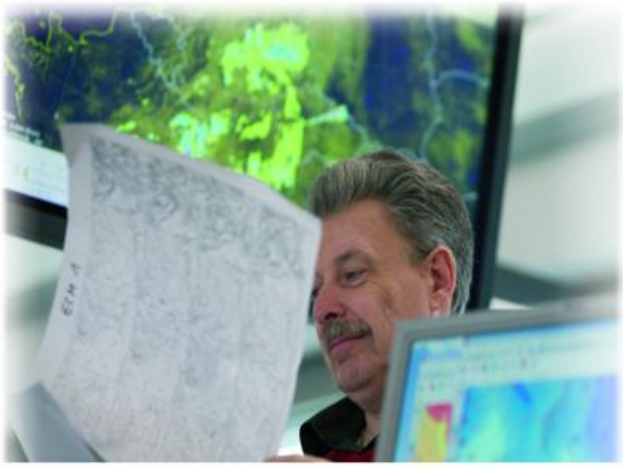
promet

Jahrgang 35 Heft 1-3
2009

meteorologische fortbildung

Deutscher Wetterdienst

Moderne Verfahren und Instrumente der Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst



promet

Herausgeber
Deutscher Wetterdienst

Hauptschriftleiter
Dr. J. Rapp (Offenbach/M.)

Redaktionsausschuss
Dipl.-Met. W. Kusch (Offenbach/M.)

Prof. Dr. G. Adrian (Offenbach/M.)
Prof. Dr. B. Ahrens (Frankfurt/M.)
PD Dr. F. Berger (Lindenberg)
Prof. Dr. B. Brümmer (Hamburg)
Prof. Dr. G. C. Craig (München)
Prof. Dr. S. Jones (Karlsruhe)
Prof. Dr. G. Groß (Hannover)
Prof. Dr. A. Macke (Leipzig)
Prof. Dr. C.-D. Schönwiese (Frankfurt/M.)

pro*met* erscheint im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes – Frankfurter Str. 135, 63067 Offenbach am Main. Bezugspreis pro Jahrgang im Abonnement 22,50 €, Doppelheft 13,– €, Dreifachheft 19,50 € zuzüglich MwSt. und Versandkosten.

Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autoren verantwortlich. Alle Rechte bleiben vorbehalten.

Auflage: 3450

Technische Herausgabe (Layout):
Susanne Stummvoll,
Deutscher Wetterdienst, Offenbach/M.

Druck:
Schedel druck u. media GmbH & Co. KG
An der Barget 10
97633 Kleineibstadt

Bezug:
Deutscher Wetterdienst
Deutsche Meteorologische Bibliothek
Frankfurter Str. 135
63067 Offenbach a. M.

ISSN 0340-4552

Meteorologische Fortbildung

35. Jahrgang, Heft 1-3, 2009

Thema des Heftes:
Moderne Verfahren und Instrumente der Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst

Fachliche Redaktion: G. Steinhorst, Offenbach/M.
Fachliche Durchsicht: G. Tetzlaff, Leipzig

	Beitrag	Seite
	Zu diesem Heft (G. STEINHORST)	1-2
1	G. STEINHORST Übersicht: Moderne Verfahren und Methoden der Wettervorhersage	3-11
2	S. KRENOVSKY, B. ANGER, K. BÄHNKE, J. HOFFMANN, A. ENGEL Struktur und Methodik der operationellen Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst	12-22
3	T. SCHUMANN Nutzung von Ensemble-Prognosen im Vorhersagedienst	23-29
4	H. WEINGÄRTNER, U. SCHICKEDANZ, M. GÖBER Wetterwarndienst	30-38
5	W. SEIFERT Seewettervorhersage	39-44
6	T. KRATZSCH Objektivierung und Automation des Vorhersage- und Warndienstes	45-49
7	M. ROHN Objektive Optimierung – Automation von Punkt-Termin-Prognosen	50-56
8	D. HEIZENREDER, S. HAUCKE Das meteorologische Visualisierungs- und Produktionssystem „NinJo“	57-69
9	A. WALTER, S. TREPTE, R. THEHOS Statistische Vorhersage-und Warnverfahren: MOS-MIX, WarnMOS, BlitzMOS und CellMOS	70-77

