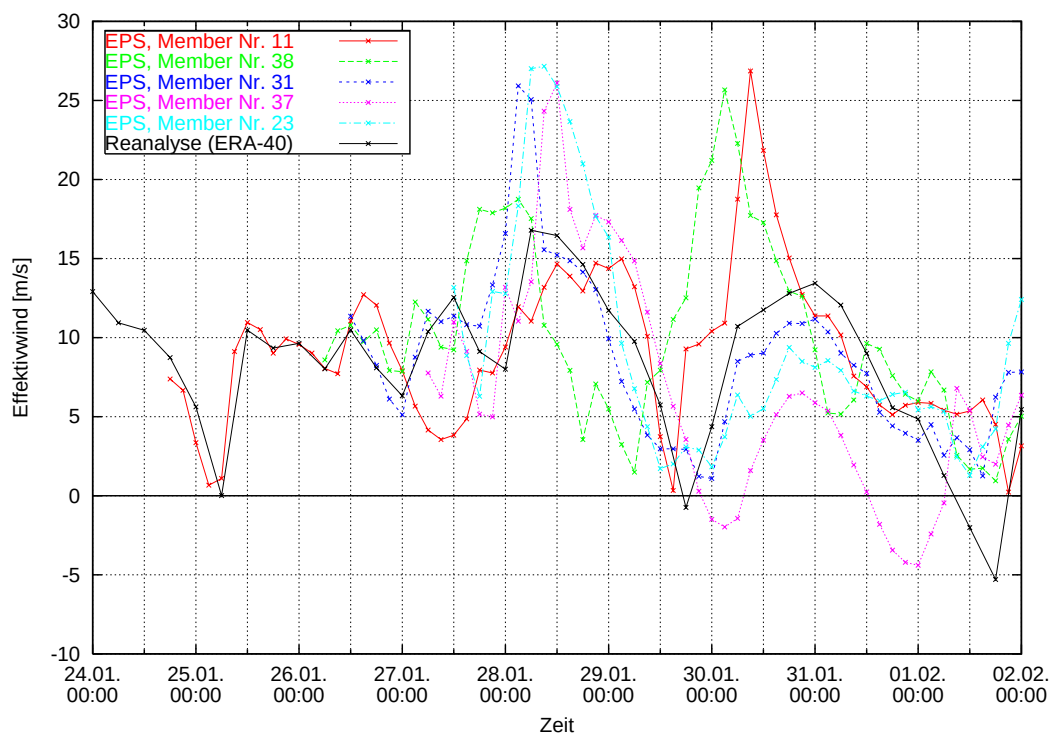


Abbildung 2.20: Ausgewählte Member aus dem 94'er Super-Ensemble

Tabelle 2.11: Maximaler Effektivwind (Flächenmittel über die Deutsche Bucht) der 5 ausgewählten Extrem-Member aus dem 94'er Super-Ensemble; Maximum der Reanalyse: 16,8m/s

| Startzeitpunkt<br>[YYYYMMDDHH] | Member<br>Nr. | max. Eff.-wind [m/s] |      |
|--------------------------------|---------------|----------------------|------|
|                                |               | IFS                  | LM   |
| 1994012418                     | 11            | 27,1                 | 25,3 |
| 1994012606                     | 38            | 17,2                 | 18,5 |
| 1994012612                     | 31            | 27,1                 | 24,1 |
| 1994012706                     | 37            | 23,9                 | 22,4 |
| 1994012712                     | 23            | 27,5                 | 24,0 |

## 2.4.5 Sturmflut vom 3. Dezember 1999

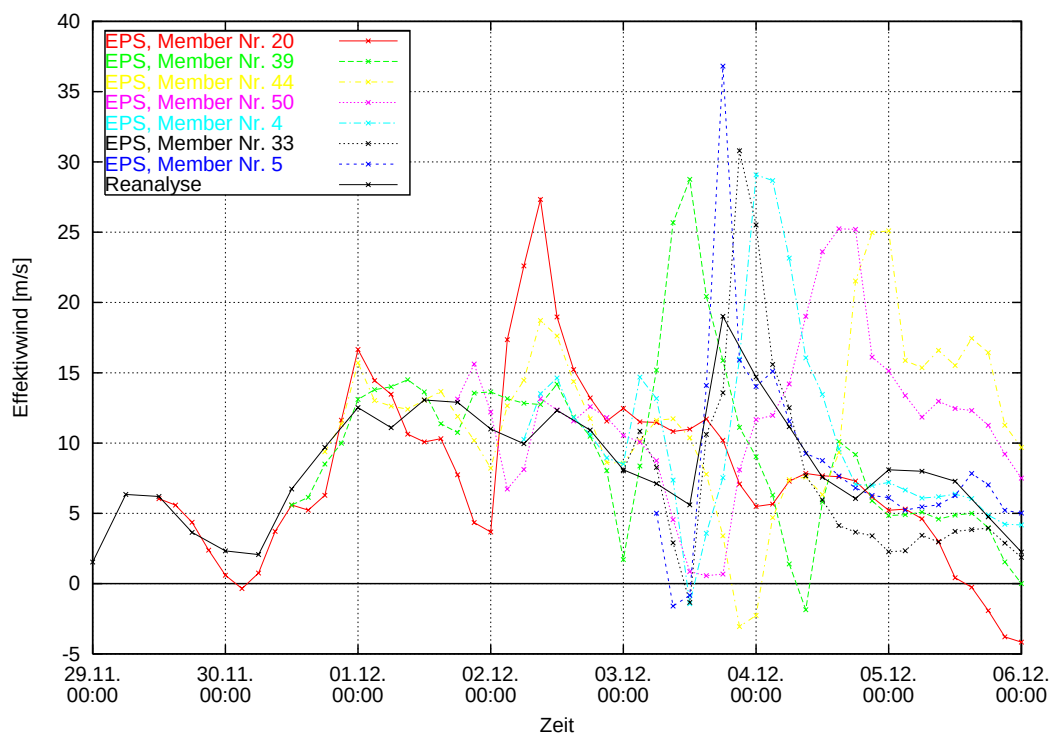


Abbildung 2.21: Ausgewählte Member aus dem 99'er Super-Ensemble

Tabelle 2.12: Maximaler Effektivwind (Flächenmittel über die Deutsche Bucht) der 8 ausgewählten Extrem-Member aus dem 99'er Super-Ensemble; Maximum der Reanalyse: 19,0m/s

| Startzeitpunkt<br>[YYYYMMDDHH] | Member<br>Nr. | max. Eff.-wind [m/s] |      |
|--------------------------------|---------------|----------------------|------|
|                                |               | IFS                  | LM   |
| 1999112912                     | 20            | 28,7                 | 24,9 |
| 1999113012                     | 39            | 33,5                 | 30,4 |
| 1999113018                     | 44            | 23,2                 | 21,8 |
| 1999120112                     | 2             | 29,5                 | 27,6 |
| 1999120118                     | 50            | 24,7                 | 19,2 |
| 1999120206                     | 4             | 14,5                 | 18,1 |
| 1999120300                     | 33            | 20,4                 | 21,4 |
| 1999120306                     | 5             | 35,5                 | 31,3 |

## 2.4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Man kann die oben dargelegten Informationen zu den 6 Super-Ensembles noch weiter bündeln, indem man aus den pro Super-Ensemble ausgewählten Simulationen nochmals die extremsten Fälle auswählt. Das Resultat ist Tabelle 2.13 zu entnehmen. Wie zu erkennen ist, gestalteten sich die Windverhältnisse in der Deutschen Bucht in beiden Modellen deutlich extremer als in der Realität. Die Flächenmittel wurden demnach immer um mindestens 8,8 m/s (IFS) bzw. 3,2 m/s (LM) übertroffen, im Einzelfall sogar um 16,5 m/s (IFS) bzw. 12,3 m/s (LM)!

Tabelle 2.13: Vergleich der Maxima des Effektivwinds von IFS und LM mit der Reanalyse; die Modellwerte stellen das Maxima über das gesamte entsprechende Super-Ensemble dar

| Sturmflut      | max. Eff.-wind<br>- Reanalyse - | max. Effektivwind<br>- IFS - | max. Effektivwind<br>- LM - |
|----------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 16.02.1962     | 20,1 m/s                        | 28,9 m/s                     | 24,7 m/s                    |
| 23.02.1967     | 19,8 m/s                        | 28,8 m/s                     | 23,0 m/s                    |
| 03.01.1976     | 21,6 m/s                        | 32,3 m/s                     | 29,5 m/s                    |
| 27./28.02.1990 | 18,0 m/s                        | 34,4 m/s                     | 27,9 m/s                    |
| 28.01.1994     | 16,8 m/s                        | 27,5 m/s                     | 25,3 m/s                    |
| 03.12.1999     | 19,0 m/s                        | 35,5 m/s                     | 31,3 m/s                    |

Weitere Auswertungen zu diesen extremen meteorologischen Bedingungen - insbesondere zur Zuordnung von Wasserständen - sind dem vom BSH verfassten Teil dieses Abschlussberichts zu entnehmen.

## 2.5 Analyse der EPS-Routine des Winterhalbjahres 2003/04

Im Rahmen der für das Projekt MUSE durchgeführten Ensemble-Experimente wurde deutlich, dass sich die meisten Extremsimulationen ergeben, wenn Startzeitpunkt und Vorhersagelänge des EPS so gewählt werden, dass der Zeitpunkt eines real beobachteten Windstaumaximums von der Modellsimulation überdeckt wird. Man kann jedoch nicht erwarten, mit dieser Vorgehensweise alle beachtenswerten numerischen Sturmflutwetterlagen der letzten Jahrzehnte zu erfassen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie viele Simulationen mit hohem Sturmflutpotential bei diesem Verfahren unberücksichtigt bleiben.

Um diese Frage zu beantworten, wurden für das an Stürmen sehr arme Winterhalbjahr 2003/2004 die Routine-EPS-Vorhersagen des EZMW auf ihr Sturmflutpotential hin begutachtet. Dazu wurde analog zur Analyse eines EPS-Experiments das in Kapitel 2.2 beschriebene Effektivwind-Kriterium eingesetzt. Im Ergebnis erhält man für jeden der 6 betrachteten Monate eine Grafik mit den Häufigkeitsverteilungen des Effektivwinds (siehe Abbildung 2.22, 2.23, und 2.24).

Daraus wird ersichtlich, dass in den 9150 Ensemble-Vorhersagen für diesen Zeitraum keine extrem hohen Effektivwinde enthalten sind: Die Maxima reichen nur für einige wenige Simulationen an 25 m/s heran. Dies kann als eine Bestätigung für die ausgewählte MUSE-Methodik angesehen werden. D.h., dass durch die Beschränkung auf Zeiträume, in denen auch tatsächlich hohe Sturmfluten beobachtet wurden, mit großer Wahrscheinlichkeit auch die extremsten Modellsturmfluten erfasst werden. Natürlich kann nicht ausgeschlossen werden, dass mit dieser Methode eine mögliche Extremsimulation nicht identifiziert werden kann. Andererseits ist die Alternative - für die letzten 40 Jahre



mit dem aktuellen EPS Simulationen durchführen - sowieso nicht realisierbar, da der Rechenaufwand dafür im Rahmen dieses Projektes nicht tragbar wäre.