10 Radargestützte Niederschlagsanalyse und -vorhersage (RADOLAN, RADVOR-OP) 78-86

M. BALDAUF, A. SEIFERT, U. DAMRATH, K. STEPHAN, U. PFLÜGER, D. MAJEWSKI
11 Das Regionalmodell COSMO-DE 87-97

B. K. REICHERT
12 AutoWARN -Automatische Unterstützung der Herausgabe von Unwetterwarnungen 98-103

S. THEIS, C. GEBHARDT
13 Grundlagen der Ensembletechnik und Wahrscheinlichkeitsaussagen 104-110

Buchbesprechungen 111-114

Habilitationen, Promotionen und Diplomhaupt- sowie Master- und Bachelorprüfungen im Jahr 2008 115-120

Anschriften der Autoren dieses Heftes 121-122

Vorschau auf die nächsten Hefte 122

Übersicht der bisher herausgegebenen Hefte 123

Editorielle Notiz

Als Jahrgang 35 erscheint nur dieses Dreifachheft (Nr. 1-3, 2009). Als Jahrgang 36 werden zwei Doppelhefte (Nr. 1/2, 2010 und Nr. 3/4, 2010) erscheinen.

Moderne Verfahren und Instrumente der Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst

Zu diesem Heft

Jeweils in Zyklen von etwa 14 Jahren sind in der Zeitschrift promet Hefte zur operationellen Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst (DWD) erschienen. Die Ausgabe im Jahre 1982 widmete sich der Synoptischen Meteorologie mit Schwerpunkt auf den zentralen synoptischen Dienst. Damals brachten die Einbeziehung der Daten moderner Beobachtungssysteme wie Satelliten, Radar und automatische Stationen sowie die Übernahme der Ergebnisse der numerischen Wettervorhersage in den Wettervorhersagedienst gravierende Änderungen in der Arbeitsmethodik mit sich. Mit Einführung des feuchtbaroklinen Modells erreichten die numerischen Höhenwettervorhersagekarten eine Qualität, die eine Überarbeitung durch den Synoptiker erübrigte. Erste Ansätze einer statistischen Modellinterpretation im Sinne der „Model Output Statistics" (MOS) und der „Perfect Prog Methode" (PPM) wurden entwickelt.

In den Heften der Jahre 1995 und 1996 lagen die Schwerpunkte auf der Nutzung leistungsfähiger Arbeitsplatzrechner und Workstations und der Entwicklung entsprechender Software in Form des „Meteorologischen Applikations- und Präsentationssystems" (MAP). Die Ergebnisse der numerischen Vorhersagemodelle wurden aus dem Modell-Output entweder direkt oder über den Weg der statistischen Interpretation für die Vorhersage der Wetterparameter bereitgestellt. Für die Kundenversorgung wurde z.B. das „Straßenzustands- und Wetterinformationssystem (SWIS)" entwickelt und die Erstellung der „Punkt-Termin-Prognosen" im DWD voran getrieben. Im Bereich der Mittelfristvorhersage wurden allererste Erfahrungen mit der probabilistischen Vorhersagestrategie des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen (EZMW) gemacht.

Anhand des nun vorliegenden Heftes hat der Leser die Möglichkeit, sich ein Bild über die Entwicklungen auf dem Gebiet der operationellen Wettervorhersage in den letzten eineinhalb Jahrzehnten zu machen. Vieles, was Mitte der neunziger Jahre in Entstehung begriffen war - wie die quantitative Auswertung von Fernerkundungsdaten, die Entwicklung von Postprocessing-Verfahren oder die operationelle Nutzung von Ensemble-Vorhersagen - hat sich in der täglichen Routine bewährt. Im Bereich der Fernerkundung sind es die radargestützte Verfolgung von Konvektionszellen oder Satellitenprodukte aus dem Nowcasting-SAF (Satellite Application Facility), die das Warnmanagement unterstützen. Der Prozess der Produktgenerierung aus Modell- und Beobachtungsdaten und mit Hilfe von Nowcasting-Verfahren ist weiter automatisiert worden. Statistische Verfahren wie WarnMOS wurden entwickelt, um als objektive Entscheidungsgrundlage für die Erzeugung von Warnungen zu dienen. Probabilistische Vorhersageprodukte im Mittelfristbereich gehören inzwischen zur Arbeitsgrundlage für die rechtzeitige Vorhersage skaliger Unwetterereignisse und haben sich bei Orkan- oder Starkniederschlagsereignissen bewährt. Insgesamt ist die Modellentwicklung im Bereich der Datenassimilation und Modellphysik vorangeschritten und hat für hoch auflösende Modelle (COSMO –DE) u.a. durch direkte Berechnung der hoch reichenden Konvektion neue Wege beschritten.