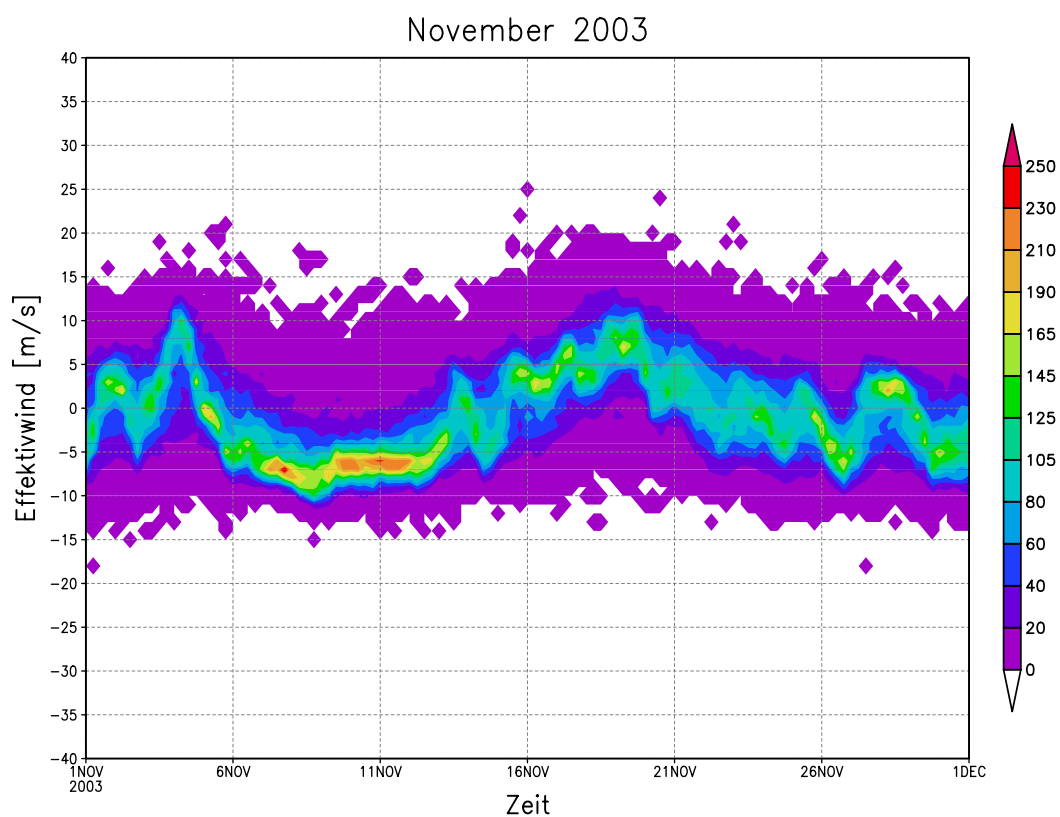
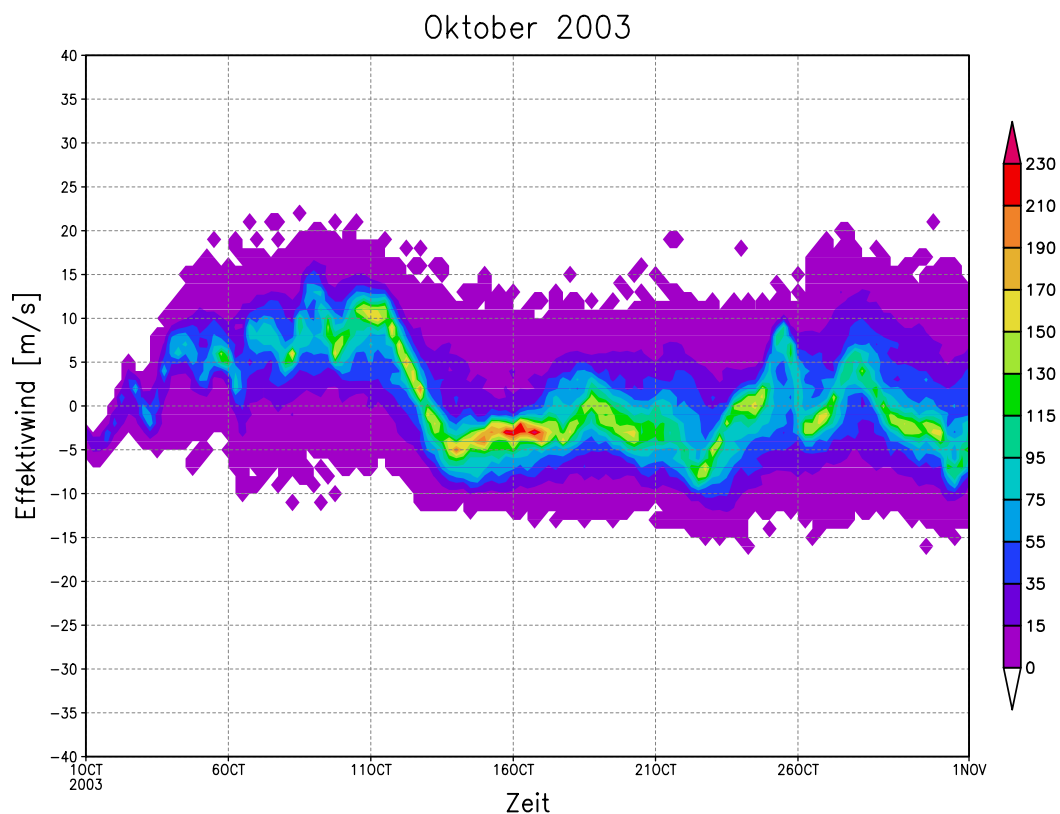


Abbildung 2.22: Häufigkeitsverteilungen des Effektivwindes aus den EPS-Routineberechnungen des EZMW für Oktober und November 2003

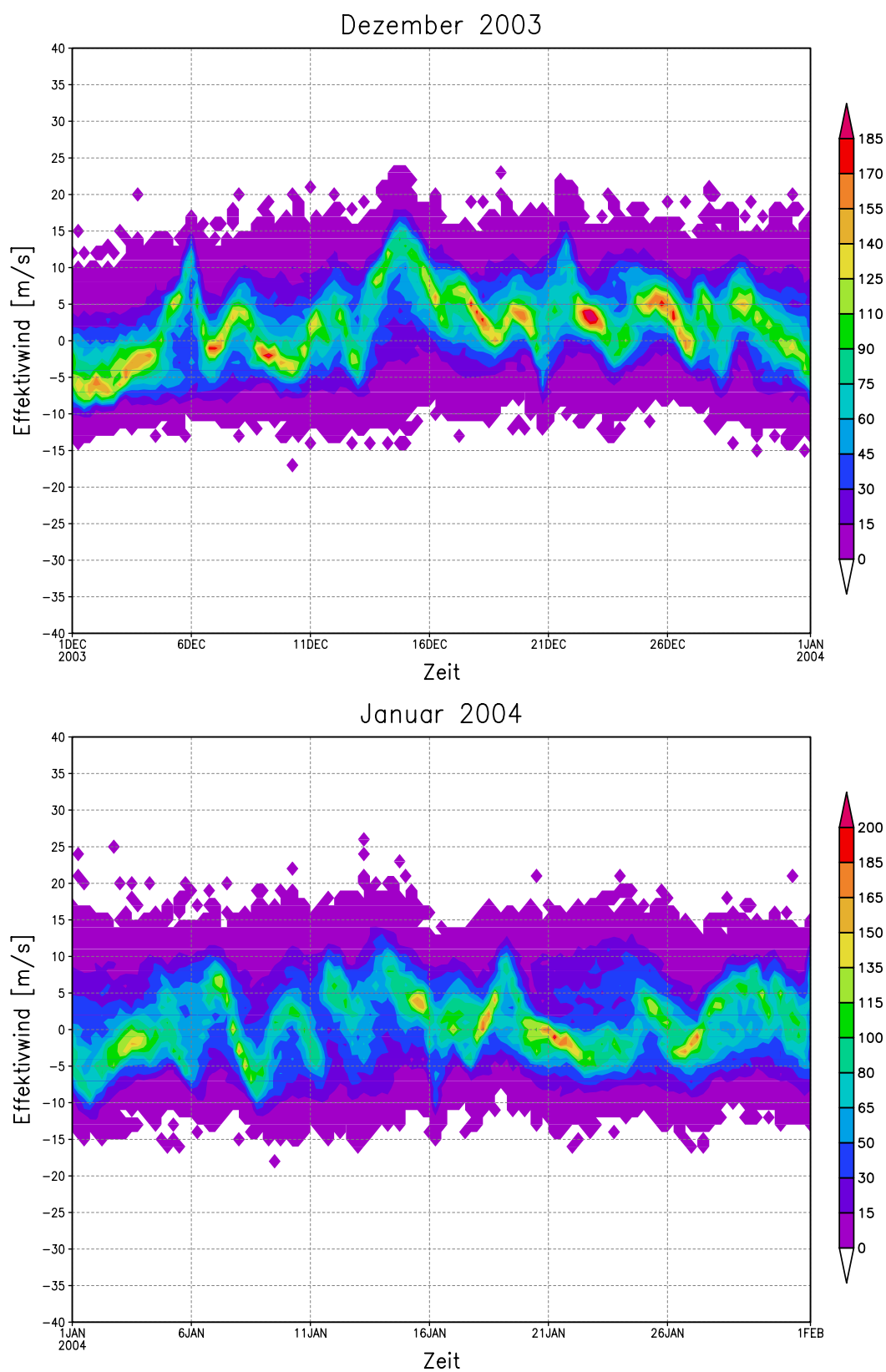


Abbildung 2.23: Häufigkeitsverteilungen des Effektivwindes aus den EPS-Routineberechnungen des EZMW für Dezember 2003 und Januar 2004

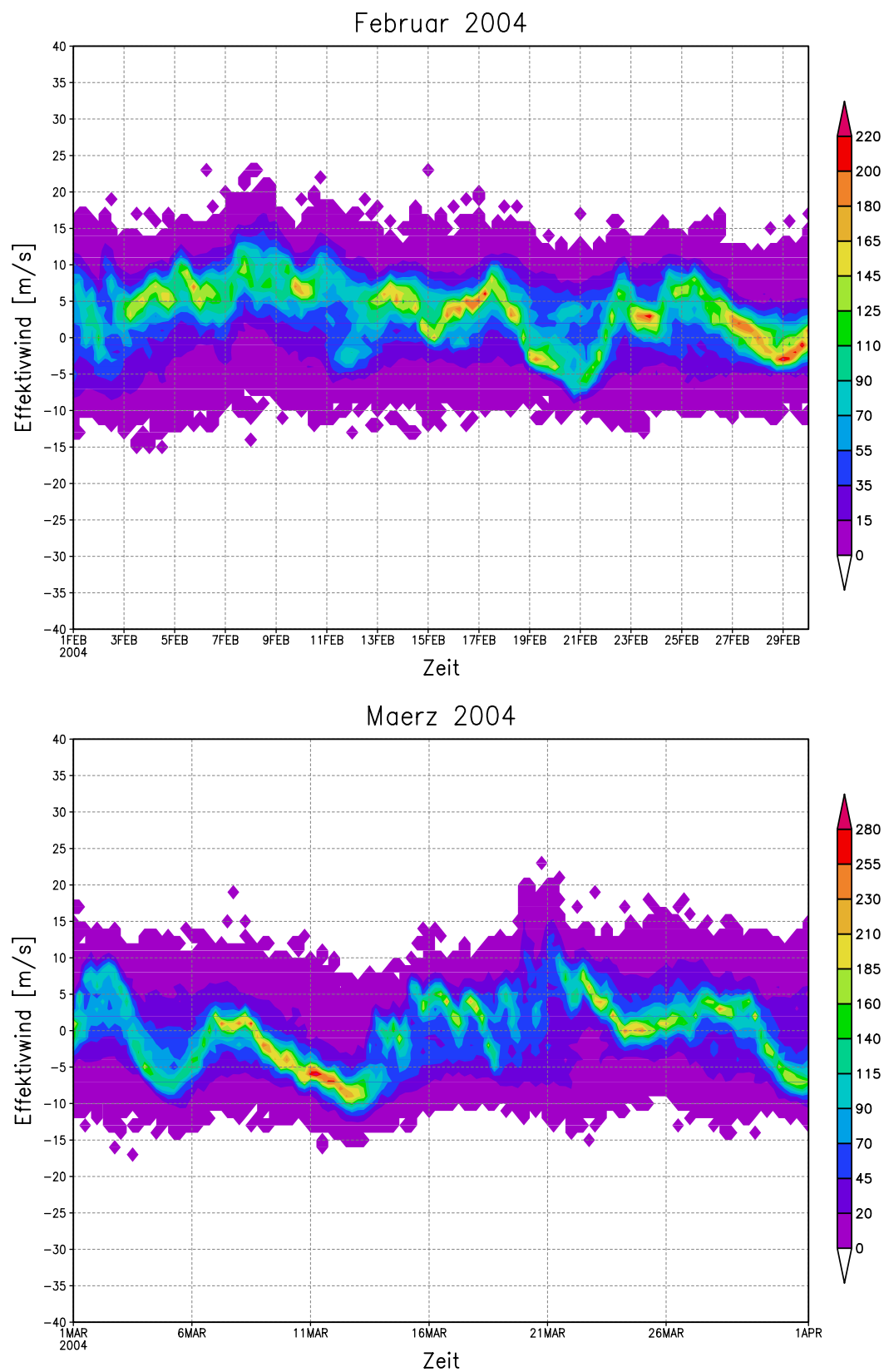


Abbildung 2.24: Häufigkeitsverteilungen des Effektivwindes aus den EPS-Routineberechnungen des EZMW für Februar und März 2004

## 2.6 Bewertung der Ergebnisse

Die im Vorhaben erzielten Ergebnisse basieren auf Vorhersagen mit den Modellen des EZMW und des DWD, die dem heutigen Stand der Wissenschaft bei der Simulation der Atmosphäre entsprechen und erfolgreich für die Wettervorhersage eingesetzt werden. Speziell das EZMW-EPS dient dazu, ausgehend von jedem Startzeitpunkt einen ganzen Satz unterschiedlicher Vorhersagen zu erzeugen, die den Unsicherheiten der Bestimmung der Anfangslage und der Modellierung Rechnung tragen. Derartige Unsicherheiten sind prinzipiell unvermeidbar, auch wenn ihre Größe - vor allem in Bezug auf die Modellierung - sicherlich vom jeweils erreichten Stand der Beobachtungstechnik und der Modellierung abhängt.

Im Rahmen dieser (heute) unvermeidbaren Unsicherheiten sind die im Vorhaben produzierten und untersuchten Vorhersagen alle als mögliche und physikalisch konsistente Lösungen der atmosphärischen Entwicklung zu betrachten. Es konnte damit gezeigt werden, dass Wetterlagen mit einem gegenüber den beobachteten Lagen deutlich erhöhten Sturmflutpotential möglich gewesen wären, auch wenn sie tatsächlich nicht so eingetreten sind. Die Anzahl der insgesamt gezielt ausgewählten Lagen aus den vergangenen Jahrzehnten und die Zahl der von uns jeweils durchgeführten Einzelvorhersagen liefern eine Basis zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit der modellierten Lagen durch die Projektpartner. Unterstützt wird dies noch durch die Untersuchung der Routinevorhersagen des EZMW-EPS für ein Winterhalbjahr, in dem tatsächlich keine größeren Sturmfluten beobachtet wurden (siehe Kapitel 2.5).

Leider besteht aber eine Unsicherheit in Bezug auf die im EZMW-EPS direkt simulierten bodennahen Winde. Die in Kapitel 2.3.2 geschilderten Ergebnisse lassen Zweifel daran aufkommen, ob die „stochastische Physik“ mit ihren deutlichen und un stetigen Variationen der Tendenzen physikalischer Effekte wirklich Ergebnisse produziert, die im Rahmen der Unsicherheit heutiger Modelle als mögliche Entwicklungen der Atmosphäre angesehen werden können. Die Antworten der dazu befragten, einschlägig tätigen Wissenschaftler ergeben leider kein übereinstimmendes schlüssiges Bild, was sicherlich damit zusammenhängt, dass bisher offensichtlich niemand speziell die Simulation des bodennahen Windes im EZMW-EPS gründlich untersucht hat. (Da die stochastische Physik in naher Zukunft durch ein anderes Verfahren ersetzt werden soll, wird vermutlich auch niemand mehr die dafür notwendige aufwendige Untersuchung machen wollen.)

Immerhin bleibt festzuhalten, dass sich das EZMW-EPS ansonsten ausweislich der damit erzielten Erfahrungen und der Verifikationsergebnisse als erfolgreiches Vorhersagesystem bewährt hat. Auch zeigte sich bei zwei von uns untersuchten Fällen, dass LM mit Randsteuerung durch EPS-Member, die mit oder ohne stochastische Physik gerechnet waren, sehr ähnliche Ergebnisse lieferte; die in diesen EPS-Vorhersagen sehr unterschiedlichen bodennahen Winde hatten also offensichtlich keine große Auswirkung auf die Variablen, die zum Antrieb des LM benutzt werden.

Als Folgerung aus diesem Sachverhalt erschiene es u.E. sinnvoll, für die statistische Auswertung der MUSE-Ergebnisse ein Szenarium zu entwerfen, das nur die Wasserstände berücksichtigt, die mit Antrieb durch das in die EPS-Vorhersagen eingebettete LM erhalten wurden. Ein alternatives Szenarium könnte die Ergebnisse mit direktem Antrieb durch die EPS-Vorhersagen einbeziehen; seine - vermutlich deutlich geringere - Eintreffwahrscheinlichkeit ließe sich aber wohl überhaupt nicht quantifizieren.

### III Zusammenfassung

Das Gesamtziel des Vorhabens „Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten“ (MUSE) war die Entwicklung von Methoden zur statistischen Einordnung physikalisch möglicher, aber noch nicht eingetretener, außergewöhnlich hoher Sturmfluten im Bereich der Deutschen Bucht. Der Beitrag des DWD bestand darin, geeignete Wetterlagen bereitzustellen.

In der Vergangenheit hatte es Versuche gegeben, durch geringfügige Änderungen beobachteter Entwicklungen extreme Wetterlagen zu konstruieren. Ein Schwachpunkt dieses Ansatzes ist, dass diese Wetterlagen nicht dynamisch aus Anfangsverteilungen nachvollzogen werden können; die Ergebnisse solcher Studien können somit grundsätzlich in Frage gestellt werden.

Im Vorhaben wurde daher der Ansatz gewählt, derartige Wetterlagen in Vorhersagen globaler atmosphärischer Modelle zu identifizieren bzw. neu zu erzeugen. Solche Vorhersagen stellen im Rahmen der Unsicherheiten der Beobachtung von Anfangszuständen und der Modellierung nach dem heutigen Stand der Wissenschaft in sich konsistente und mögliche atmosphärische Entwicklungen dar, auch wenn sie tatsächlich nicht so eingetreten sind. Die Ergebnisse der globalen Vorhersagen sollten dann zum Antrieb des hochauflösenden DWD-Regionalmodells (LM) benutzt werden, um detaillierte Felder für die interessierende Region zu erzeugen.

Zur einfachen Identifizierung geeigneter Wetterlagen in vorliegendem Vorhersagematerial wurde auf Vorschlag der Partner beim BSH der so genannte Effektivwind gewählt: Die über ein Gebiet in der Deutschen Bucht gemittelte Komponente des bodennahen Windes aus einer Richtung von 29517 (Westnordwest), deren Stärke einen guten Hinweis auf das Sturmflutpotential einer Wetterlage gibt. Anfängliche Untersuchungen zeigten, dass in dem begrenzten Archiv mit globalen Vorhersagen des globalen DWD-Modells (GME) kaum interessante Lagen zu finden waren und dass ältere Vorhersagen aus dem sehr viel umfangreicheren Archiv des Ensemble-Vorhersage-Systems (EPS: Ensemble Prediction System) beim Europäischen Zentrum für mittelfristige Vorhersagen (EZMW) nicht ausreichend reproduziert werden konnten, um Randwerte für das LM zu erhalten.

Die gewählte Vorgehensweise bestand schließlich darin, für Perioden mit beobachteten Sturmfluten aus den letzten Jahrzehnten beim EZMW Serien von Ensemble-Vorhersagen neu zu berechnen. Die Serien bestanden aus jeweils 50 Vorhersagen mit zeitlich versetzten Anfangszeitpunkten, so dass für jede ausgewählte Periode etwa 500 bis 1000 Einzelvorhersagen verfügbar waren. In den archivierten Ergebnissen wurden dann viel versprechende Ensemble-Mitglieder mit hohem Effektivwind identifiziert, neu berechnet und dabei die für den Antrieb des LM benötigten Daten abgespeichert. Diese wurden dann zum DWD transferiert und hier zum Antrieb für Vorhersagen des LM benutzt. Schließlich wurden Daten aus den Vorhersagen beider Modelle dem BSH für den Antrieb der dortigen Modelle zur Verfügung gestellt.

Zusammengefasst zeigten die Ergebnisse der Experimente mit dem in das EZMW-Modell genesteten LM, dass eine Reihe von Wetterlagen mit einem gegenüber den beobachteten Lagen deutlich erhöhten Sturmflutpotential möglich gewesen wären, auch wenn sie tatsächlich nicht so eingetreten sind. Die Anzahl der insgesamt gezielt ausgewählten Lagen aus den vergangenen Jahrzehnten und die Zahl der von uns jeweils durchgeführten Einzelvorhersagen liefern eine Basis zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit der modellierten Lagen durch die Projektpartner. Unterstützt wird dies noch durch die Untersuchung der Routinevorhersagen des EZMW-EPS für ein Winterhalbjahr, in dem tatsächlich keine größeren Sturmfluten beobachtet wurden.

Tatsächlich wurden bei allen betrachteten Fällen in der für das EPS benutzten Version des EZMW-Modells jeweils noch höhere Spitzenwerte des Effektivwindes simuliert als im LM. In drei näher untersuchten Fällen konnte gezeigt werden, dass sie wesentlich auf die so genannte „stochastische Physik“ zurückgehen, einen groben Ansatz zur Berücksichtigung der Modellunsicherheit, der in nächster Zeit durch einen theoretisch besser fundierten Ansatz ersetzt werden soll. Es bestehen somit Zweifel, ob diese Spitzenwerte wirklich im Rahmen der heutigen Modellunsicherheiten als möglich zu betrachten sind, oder ob sie ein artifizielles Resultat des groben Ansatzes darstellen. Daher wird empfohlen, die statistischen Auswertungen vor allem oder ausschließlich auf die Ergebnisse der Experimente mit Einbezug des LM zu stützen.

## Literaturverzeichnis

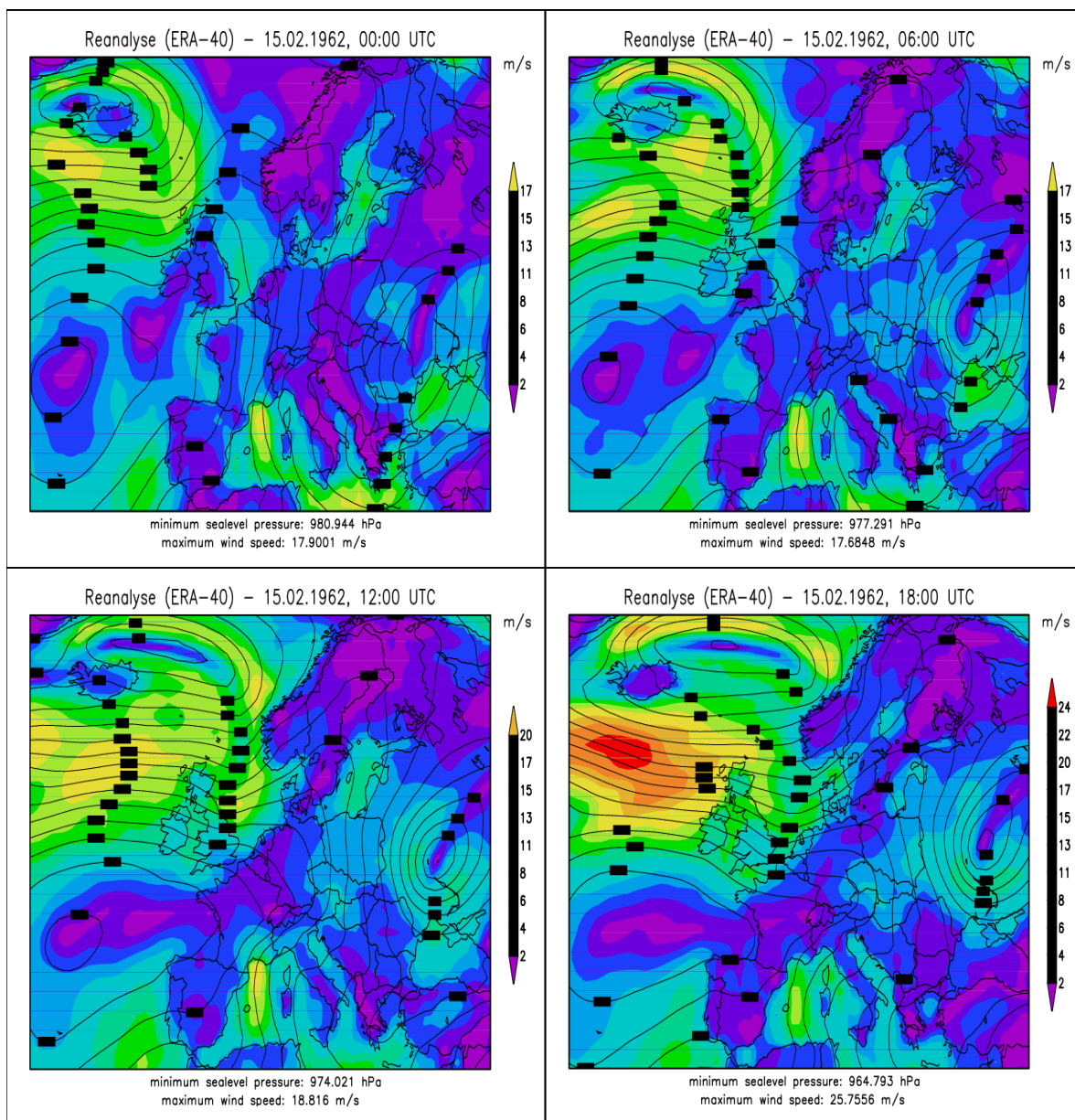
- Beljaars, A. (2004) *Persönliche Mitteilung*. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am EZMW in Reading.
- Buizza, R. und Chessa, P. (2002) Prediction of the U.S. storm of 24-26 January 2000 with the ECMWF Ensemble Prediction System. *Monthly Weather Review*, Vol. 130, 1531–1551 .
- Buizza, R., Miller, M., und Palmer, T. N. (1999) Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 125, 2887–2908 .
- Defant, F., Fechner, H., und Speth, P. (1972) Synoptik und Energetik der Hamburger Sturmflutwetterlage vom Februar 1962. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* , ISBN 3-88148-102-8.
- Dick, S. und Müller-Navarra, S. H. (2000) Die Sturmflut am 3. Dezember 1999 - Fallstudien mit dem Windstaumodell des BSH. Vortrag auf dem Sturmflut-Workshop der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).
- Doms, G., Steppeler, J., und Adrian, G. (2002) Das Lokal-Modell LM. *promet*, Vol. 27, Heft 3/4, 123–128 .
- DWD (2004a) *Global-Modell (GME)*. Deutscher Wetterdienst, <http://www.dwd.de/de/Funde/Analyse/Modellierung/model.htm>.
- DWD (2004b) *Lokal-Modell (LM)*. Deutscher Wetterdienst, <http://www.dwd.de/de/Funde/Analyse/Modellierung/lm.htm>.
- EZMW (2002a) *The ECMWF Global Atmospheric Model*. Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage, [http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/The\\_ECMWF\\_global\\_atmospheric\\_model.html](http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/The_ECMWF_global_atmospheric_model.html).
- EZMW (2002b) *The Ensemble Prediction System (EPS)*. Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage, [http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/The\\_Ensemble\\_Prediction\\_System\\_EPS.html](http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/The_Ensemble_Prediction_System_EPS.html).
- EZMW (2004) *The ECMWF Global Atmospheric Model*. Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage, <http://www.ecmwf.int/research/ifs>.
- Hewer, R. (1980) *Untersuchungen zur Entwicklung von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste auf der Basis hydrodynamisch-numerischer Modelle*. Diplomarbeit, Universität Hamburg.
- Majewski, D., Liermann, D., Prohl, P., Ritter, B., Buchhold, M., Hanisch, T., Paul, G., und Wergen, W. (2002) The Operational Global Icosahedral-Hexagonal Gridpoint Model GME: Description and High-Resolution Tests. *Monthly Weather Review*, Vol. 130, No. 2, 319–338 .
- Majewski, D. und Ritter, B. (2002) Das Global-Modell GME. *promet*, Vol. 27, Heft 3/4, 111–122 .
- Mullen, S. L. und Buizza, R. (2001) Quantitative precipitation forecasts over the United States by the ECMWF Ensemble Prediction System. *Monthly Weather Review*, Vol. 129, 638–663 .
- Müller-Navarra, S. H., Bork, I., Jensen, J., Koziar, C., Mudersbach, C., Müller, A., und Rudolph, E. (voraussichtlich 2005) Modellstudien zur Sturmflut und zum Hamburg-Orkan 1962. *HANSA, derzeit noch unveröffentlicht* .

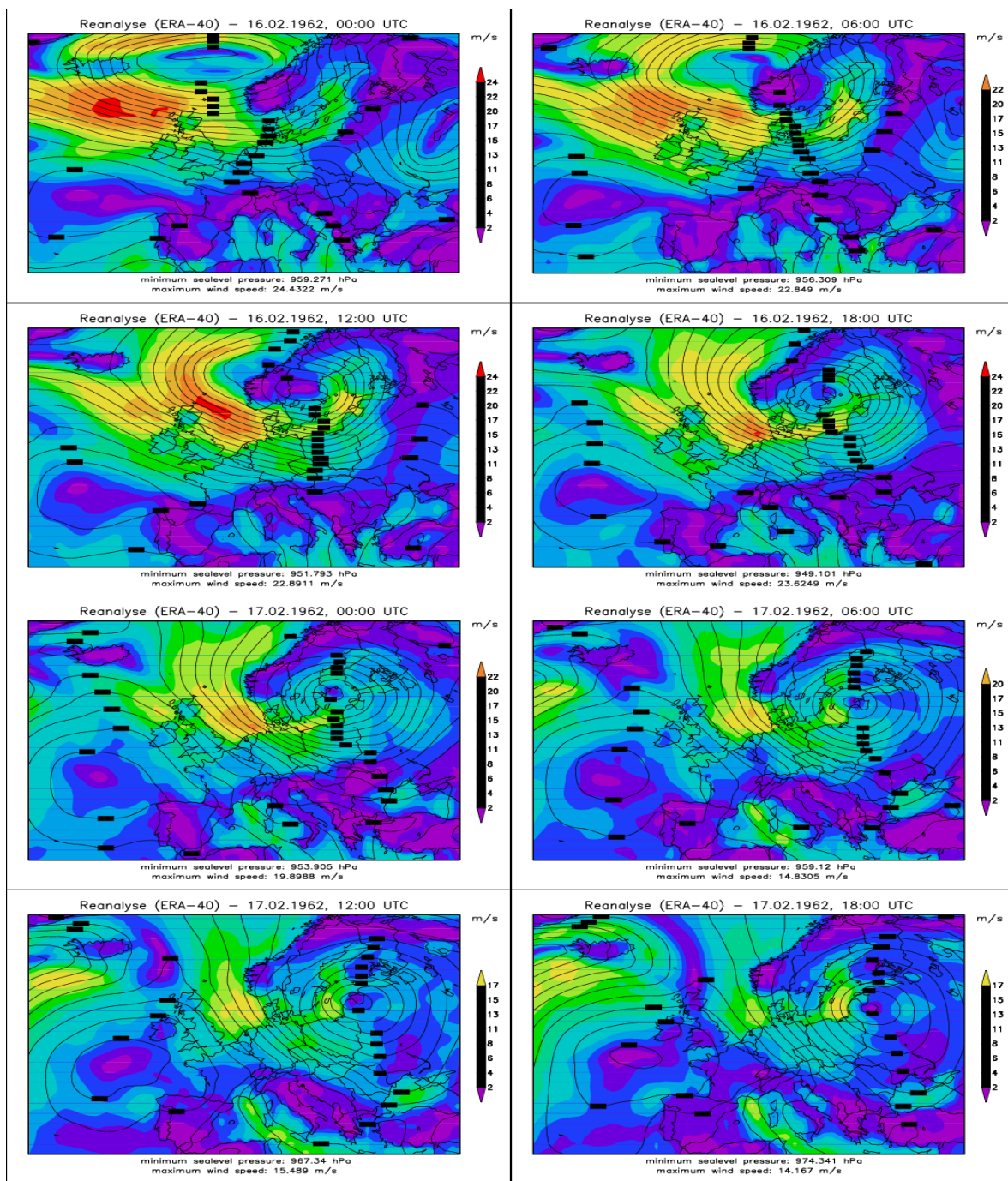
- NDR (2004) Dokumentation des Norddeutschen Rundfunks über die Sturmflutnacht vom 16./17. Februar 1962. ISBN 3-935157-51-7.
- Petersen, M. und Rhode, H. (1991) *Sturmflut. Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe*. Karl Wachholtz Verlag, Neumünster.
- Schättler, U. (2004) *Persönliche Mitteilungen*. Leitender Software-Architekt beim DWD.
- Schättler, U. und Doms, G. (1999) *The Interpolation Program - A User's Guide*. Consortium for Small-scale Modeling (COSMO), <http://www.cosmo-model.org/public/documentationVer1.htm>.
- Shutts, G. (2004) *A stochastic kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems*. Technical Memorandum Vol. 449, Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage, <http://www.ecmwf.int/publications/library/do/references/show?id=86416>.
- Stackpole, J. D. (1998) *The WMO format for the storage of weather information and the exchange of weather product messages in gridded binary form*. Automation Division, National Meteorological Center, National Weather Service, NOAA, <http://dss.ucar.edu/docs/formats/>.
- Wergen, W. (2002) Datenassimilation – ein Überblick. *promet*, Vol. 27, Heft 3/4, 142–149.



## A Reanalyse der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962

Um einen besseren Überblick über die Entwicklung der Wetterlage zu bekommen, wurden die für jeweils 00:00, 06:00, 12:00 und 18:00 UTC vorliegenden EZMW-Reanalysen vom 15. bis 17. Februar visualisiert. D.h., es wurden für die aus dem ERA-40-Projekt stammenden Felder des Horizontalwindes in 10m über Grund und des auf NN reduzierten Luftdruck Grafiken erstellt, die einen synoptischen Überblick über die Wetterlage vermitteln.

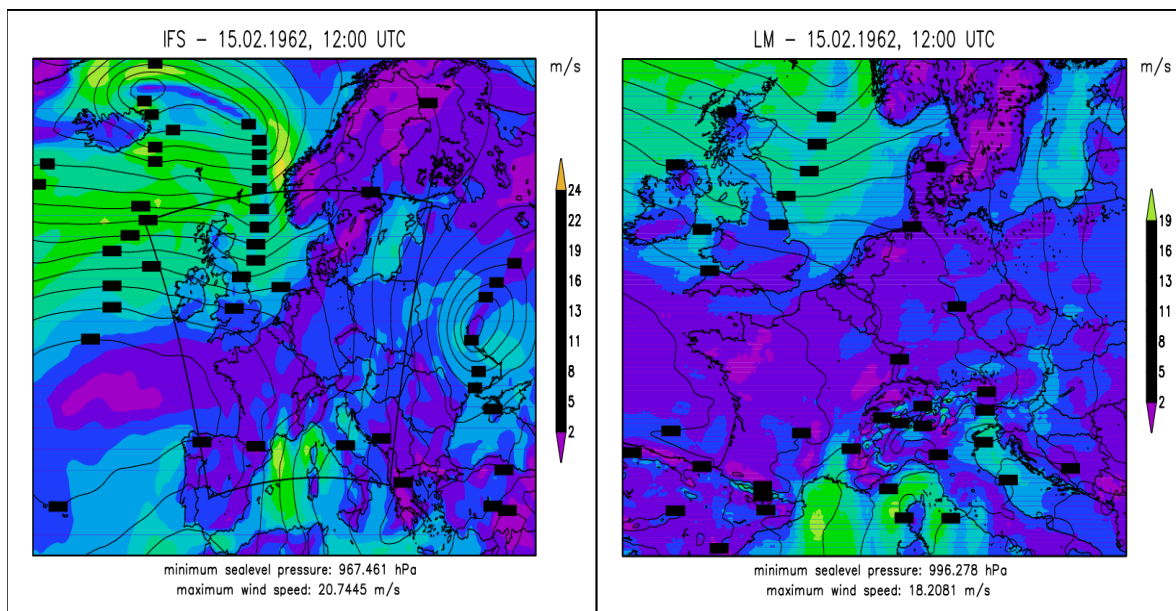




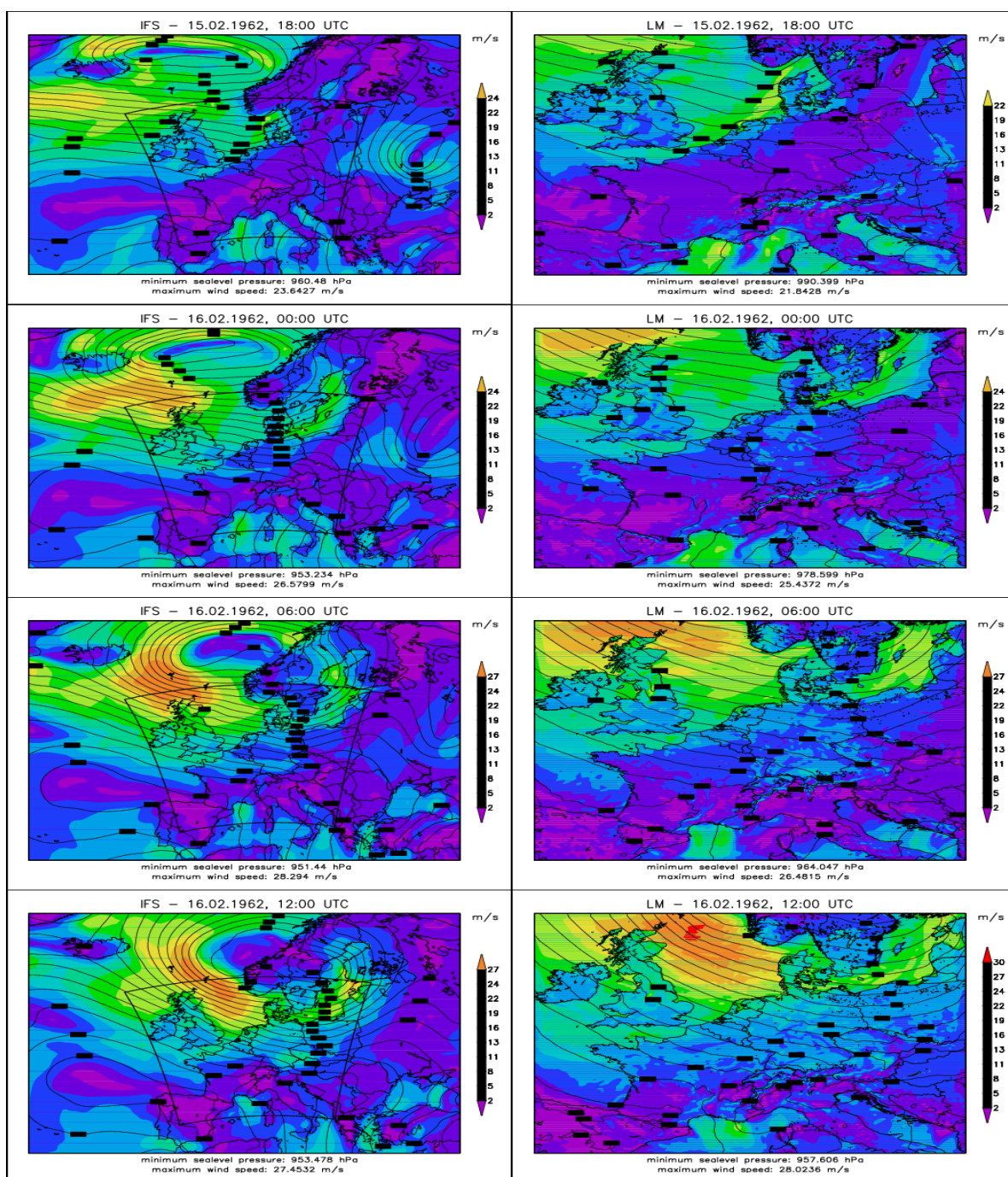
## B Synoptischer Vergleich von IFS und LM anhand von Member Nr. 26 des 62'er Super- Ensembles, Start: 15.02.1962, 12:00 UTC

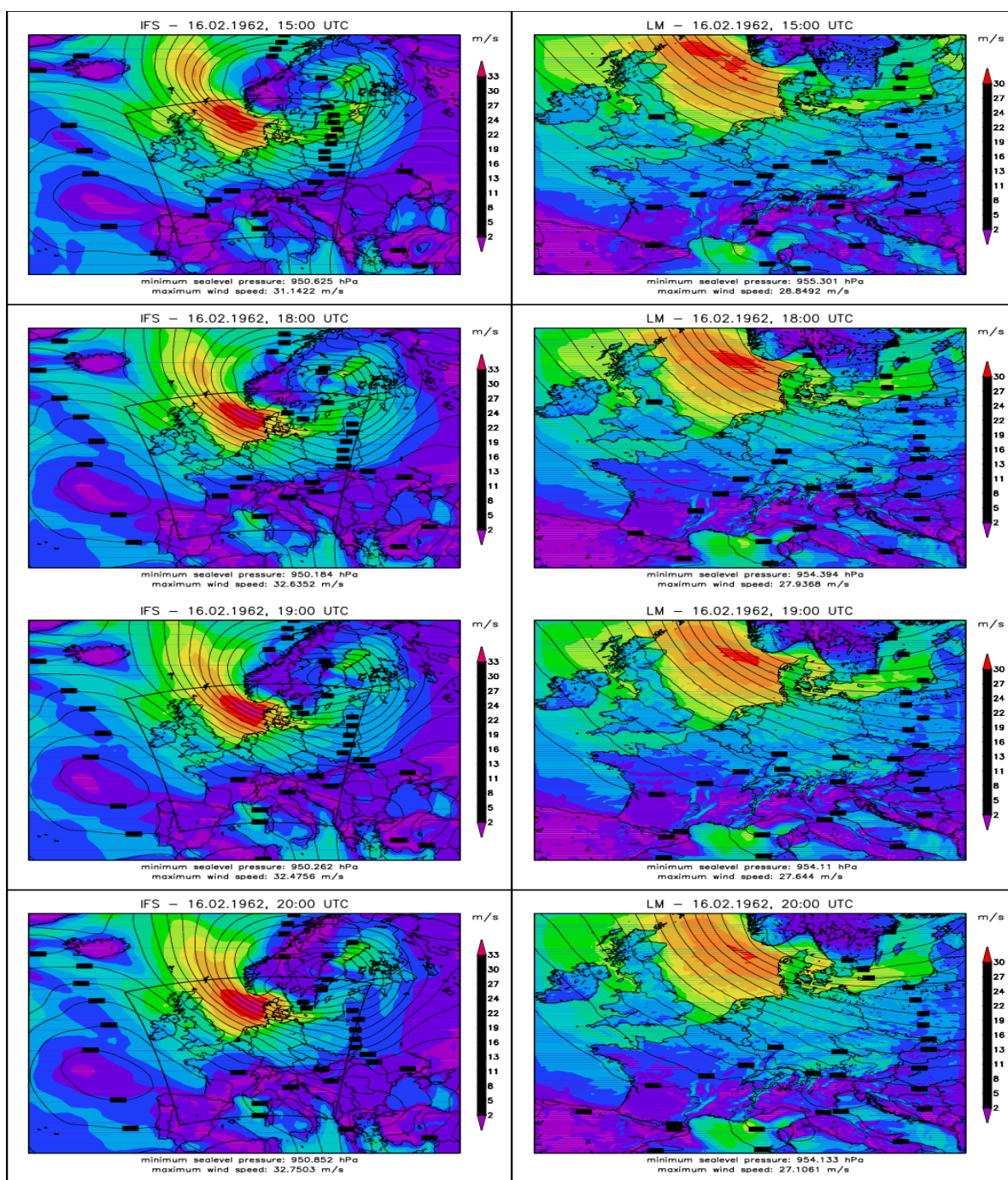
Die nachfolgenden Grafiken sollen einen synoptischen Einblick in das „Modellwetter“ von IFS und LM geben und ein Gefühl dafür vermitteln, wie die Windverhältnisse zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Deutschen Bucht mit Hilfe eines einzigen Parameters, nämlich des Effektivwindes, zusammengefasst werden. Für die Bilder wurden für ausgewählte Vorhersagezeiten die Modellfelder von Horizontalwind in 10 m über Grund und von auf NN reduziertem Luftdruck visualisiert. Die Isobaren sind beschriftet und beim Wind gilt für beide Modelle die gleiche Farbskala.

Bei den Abbildungen ist zu beachten, dass die dargestellten Gebiete beider Modelle sich sowohl hinsichtlich Größe und Lage, als auch hinsichtlich der Projektion unterscheiden. Um eine Orientierung zu geben, wurde in den Bildern des IFS das Modellgebiet des LM durch eine schwarze Linie veranschaulicht.

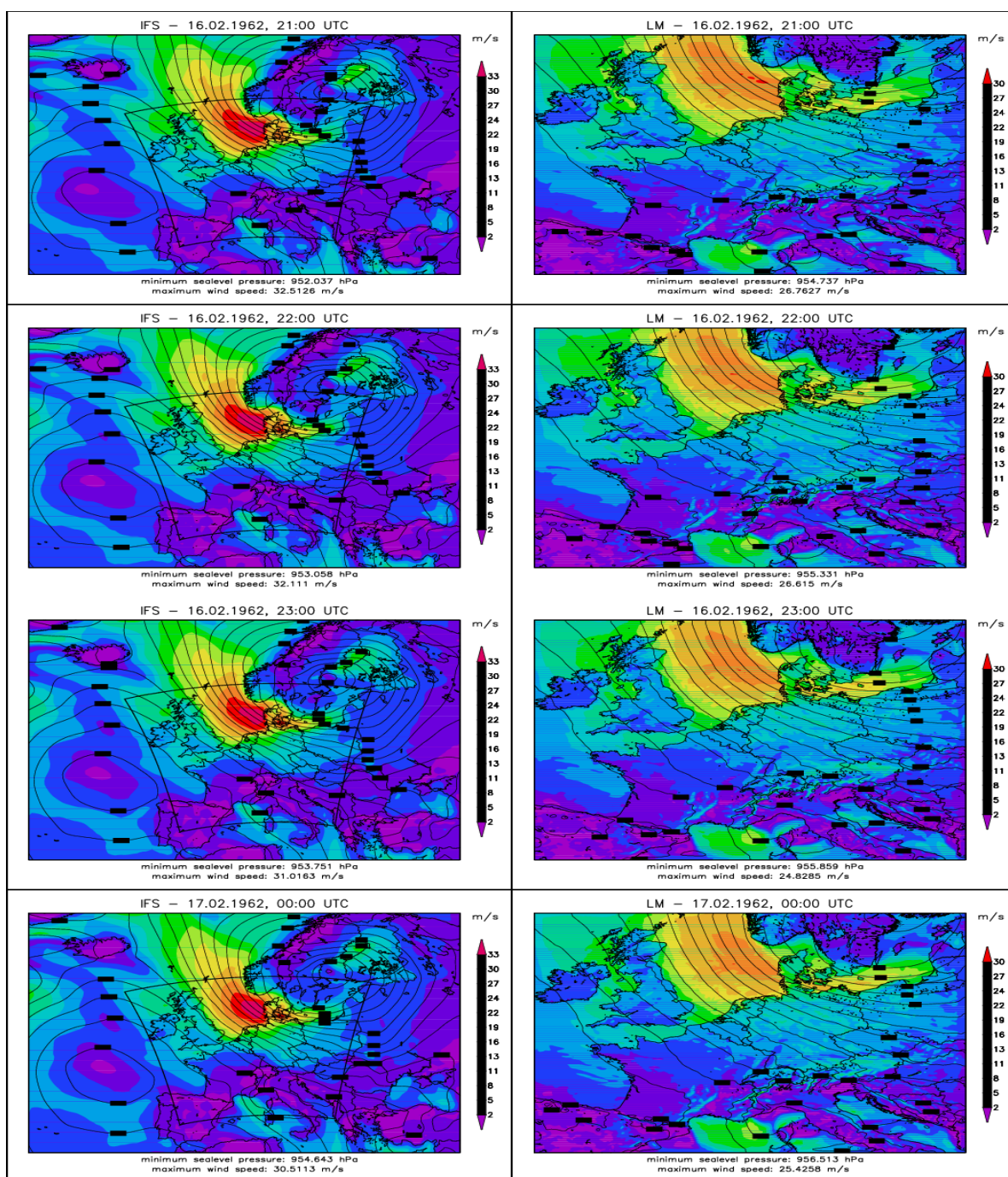


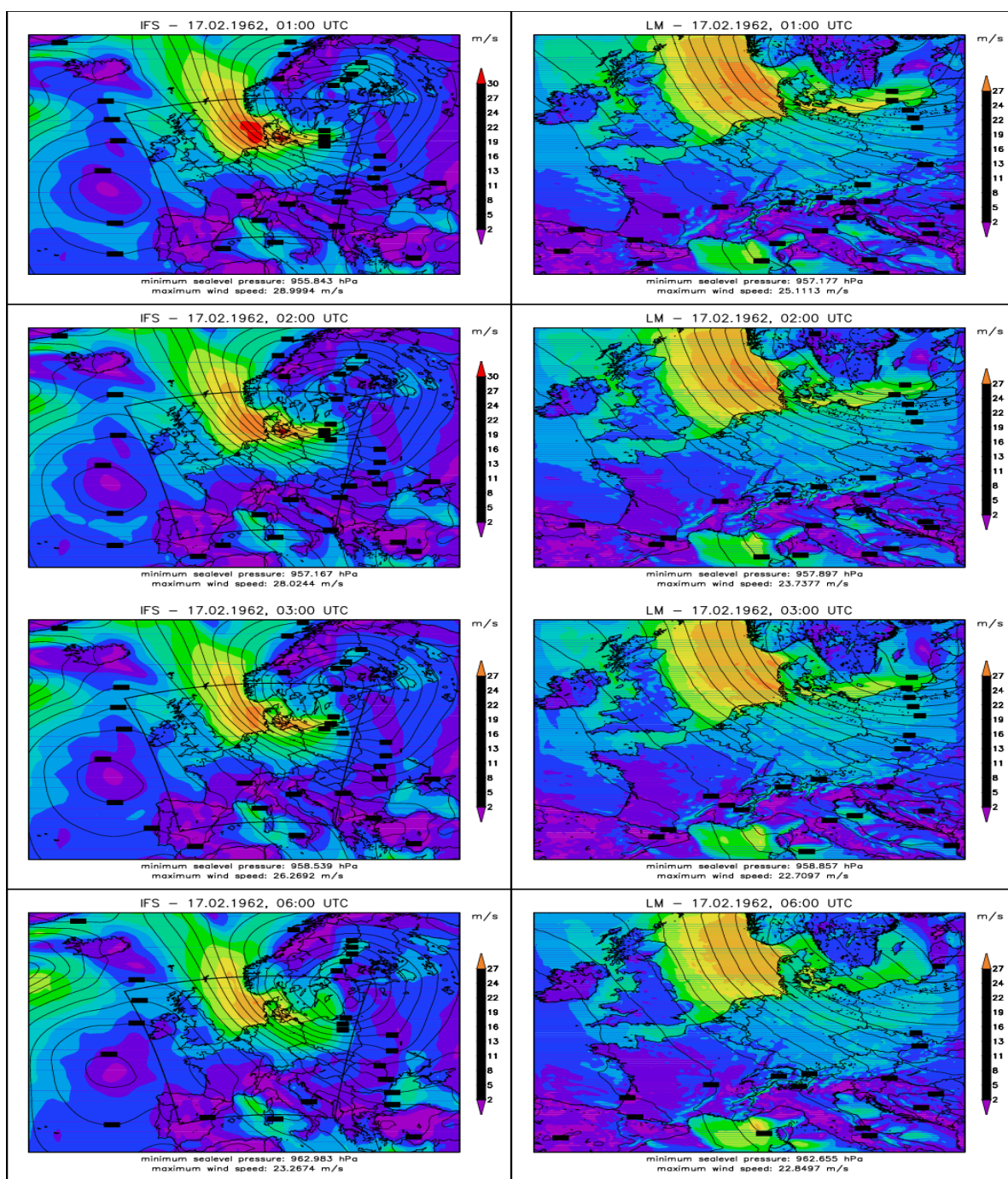


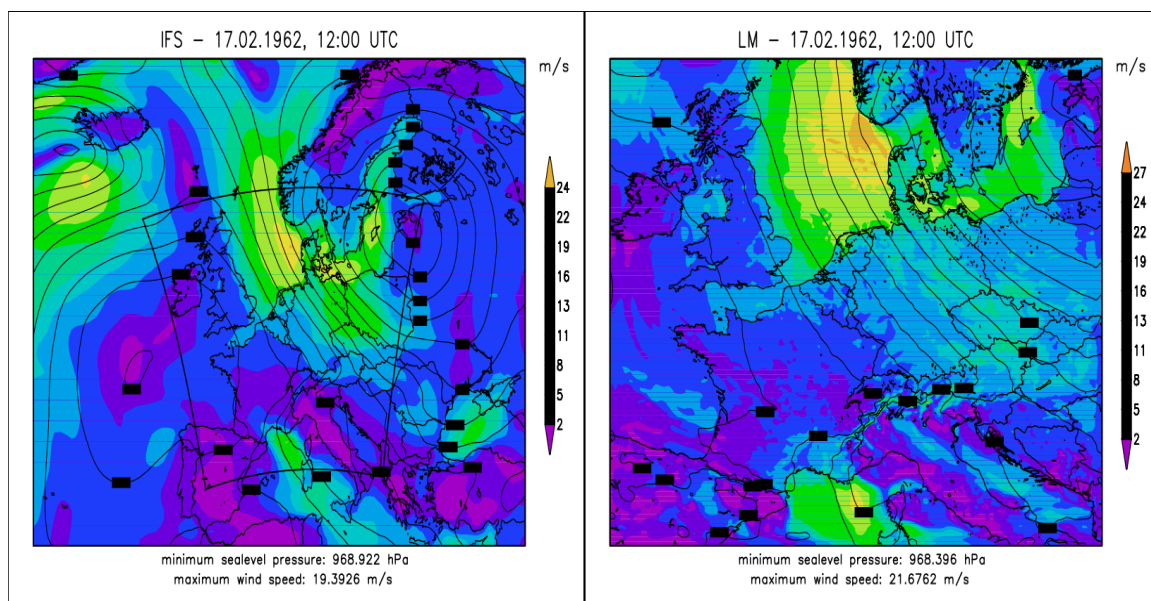
















## C Technische Dokumentation

Die nachfolgenden Ausführungen sind untergliedert nach Programmen und Skripten. Diese Aufteilung orientiert sich dabei an den in der Unix-Welt gängigen Begriffen.

Ein Programm ist demnach eine ausführbare Datei, die mit Hilfe eines Compilers aus einem in einer bestimmten Programmiersprache kodierten Quelltext erzeugt wird. Die nachfolgend beschriebenen Programme wurden allesamt mit Fortran und C/C++ erzeugt.

Skripte sind ausführbare Dateien, die im Gegensatz zu Programmen nicht durch Kompilation entstehen. Vielmehr handelt es sich dabei um in einer bestimmten Programmiersprache kodierten Quelltext, der direkt mit Hilfe eines Interpreters ausgeführt bzw. interpretiert wird. Die meisten der nachfolgend beschriebenen Skripte sind Korn-shell-Skripte.

### 7.1 Programme

#### Berechnung des Effektivwinds

In der öffentlichen Diskussion um Vorhersagemodelle wird häufig vernachlässigt, dass ein Wettervorhersagemodell zunächst nur den physikalischen Zustand der Atmosphäre simuliert und vorhersagt, nicht aber „das Wetter“. Für die Begutachtung einer modellierten Wetterlage müssen also zunächst die jeweils relevanten Daten aus den Modellausgaben extrahiert und in einem auswertbaren Format dargestellt werden. Die vom Modell berechneten Daten mit den Informationen über die simulierte Wetterlage liegen als Binärdateien im sog. GRIB-Format (**GR**idded **I**n **B**inary) vor. Nähere Informationen zu diesem vorwiegend für gitterbasierte Modelle verwendeten Format sind unter Stackpole zu finden.

Das Programm zur Berechnung des Effektivwinds hat den Namen „ss\_filter“ und wurde in C++ geschrieben. Für das Einlesen und Dekodieren der im GRIB-Format formatierten Input-Dateien wurde auf eine externe, in Fortran und C geschriebene Programmbibliothek zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um die vom DWD entwickelte und gepflegte „LIBDWD“. Dies ist ein Archiv, welches wiederum aus vielen verschiedenen Objektdateien besteht. Jede Objektdatei enthält eine oder mehrere Subroutinen, die für die Bearbeitung spezieller Aufgabenbereiche zuständig sind. Z.B. ist die Objektdatei „grbin1.o“ für das Zerlegen eines GRIB-kodierten Feldes in Kenndaten und Datensatz zuständig. Nähere Informationen zu den Subroutinen der LIBDWD sind der entsprechenden Dokumentation im DWD-Intranet zu entnehmen. „ss\_filter“ führt nacheinander die folgenden Arbeitsschritte durch:

1. Einlesen und Dekodieren der Input-Datei (GRIB-Format)
2. Berechnung des Effektivwinds für jeden Gitterpunkt innerhalb eines bestimmten geographischen Ausschnitts (begrenzt durch obere und unter geographische Breite sowie linke und rechte geographische Länge)
3. Mittelung der so berechneten Werte
4. Ausgabe des Mittelwertes auf dem Standardausgabekanal

Da eine GRIB-Datei aus mehreren Abschnitten, sog. Sektionen bestehen kann (z.B. können sämtliche 10m-Windfelder einer 96-stündigen Modellvorhersage in einer einzigen GRIB-Datei zusammengefasst sein), muss man den Output zeitlich zuordnen können. Deswegen gibt das Effektivwindprogramm pro u/v-Sektion einer GRIB-Datei eine Textzeile aus, welche typischerweise wie folgt aussieht:

„15.02.1962 13:00 6 hour(s) 6 3.31 6.08 237.95“

Am Anfang ist die zur GRIB-Sektion gehörende Zeit aufgeführt. Das darauf folgende Feld „0 hour(s)“ ist bei Analysen immer gleich Null. Nur für Vorhersagen erscheinen hier Werte größer Null. Sie geben die Vorhersagezeit an und sind zur vorangestellten Zeit des Vorhersagebeginns zu addieren, um die wirkliche Zeit zu bestimmen. Anschließend folgt die Anzahl der Gitterpunkte innerhalb des geographischen Teilgebiets.

Die letzten drei Real-Zahlen stellen den eigentlichen Programoutput dar: „3.31 6.08 237.95“ bedeutet demnach, dass der 10m-Horizontalwind mit 6,08 m/s aus Richtung 237,9517 kam, was einem Effektivwind von 3,31 m/s entspricht.

### Zusammenfassen einzelner GRIB-Dateien

Die IFS-Daten werden mit Hilfe eines Kornshell-Skripts aus der EZMW-Datenbank geholt. Es werden dazu 3 Datenbankaufräge für Einsichtenfelder und 1 Auftrag für alle erforderlichen Mehrschichtenfelder abgeschickt. Im Ergebnis liegen für jeden Termin 4 Dateien vor. Diese werden vor der Interpolation zu jeweils einer Datei zusammengefasst und entsprechend den Spezifikationen des Interpolationsprogramms benannt. Dafür kommt das Programm „mergegrib“ zum Einsatz.

Die genaue Syntax eines Aufrufs ist im Programm Quelltext selber ausführlich beschrieben.

### Interpolation von IFS- auf LM-Koordinaten

Der IFS-Output kann vom LM nicht direkt verarbeitet werden. Zuvor muss eine Interpolation vom IFS- auf das LM-Modellgitter stattfinden. Dies wurde mit Hilfe des Programmpakets „int2lm“ erledigt. Die Konfiguration erfolgt über eine ASCII-Datei namens „INPUT“. Die genaue Formatierung geht aus dem Quelltext des Programms hervor, deshalb werden in der folgenden Tabelle nur die wichtigsten Parameter beschrieben [Sch@dq @prtctattler]:

#### Angaben zum LM-Gitter (LMGRID-Section)

|              |                                                |
|--------------|------------------------------------------------|
| ielm_tot     | Anzahl der Gitterpunkte in x-Richtung          |
| jelm_tot     | Anzahl der Gitterpunkte in y-Richtung          |
| kelm_tot     | Anzahl der Gitterpunkte in z-Richtung          |
| pollat       | geogr. Breite des rotierten Nordpols           |
| pollon       | geogr. Länge des rotierten Nordpols            |
| dlon         | Differenz (Länge) zwischen zwei Gitterpunkten  |
| dlat         | Differenz (Breite) zwischen zwei Gitterpunkten |
| startlat_tot | geogr. Breite der linken unteren Ecke          |
| startlon_tot | geogr. Länge der linken unteren Ecke           |

#### Angaben zum IFS-Gitter (GRID\_IN-Section)

|             |                                       |
|-------------|---------------------------------------|
| ni_gme      | Maschenweite                          |
| i3e_gme     | Anzahl der Schichten                  |
| kcontrol_fi | Nummer der Kontrollschicht            |
| ie_in_tot   | Anzahl der Gitterpunkte in x-Richtung |
| je_in_tot   | Anzahl der Gitterpunkte in y-Richtung |
| ke_in_tot   | Anzahl der Gitterpunkte in z-Richtung |
| pcontrol_fi | Höhe der Kontrollschicht [hPa]        |

|                                                  |                                                                              |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| startlat_in_tot                                  | geogr. Breite der linken unteren Ecke                                        |
| startlon_in_tot                                  | geogr. Länge der linken unteren Ecke                                         |
| pollat_in                                        | geogr. Breite des (rotierten) Nordpols                                       |
| pollon_in                                        | geogr. Länge des (rotierten) Nordpols                                        |
| dlat_in                                          | Differenz (Länge) zwischen zwei Gitterpunkten                                |
| dlon_in                                          | Differenz (Breite) zwischen zwei Gitterpunkten                               |
| <b>Allgemeine Angaben (CONTRL-Section)</b>       |                                                                              |
| ydate_ini                                        | Startzeitpunkt der Vorhersage                                                |
| hstart                                           | Zeitdifferenz zwischen ydate_ini und erster zu interpolierender Datei        |
| hstop                                            | Zeitdifferenz zwischen ydate_ini und letzter zu interpolierender Datei       |
| hincbound                                        | Zeitdifferenz zwischen 2 zu interpolierenden Dateien                         |
| linitial                                         | Interpolation des Anfangszustandes                                           |
| lboundaries                                      | Interpolation der Randdaten                                                  |
| lec2lm                                           | zu interpolierende Dateien stammen vom IFS                                   |
| nprocx                                           | nur für parallelisierte Programmversion:<br>Anzahl Prozessoren in x-Richtung |
| nprocy                                           | nur für parallelisierte Programmversion:<br>Anzahl Prozessoren in y-Richtung |
| <b>Weitere allgemeine Angaben (DATA-Section)</b> |                                                                              |
| yinext_lfn                                       | Name der Datei mit externen Parametern des Input-Modells                     |
| ylmext_lfn                                       | Name der Datei mit externen Parametern des LM                                |
| y*_cat                                           | Pfadnamen zu Input- und Output-Dateien                                       |

## 7.2 Skripte

Im Prinzip ist jedes der oben aufgeführten Programme in einem oder mehreren Skripten eingebettet. Das bedeutet, dass der Aufruf von einem Skript aus erfolgt, welches selbst wiederum innerhalb eines weiteren Skripts aufgerufen werden kann. Durch diese Kaskadierung kann das Programm bzw. das einzelne Skript Teilaufgaben kapseln und so insgesamt zur Übersichtlichkeit beitragen.

Eine bestimmte Aufgabe kann interaktiv oder als Batchjob abgearbeitet werden. Ein Batchjob läuft während der Ausführung unter der Kontrolle des Batchsystems (Betriebssystemabhängig, bei IBM: „Loadleveler“), was den Vorteil hat, dass der Besitzer sich nicht jederzeit um die Verwaltung seines Jobs zu kümmern braucht. Im einfachsten Fall wird ein Skript zum Batchjob, indem man es nicht interaktiv aufruft, sondern die entsprechende Skriptdatei an das Batchsystem übergibt: „./script1.sh“ wird auf der IBM durch „lsubmit myScript.sh“ vom interaktiven Job zum Batchjob, vorausgesetzt, es hält sich an die Syntax eines Batchjobs.

Eine Beschreibung jedes verwendeten Skripts kann an dieser Stelle entfallen, da jedes Skript durch leicht verständliche Kommentare im Skripttext selbst angemessen beschrieben ist.

## 7.3 Praktischer Ablauf eines

### EPS/LM-Experiments

Experimente mit dem am EZMW entwickelten EPS sind hinsichtlich verbrauchter Rechenzeit und produzierter Datenmengen überaus anspruchsvoll. Zwar wurde für die EPS-Experimente eine IFS-Konfiguration mit einer im Vergleich zur deterministischen Standard-Vorhersage reduzierten räumlichen Auflösung gewählt. Dafür jedoch umfasst jede EPS-Vorhersage jeweils 51 einzelne IFS-Vorhersagen (50 Ensemble-Member + 1 Control Forecast). So erklärt es sich, dass über die Projektlaufzeit hinweg immerhin ca. 350000 System Billing Units (SBUs) für Modellexperimente verbraucht wurden. Diese Kenngröße ist die am EZMW gebräuchliche Einheit, um die Nutzung von Systemressourcen zu überwachen. Sie ergibt sich durch Multiplikation eines systemabhängigen Faktors mit der total CPU time (für serielle Jobs) bzw. mit der realtime eines Jobs multipliziert mit der Anzahl der verwendeten CPU's (für parallele Jobs). Zum Vergleich: Für das Jahr 2003 stand dem DWD am EZMW ein Rechenzeitkontingent von 3040 kilo-SBUs zu, für das Jahr 2004 waren es 6440 kilo-SBUs.

Den meisten des im Rahmen des Projektes durchgeführten Modellsimulationen lag die IFS-Version „CY26r1“ zugrunde. So wurden alle EPS-Experimente samt zugehöriger IFS-Simulationen mit dieser Version durchgeführt. Lediglich einige separate Fallstudien wurden mit der neueren Version „CY28r1“ realisiert.

Durch Verwendung so genannter Muster-Experimente vereinfacht sich die Konfiguration neuer Experimente erheblich. Hat man einmal ein Experiment erfolgreich durchgerechnet, kann man es für alle nachfolgenden, gleichartigen Experimente als Ausgangsbasis verwenden. Das typische Vorgehen für ein neues EPS-Experiment gestaltet sich dadurch wie folgt:

1. PrepIFS via Java-Webstart vom Internet-Browser aus starten und am System anmelden
2. EPS-Musterexperiment aussuchen und kopieren (z.B. User-ID 'dfo', Experiment-ID 'b036')
3. Experimentbeschreibung anpassen
4. Startdatum, Stopdatum und Startintervall ändern; dabei muss die Berechnung der Singular Vectors aufgrund des Evolution-Mechanismus 48 Stunden vor dem eigentlichen Modellstart erfolgen
5. Experiment abschieken ('submit')
6. Ablauf des Experiments mit Hilfe von 'XCDP' überwachen; Programmstart auf der Kommandozeile mit „xcdp“ (\$DISPLAY muss richtig initialisiert sein bzw. „ssh -X“, bei Fehler mit Nils Wedi (Nils.Wediecmwf.int) in Verbindung setzen)
7. 10m-Wind aus dem Datenarchiv 'mars' extrahieren und mit Hilfe des Programms zur Berechnung des Effektivwinds klassifizieren
8. extremste Member identifizieren
9. gestörten Anfangszustand der ausgewählten Member im ECFS speichern („rerun“ der entsprechend angepassten Task-Skripts unter PrepIFS)
10. IFS-Musterexperiment aussuchen und kopieren (z.B. User-ID 'dfo', Experiment-ID 'b03b')
11. Experimentbeschreibung anpassen
12. Startzeit und Vorhersagelänge anpassen
13. 'INIPATH' auf ECFS-Pfad der Datei mit gestörtem Anfangszustand setzen
14. NAMESPACE-Erweiterung 'NENSFNB' auf Nummer des Member setzen

15. Experiment abschicken und mit „XCDP“ überwachen
16. vom LM benötigte Parameter auf den DWD-Routineserver transferieren ('getIfsAnalysisData4LM.sh' + 'getIfsForecastData4LM.sh'), zusammenfassen ('mergegrib') und im ECFS speichern
17. DWD-Experimentiersystem „MOX“ starten und LM-Musterexperiment aussuchen und kopieren (z.B. User-ID 'ckoziar', Experiment-ID '4542')
18. LM-Datenbankumgebung erzeugen („EXP\_CR\_ENV“ = 1)
19. Interpolation auf dem DWD-Computeserver ('int2lm')
20. interpolierte Daten in Experimentdatenbank einbringen ('data2db.sh')
21. Experiment starten und überwachen
22. relevante Randdaten vom IFS bzw. LM zum BSH transferieren ('transfer\_IFS+LM.sh')

## D Kurzbeschreibung aller MUSE-Modellexperimente

Die nachfolgenden Tabellen sollen eine Übersicht über alle durchgeführten MUSE-Modellexperimente geben. Dabei sind ausschließlich Experimente mit EPS, IFS und LM aufgeführt. Für die Verwendung der beschriebenen Experimente als Vorlage für weitere Experimente ist zu beachten, dass sämtliche Experimente unter der User-ID 'dfo' (EZMW) bzw. 'ckoziar' (DWD) ausgeführt wurden. Unter 'PrepIFS' erfolgt die Erstellung eines neuen Experiments auf Basis eines alten durch Auswahl des Menüpunktes 'Copy whole experiment' - 'Create a new experiment id' im Popup Menü 'des 'Cycle folders' (rechte Maustaste über dem Symbol mit der Experiment-ID). Unter 'MOX' kann man beim Erzeugen eines neuen Experiments analog zu 'PrepIFS' ein sog. Musterexperiment angeben.

Die Tabellen enthalten in der ersten Spalte die EZMW-Experiment-ID, in der zweiten Spalte die unter dem Menüpunkt 'Description' in 'PrepIFS' aufgeführte Kurzbeschreibung des Experiments. In der dritten Spalte befindet sich eine detaillierte Beschreibung der wesentlichen Experiment-Merkmale. Es wurden nicht für alle IFS-Modellläufe auch LM-Experimente durchgeführt. Vor allem zu Beginn der Experimentierphase wurden zahlreiche EPS- und IFS-Modellexperimente ohne nachgeschaltetes LM gemacht, um zunächst den ersten Teil der Modellkette zu testen. Für diejenigen LM-Läufe, die mit IFS-Randsteuerung gemacht wurden, sind die zugehörigen Experiment-ID's in der dritten Spalte mit aufgeführt.

| ID   | Description                                                                 | Comments                                                                                                                                                                                    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| b00j | "EPS_MUSE_1st_Test<br>_1800sec_Timestep" (Case-Study<br>for 26th Oct. 2002) | 1st EPS-Experiment with 1800 sec<br>Timestep, Starttime: 2002102412,<br>Forecast-Length: 84 h, Member:<br>only No. 49, Initial conditions: SV<br>from routine, scaled with<br>EPSNORM (1.6) |
| b00k | "IFS_MUSE_1st_Test<br>_1800sec_Timestep" (Case-Study<br>for 26th Oct. 2002) | 1st IFS-Experiment with 1800 sec<br>Timestep, Starttime: 2002102412,<br>Forecast-Length: 84 h, Initial<br>conditions: same perturbed state as<br>in experiment "b00j"                       |



| ID   | Description                                                                              | Comments                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| b00l | “EPS_MUSE_2nd_Test_3600sec_Timestep” (Case-Study for 26th Oct. 2002)                     | 2nd EPS-Experiment with 3600 sec Timestep, Starttime: 2002102412, Forecast-Length: 84 h, Member: only No. 49, Initial conditions: SV from routine, scaled with EPSNORM (1.6)                                                                                                                                    |
| b00m | “EPS_MUSE_2nd_Test_3600sec_Timestep” (Case-Study for 26th Oct. 2002)                     | 2nd EPS-Experiment with 3600 sec Timestep, Starttime: 2002102412, Forecast-Length: 84 h, Initial conditions: same perturbed state as in experiment „b00l“                                                                                                                                                       |
| b00n | “EPS_MUSE_3rd_Test_3600sec_Timestep - StochasticPhysics” (Case-Study for 26th Oct. 2002) | 3rd EPS-Experiment with 3600 sec Timestep, Starttime: 2002102412, Forecast-Length: 84 h, Member: only No. 49, Initial conditions: SV from routine, scaled with EPSNORM (1.6), without stochastic physics                                                                                                        |
| b00o | “EPS_MUSE_4th_Test_3600sec_Timestep_RNORM=2.0” (Case-Study for 26th Oct. 2002)           | 4th EPS-Experiment with 3600 sec Timestep, Starttime: 2002102412, Forecast-Length: 84 h, Member: only No. 49, Initial conditions: SV from routine, scaled with EPSNORM (2.0 ! )                                                                                                                                 |
| b00p | “EPS_MUSE_5th_Test_1800sec_Timestep StochPhysOut” (Case-Study for 26th Oct. 2002)        | 5th EPS-Experiment with 1800 sec Timestep, Starttime: 2002102412, Forecast-Length: 84 h, Member: only No. 49, Initial conditions: SV from routine, scaled with EPSNORM (1.6), without stochastic physics                                                                                                        |
| b00q | “MUSE_WholeEnsemble _Anatol”                                                             | 1st Anatol-EPS-Experiment with calculation of whole Ensemble (50 members + 1 control forecast), Starttime: 1999120112, Forecast-Length: 84 h, Initial conditions: SV's from routine, scaled with EPSNORM (1.6), ® aborted because of postprocessing of fields on model levels (claim of disk overcharged! ! ! ) |
| b00r | “MUSE_WholeEnsemble _Anatol_2”                                                           | 2nd Anatol-EPS-Experiment with calculation of whole Ensemble (50 members + 1 control forecast), Starttime: 1999120112, Forecast-Length: 84 h, Initial conditions: SV's from routine, scaled with EPSNORM (1.6), postprocessing ONLY at surface and pressure levels                                              |
| b00s | “IFS_MUSE_Anatol1”                                                                       | 1st Anatol-IFS-Experiment with 3600 sec Timestep, Starttime: 1999120112, Forecast-Length: 84 h, Initial conditions: perturbed state from experiment “b00r”, Member No. 2                                                                                                                                        |
| b00t | “IFS_MUSE_Anatol2”                                                                       | re-run of “b00s” because the results of “b00s” doesn't match with my expectations - but the unexpected results of “b00s” was confirmed by “b00t”...                                                                                                                                                             |

| ID   | Description                       | Comments                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| b00u | “IFS_MUSE_Anatol3”                | same configuration as “b00s” / “b00t” but with stochastic physics (LSTOPH=true)! BUT: The system don’t want to fullfill the laws of physic ...                                                                                                                                                                                     |
| b00v | “MUSE_WholeEnsemble_Anatol_3”     | re-run of “b00r” because of mysterious differences between EPS-forecast and IFS-forecast in case of “b00r” and “b00u”, but EPSNORM = 2.0 ! ! ! )                                                                                                                                                                                   |
| b00w |                                   | deleted before execution because of some config-errors                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| b00x | “IFS_MUSE_Anatol4”                | same configuration as “b00u”                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| b00y | “IFS_MUSE_Anatol5”                | copy of “IFS_MUSE_Anatol4” but with LSTOPH=false                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| b018 | “MUSE_WholeEnsemble_2003010712”   | whole ensemble for start date 07.01.2003, 12:00 UTC to verify impossible reproduction of single members resp. to detect only a moving of the critical member (v_eff_max at 17.01.2003, 06:00, no. 3 (22.76))                                                                                                                       |
| b019 | “IFS_MUSE_20030117”               | Single run of IFS with initialdata of member no. 3 + stochastic physics, archive with 1-hour-interval                                                                                                                                                                                                                              |
| b01b | “MUSE_Reproduction_Verification1” | EPS-forecast, configuration like b00n; only member 49, without stochastic physics                                                                                                                                                                                                                                                  |
| b01c | “MUSE_Reproduction_Verification2” | IFS-forecast with initial conditions from b01b, member 49; configuration like b00m (without stochastic physics)                                                                                                                                                                                                                    |
| b01e | “MUSE_Reproduction_Verification3” | copy of b01b, BUT with stochastic physics                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| b01f | “MUSE_Reproduction_Verification4” | copy of b01c, BUT with stochastic physics                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| b01h | “MUSE_CompleteEPS_Anatol_4”       | 4th Anatol-EPS-Experiment with calculation of whole Ensemble (50 members + 1 control forecast), Starttime: 1999120112, Forecast-Length: 84 h, Initial conditions: SV’s from routine, scaled with EPSNORM (1.6), postprocessing ONLY at surface levels, stochastic physics: OFF ! ! ! (to make possible it’s reproduction with IFS) |
| b01i | “MUSE_1stRealRepro duction”       | single IFS forecast for member no. 2 of “b01h”, hourly archiving on model-, pressure- & sfc-levels                                                                                                                                                                                                                                 |
| b01j | “MUSE_Reproduction_Verification5” | copy of “b01f”, BUT calculation of radiation only every 3 hours for the first 12 hours (LERAD1H=false)                                                                                                                                                                                                                             |
| b01k | “MUSE_Reproduction_Verification6” | copy of “b01j”, BUT without Rayleigh friction (LRFRIC=OFF)                                                                                                                                                                                                                                                                         |

| ID   | Description                       | Comments                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| b01l | "MUSE_Reproduction_Verification7" | copy of "b01j", BUT with extended namelist: "FORMAT" :<br>FortranFormat<br>"Filename": ifsnam<br>"Namelist": NAMGRIB<br>"Variable": NENSFNB<br>"Value" : 49                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| b01m | "MUSE_EPS_1999120112"             | EPS-forecast (complete ensemble);<br>Starttime: 1999120112, Forecast-<br>Length: 84 h, Timestep: 3600 sec,<br>postprocessing-interval: 1h,<br>archiving ONLY at surface levels,<br>Initial conditions: SV's from<br>routine, scaled with EPSNORM<br>(1.6), Clearcase view:<br>view_dfo_CY26R1_muse,<br>Stochastic perturbations on physics:<br>ON                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| b01n | "MUSE_IFS_1999120112"             | IFS-forecast; Initial data: from<br>perturbed member no. 2 from<br>experiment "b01m", Starttime:<br>1999120112, Forecast-Length: 84 h,<br>Timestep: 3600 sec, postprocessing-<br>interval: 1h, archiving at surface-,<br>pressure-, and model-levels, with<br>Stochastic perturbations on physics<br>(LSTOPH=ON), Radiation<br>computations interval = 3h for<br>complete simulation time<br>(LERAD1H=OFF), without<br>Rayleigh friction in zonal wind<br>(LRFRIC=OFF), with extension of<br>namelist:<br>"FORMAT" : FortranFormat<br>"Filename": ifsnam<br>"Namelist": NAMGRIB<br>"Variable": NENSFNB<br>"Value" : 49 |
| b01o | "MUSE_IFS_1999120112_b"           | IFS-forecast; copy of "b01n", but<br>with LRFRIC=ON !!! ® "b01n"<br>and "b01o" are resulting in identical<br>values of effective wind!                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| b01p | "MUSE_IFS_1999120112_c"           | IFS-forecast; copy of "b01n", but<br>now with the right value of variable<br>"NENSFNB" in the namelist:<br>"FORMAT" : FortranFormat<br>"Filename": ifsnam<br>"Namelist": NAMGRIB<br>"Variable": NENSFNB<br>"Value" : 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| b01q | "MUSE_IFS_1999120112_d"           | IFS-forecast; copy of "b01p", but<br>now additionally with archiving of<br>clwc/ciwc/cc at gaussian grid (cloud<br>liquid water content, cloud ice water<br>content, and cloud cover)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

| ID   | Description                                                                | Comments                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| b01r | "MUSE_IFS_1999120112_e"                                                    | IFS-forecast; copy of "b01q", but now archiving of clwc/ciwc/cc at spherical harmonics (cloud liquid water content, cloud ice water content, and cloud cover); belonging LM-experiment: 4423                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| b01t | "Reanalysis_SS_February62_eps_sv"<br><br>"Reanalysis_SS_February62_eps_fc" | EPS-calculation of singular vectors; calculated from 1962020912 to 1962021512 every 12 hours, based on the Reanalysis-Experiment "e984" from Ernst Klinker; EPS-forecast; simulations started every 12 hours, 1st start: 1962021112, last start: 1962021512 (the time lag of 48 h between EPS_SV and EPS_FC is necessary because of the Singular-Vector-Evolution-Mechanism in EPS)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| b01w | "MUSE_IFS_1962021500_c"                                                    | IFS-forecast; Initial data: from perturbed member no. 37 from experiment "b01t" (INIPATH = /xde/public/b01t/1962021500/inidata_muse_37.tar), Starttime: 1962021500, Forecast-Length: 96 h, Timestep: 3600 sec, postprocessing-interval: 1h, archiving at surface-, pressure-, and model-levels, with Stochastic perturbations on physics (LSTOPH=ON), Radiation computations interval = 3h for complete simulation time (LERAD1H=OFF), without Rayleigh friction in zonal wind (LRFRIC=OFF), with extension of namelist:<br>"FORMAT" : FortranFormat<br>"Filename": ifsnam<br>"Namelist": NAMGRIB<br>"Variable": NENSFNB<br>"Value" : 37<br>successful archiving is only possible with modifications in clearcase for the routines "sugrib.F90" and "sufpgrib.F90" (otherwise experiment fails due to wrong grib headers); to base an PrepIFS-experiment on a modified clearcase branch it's necessary to specify the name of the branch: (BRANCH = dfo_CY26R1_muse1)<br>belonging LM-experiment: (4500 - 1st use of a wrong NENSFNB) + 4542 |
| b020 | "MUSE_IFS_1962021500_d"                                                    | IFS-forecast; copy of "b01w", but for member no. 30, i.e.: INIPATH = /xde/public/b01t/-1962021500/inidata_muse_30.tar, NENSFNB = 30<br>belonging LM-experiment: 4545                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

| ID   | Description                                                              | Comments                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| b024 | “MUSE_IFS_1962021500_e”                                                  | IFS-forecast; copy of “b01w”, but for member no. 8, i.e.: INIPATH = /xde/public/b01t/-1962021500/inidata_muse_8.tar, NENSFNB = 8<br>belonging LM-experiment: 4546 (standard), 4604 (LM with IFS-orography) + 4605 (LM with old TKE scheme: itype_turb = 1, itype_tran = 1)                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| b028 | “MUSE_IFS_1962021512_a”                                                  | IFS-forecast; copy of “b024”, but for startdate “1962021512” + member no. 26, i.e.: INIPATH = /xde/public/b01t/1962021512/inidata_muse_26.tar, NENSFNB = 26<br>belonging LM-experiment: 4600                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| b029 | “MUSE_IFS_1962021512_b”                                                  | IFS-forecast; copy of “b028”, but for member no. 50, i.e.: INIPATH = /xde/public/b01t/-1962021512/inidata_muse_50.tar, NENSFNB = 50<br>belonging LM-experiment: 4601                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| b026 | “Reanalysis_SS_January76_eps_sv”<br><br>“Reanalysis_SS_January76_eps_fc” | EPS-calculation of singular vectors; calculated from 1975122812 to 1976010300 every 12 hours, based on the ERA-40;<br>EPS-forecast; simulations started every 12 hours, 1st start: 1975123012, last start: 1976010300 (the time lag of 48 h between EPS_SV and EPS_FC is necessary because of the Singular-Vector-Evolution-Mechanism in EPS)                                                                                                                                                                                                                       |
| b02a | “MUSE_IFS_1975123100_39”                                                 | IFS-forecast; Initial data: from perturbed member no. 39 from experiment “b026” (INIPATH = /xde/public/b026/1975123100/inidata_muse_39.tar), Starttime: 1975123100, Forecast-Length: 96 h, Timestep: 3600 sec, postprocessing-interval: 1h, archiving at surface-, pressure-, and model-levels, with Stochastic perturbations on physics (LSTOPH=ON), Radiation computations interval = 3h for complete simulation time (LERAD1H=OFF), without Rayleigh friction in zonal wind (LRFRIC=OFF), with namelist-extension: NENSFNB = 39<br>belonging LM-experiment: 4610 |
| b02b | “MUSE_IFS_1975123112_1”                                                  | IFS-forecast; copy of “b02a”, but for startdate “1975123112” + member no. 1, i.e.: INIPATH = /xde/public/b026/1975123112/inidata_muse_1.tar, NENSFNB = 1<br>belonging LM-experiment: 4611                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

| ID   | Description                                                                        | Comments                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| b02c | “MUSE_IFS_1976010100_31”                                                           | IFS-forecast; copy of “b02b”, but for startdate “1976010100” + member no. 31, i.e.: INIPATH = /xde/public/b026/1976010100/inidata_muse_31.tar, NENSFNB = 31 belonging LM-experiment: 4612                                                                                                                                                   |
| b02d | “MUSE_IFS_1976010212_45”                                                           | IFS-forecast; copy of “b02c”, but for startdate “1976010212” + member no. 45, i.e.: INIPATH = /xde/public/b026/1976010212/inidata_muse_45.tar, NENSFNB = 45 belonging LM-experiment: 4613                                                                                                                                                   |
| b02h | “ControlForecast_1975123100”                                                       | IFS-forecast; single IFS forecast to repeat control forecast of eps_fc “b026”, startdate: “1975123100”, 96h forecast length, T255L40 belonging LM-experiment: 4621                                                                                                                                                                          |
| b02k | “MUSE_IFS_1976010212_6”                                                            | IFS-forecast; copy of “b02d”, but for startdate “1976010212” + member no. 6, i.e.: INIPATH = /xde/public/b026/1976010212/inidata_muse_6.tar, NENSFNB = 6 belonging LM-experiment: 4639                                                                                                                                                      |
| b02l | “MUSE_IFS_1976010300_6”                                                            | IFS-forecast; copy of “b02d”, but for startdate “1976010300” + member no. 6, i.e.: INIPATH = /xde/public/b026/1976010300/inidata_muse_6.tar, NENSFNB = 6 belonging LM-experiment: 4640                                                                                                                                                      |
| b02n | “MUSE_IFS_1976010300_9”                                                            | IFS-forecast; copy of “b02l”, but for startdate “1976010300” + member no. 9, i.e.: INIPATH = /xde/public/b026/1976010300/inidata_muse_9.tar, NENSFNB = 9 belonging LM-experiment: 4642                                                                                                                                                      |
| b02o | “Reanalysis_SS<br>_December99_eps_sv”<br><br>“Reanalysis_SS<br>_December99_eps_fc” | EPS-calculation of singular vectors; calculated from 1999112700 to 1999120318 every 6 hours, based on the ERA-40;<br>EPS-forecast; simulations started every 6 hours, 1st start: 1999112900, last start: 1999120318 (the time lag of 48 h between EPS_SV and EPS_FC is necessary because of the Singular-Vector-Evolution-Mechanism in EPS) |

| ID   | Description                                                              | Comments                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| b02p | "MUSE_IFS_1999120306_5"                                                  | IFS-forecast; Initial data: from perturbed member no. 5 from experiment "b02o" (INIPATH = /xde/public/b02o/1999120306/inidata_muse_5.tar), Starttime: 1999120306, Forecast-Length: 96 h, Timestep: 3600 sec, postprocessing-interval: 1h, archiving at surface-, pressure-, and model-levels, with Stochastic perturbations on physics (LSTOPH=ON), Radiation computations interval = 3h for complete simulation time (LERAD1H=OFF), without Rayleigh friction in zonal wind (LRFRIC=OFF), with namelist-extension: NENSFNB = 5 belonging LM-experiment: 4666 |
| b02q | "MUSE_IFS_1999112912_20"                                                 | IFS-forecast; copy of "b02p", but for startdate "1999112912", Forecast-Length: 96 h, member no. 20, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02o/-1999112912/inidata_muse_20.tar, NENSFNB = 20 belonging LM-experiment: 4674                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| b02r | "MUSE_IFS_1999113012_39"                                                 | IFS-forecast; copy of "b02q", but for startdate "1999113012", Forecast-Length: 96 h, member no. 39, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02o/-1999113012/inidata_muse_39.tar, NENSFNB = 39 belonging LM-experiment: 4677                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| b02t | "MUSE_IFS_1999113018_44"                                                 | IFS-forecast; copy of "b02r", but for startdate "1999113018", Forecast-Length: 132 h, member no. 44, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02o/-1999113018/inidata_muse_44.tar, NENSFNB = 44 belonging LM-experiment: 4679                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| b02s | "Reanalysis_SS_Februar67_eps_sv"<br><br>"Reanalysis_SS_Februar67_eps_fc" | EPS-calculation of singular vectors; calculated from 1967021800 to 1967022318 every 6 hours, based on the ERA-40;<br>EPS-forecast; simulations started every 6 hours, 1st start: 1967022000, last start: 1967022318 (the time lag of 48 h between EPS_SV and EPS_FC is necessary because of the Singular-Vector-Evolution-Mechanism in EPS)                                                                                                                                                                                                                   |
| b02u | "MUSE_IFS_1962021500_e_LSTOPH_FALSE"                                     | IFS-forecast; copy of "b02q", but WITHOUT stochastic physics LSTOPH = FALSE (for Mr. Beljaars) belonging LM-experiment: 4684                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |



| ID   | Description                                                              | Comments                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| b02v | "MUSE_IFS_1999120118_50"                                                 | IFS-forecast; copy of "b02t", but for startdate "1999120118", Forecast-Length: 108 h, member no. 50, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02o/-1999120118/inidata_muse_50.tar, NENSFNB = 50<br>belonging LM-experiment: 4686                                                                                                                        |
| b02w | "MUSE_IFS_1999120206_4"                                                  | IFS-forecast; copy of "b02v", but for startdate "1999120206", Forecast-Length: 96 h, member no. 4, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02o/-1999120206/inidata_muse_4.tar, NENSFNB = 4<br>belonging LM-experiment: 4690                                                                                                                            |
| b02x | "MUSE_IFS_1999120300_33"                                                 | IFS-forecast; copy of "b02w", but for startdate "1999120300", Forecast-Length: 96 h, member no. 33, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02o/-1999120300/inidata_muse_33.tar, NENSFNB = 33<br>belonging LM-experiment: 4693                                                                                                                         |
| b02y | "MUSE_IFS_1967022300_39"                                                 | IFS-forecast; copy of "b02p", but for startdate "1967022300", Forecast-Length: 96 h, member no. 39, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02s/-1967022300/inidata_muse_39.tar, NENSFNB = 39<br>belonging LM-experiment: 4704                                                                                                                         |
| b02z | "Reanalysis_SS_January94_eps_sv"<br><br>"Reanalysis_SS_January94_eps_fc" | EPS-calculation of singular vectors; calculated from 1994012218 to 1994012812 every 6 hours, based on the ERA-40;<br>EPS-forecast; simulations started every 6 hours, 1st start: 1994012418, last start: 1994012812 (the time lag of 48 h between EPS_SV and EPS_FC is necessary because of the Singular-Vector-Evolution-Mechanism in EPS) |
| b030 | "MUSE_IFS_1967022300_26"                                                 | IFS-forecast; copy of "b02y", but for startdate "1967022300", Forecast-Length: 96 h, member no. 26, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02s/-1967022300/inidata_muse_26.tar, NENSFNB = 26<br>belonging LM-experiment: 4705                                                                                                                         |
| b031 | "MUSE_IFS_1967022306_20"                                                 | IFS-forecast; copy of "b030", but for startdate "1967022306", Forecast-Length: 96 h, member no. 20, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02s/-1967022306/inidata_muse_20.tar, NENSFNB = 20<br>belonging LM-experiment: 4706                                                                                                                         |

| ID   | Description                                                              | Comments                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| b032 | "MUSE_IFS_1967022000_11"                                                 | IFS-forecast; copy of "b031", but for startdate "1967022000", Forecast-Length: 96 h, member no. 11, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02s/-1967022000/inidata_muse_11.tar, NENSFNB = 11<br>belonging LM-experiment: 4708                                                                                                                         |
| b033 | "MUSE_IFS_1967022106_11"                                                 | IFS-forecast; copy of "b032", but for startdate "1967022106", Forecast-Length: 120 h, member no. 11, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02s/-1967022106/inidata_muse_11.tar, NENSFNB = 11<br>belonging LM-experiment: 4709                                                                                                                        |
| b034 | "MUSE_IFS_1967022206_23"                                                 | IFS-forecast; copy of "b033", but for startdate "1967022206", Forecast-Length: 96 h, member no. 23, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02s/-1967022206/inidata_muse_23.tar, NENSFNB = 23<br>belonging LM-experiment: 4710                                                                                                                         |
| b035 | "MUSE_IFS_1994012712_23"                                                 | IFS-forecast; copy of "b030", but for startdate "1994012712", Forecast-Length: 48 h, member no. 23, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02z/-1994012712/inidata_muse_23.tar, NENSFNB = 23<br>belonging LM-experiment: 4712                                                                                                                         |
| b036 | "Reanalysis_SS_January90_eps_sv"<br><br>"Reanalysis_SS_January90_eps_fc" | EPS-calculation of singular vectors; calculated from 1990022100 to 1990022800 every 6 hours, based on the ERA-40;<br>EPS-forecast; simulations started every 6 hours, 1st start: 1990022300, last start: 1990022800 (the time lag of 48 h between EPS_SV and EPS_FC is necessary because of the Singular-Vector-Evolution-Mechanism in EPS) |
| b037 | "MUSE_IFS_1994012706_37"                                                 | IFS-forecast; copy of "b035", but for startdate "1994012706", Forecast-Length: 48 h, member no. 37, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02z/-1994012706/inidata_muse_37.tar, NENSFNB = 37<br>belonging LM-experiment: 4717                                                                                                                         |
| b038 | "MUSE_IFS_1994012612_31"                                                 | IFS-forecast; copy of "b035", but for startdate "1994012612", Forecast-Length: 72 h, member no. 31, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02z/-1994012612/inidata_muse_31.tar, NENSFNB = 31<br>belonging LM-experiment: 4718                                                                                                                         |

| ID   | Description              | Comments                                                                                                                                                                                                             |
|------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| b039 | "MUSE_IFS_1994012606_38" | IFS-forecast; copy of "b035", but for startdate "1994012606", Forecast-Length: 120 h, member no. 38, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02z/-1994012606/inidata_muse_38.tar, NENSFNB = 38<br>belonging LM-experiment: 4720 |
| b03a | "MUSE_IFS_1994012418_11" | IFS-forecast; copy of "b035", but for startdate "1994012418", Forecast-Length: 156 h, member no. 11, i.e.: INIPATH = /xde/public/b02z/-1994012418/inidata_muse_11.tar, NENSFNB = 11<br>belonging LM-experiment: 4726 |
| b03b | "MUSE_IFS_1990022606_32" | IFS-forecast; copy of "b035", but for startdate "1990022606", Forecast-Length: 36 h, member no. 32, i.e.: INIPATH = /xde/public/b036/-1990022606/inidata_muse_32.tar, NENSFNB = 32<br>belonging LM-experiment: 4745  |
| b03c | "MUSE_IFS_1990022518_30" | IFS-forecast; copy of "b03b", but for startdate "1990022518", Forecast-Length: 48 h, member no. 30, i.e.: INIPATH = /xde/public/b036/-1990022518/inidata_muse_30.tar, NENSFNB = 30<br>belonging LM-experiment: 4746  |
| b03d | "MUSE_IFS_1990022406_22" | IFS-forecast; copy of "b03b", but for startdate "1990022406", Forecast-Length: 84 h, member no. 22, i.e.: INIPATH = /xde/public/b036/-1990022406/inidata_muse_22.tar, NENSFNB = 22<br>belonging LM-experiment: 4752  |
| b03e | "MUSE_IFS_1990022406_21" | IFS-forecast; copy of "b03b", but for startdate "1990022406", Forecast-Length: 120 h, member no. 21, i.e.: INIPATH = /xde/public/b036/-1990022406/inidata_muse_21.tar, NENSFNB = 21<br>belonging LM-experiment: 4757 |
| b03f | "MUSE_IFS_1990022406_8"  | IFS-forecast; copy of "b03b", but for startdate "1990022406", Forecast-Length: 84 h, member no. 8, i.e.: INIPATH = /xde/public/b036/-1990022406/inidata_muse_8.tar, NENSFNB = 8<br>belonging LM-experiment: 4761     |

| ID   | Description                          | Comments                                                                                                                                                                                                             |
|------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| b03g | "MUSE_IFS_1990022300_20"             | IFS-forecast; copy of "b03b", but for startdate "1990022300", Forecast-Length: 132 h, member no. 20, i.e.: INIPATH = /xde/public/b036/-1990022300/inidata_muse_20.tar, NENSFNB = 20<br>belonging LM-experiment: 4762 |
| b03n | "MUSE_IFS_1962021512_LSTOPH =OFF"    | IFS-forecast; copy of "b028", but without stochastic physics!<br>belonging LM-experiment: 5038                                                                                                                       |
| b03o | "MUSE_IFS_1999120306_LSTOPH =OFF"    | IFS-forecast; copy of "b02p", but without stochastic physics!<br>belonging LM-experiment: 4987                                                                                                                       |
| b03p | "MUSE_IFS_1999120306_LSTOPH =OFF..." | IFS-forecast; copy of "b03o", but: INIORIG="mars" + INIPATH=" " (i.e., reproduction of control forecast; only to check the swapping from perturbed to unperturbed initial state)                                     |
| b03q | "MUSE_IFS_1999120306_LSTOPH =ON..."  | IFS-forecast; copy of "b03p", but WITH stochastic physics!                                                                                                                                                           |