Das Warnmanagement wurde in den letzten Jahren im DWD ausgebaut und dient der Versorgung der Kata-strophenschutzeinrichtungen und der Öffentlichkeit mit Warnungen auf Landkreisebene. Damit erfüllt der DWD seinen Auftrag im Bereich der Daseinsvorsorge. Um für das Warnmanagement die Vielzahl an Informationen wie Beobachtungsdaten, Modellinformationen und statistisches Postprozessing nutzen zu können, werden diese Informationen in einem automatisierten Warnverfahren „AutoWARN" integriert, welches der Meteorologe im Nationalen Warnzentrum des DWD überwacht. Damit wird der Weg für eine zunehmende Automation und Zentralisierung in der meteorologischen Arbeitsweise bereitet. Alle diese Vorhersage- und Beratungsunterlagen werden in dem universellen meteorologischen Präsentationssystem „NinJo" aufbereitet und dargestellt.

Dieses Heft gibt einen Querschnitt über die verschiedenen Verfahren und Methoden der operationellen Wettervorhersage und des Warnmanagements, welche stark durch Nutzeranforderungen geprägt sind. In dem ersten Beitrag dieses Heftes werden diese neueren Verfahren und Methoden in ihrer Bedeutung für die heutige Wettervorhersage bewertet und zur besseren Übersichtlichkeit den nachfolgenden Beiträgen zugeordnet. Es ist ratsam, die Lektüre mit diesem Übersichtsbeitrag zu beginnen.

Spezielle Beiträge über weitere Bereiche der operationellen Wettervorhersage auf dem Gebiet der Flugmeteorologie, Satellitenmeteorologie, Straßenwetter-Informationssysteme oder Seeschifffahrtsberatung müssen einer späteren promet-Ausgabe vorbehalten bleiben.

Gerhard Steinhorst

G. STEINHORST

1 Moderne Verfahren und Methoden der Wettervorhersage

Modern procedures and methods in weather forecasting

Zusammenfassung
Die Verfahren und Methoden der modernen Wettervorhersage werden nach Datengewinnung, numerische Wettervorhersage, Postprocessing, meteorologische Verfahren und probabilistische Methoden geordnet und ihre Bedeutung für die operationelle Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst beschrieben. Zusätzliche Daten von Satelliten und bodengebundenen Fernerkundungsmethoden finden Eingang in die Datenassimilation und die angewandte Wettervorhersage. Die Weiterentwicklung hoch aufgelöster numerischer Modelle ermöglicht im Kürzestfristbereich ebenso wie statistisches Postprocessing und spezielle meteorologische Verfahren die Verbesserung der Vorhersage warnwürdiger Ereignisse. Die gegenwärtige Struktur und Arbeitsmethodik der operationellen Wettervorhersage und des Warnmanagements im DWD wird einer Zentralisierung und stärkeren Automation unterworfen. Durch weitere Ensemblerechnungen soll die Vorhersageunsicherheit gerade bei extremen Wetterereignissen verringert und der Weg in die probabilistische Wettervorhersage geebnet werden. Ziel ist es, durch die ständige Verbesserung des Prozesses Wettervorhersage im DWD, die gestiegenen Anforderungen an die Wettervorhersage und des Warnmanagements für Bevölkerung und Katastrophenschutz zu erfüllen.

Abstract
The procedures and methods of modern weather forecasting are assigned to data acquisition, numerical weather prediction, postprocessing, meteorological procedures and probabilistic methods, and their importance for operational weather forecasting at the Deutscher Wetterdienst is described. Additional data from satellites and from ground based remote sensing methods finds its way into data assimilation and practical weather forecasting. The further development of high resolution numerical models as well as statistical postprocessing and special meteorological procedures allow for improving the prediction of warning events in the ultra short range. The current structure and working procedures of operational weather forecasting and warning management as applied at the DWD will be subject to a centralisation and a higher degree of automation. By means of ensemble calculations the forecast uncertainty particularly in the case of extreme weather events shall be reduced, and the way to probabilistic weather forecasting shall be paved. The aim of these measures is to improve permanently the process of weather forecasting in the DWD in order to fulfil better the increasing requirements with respect to weather forecasting and warning management for the public and the disaster control sector.

1 Einleitung

Die operationelle Wettervorhersage ist durch die Fortschritte
- in der Datengewinnung und Datenassimilation,
- in der Weiterentwicklung der numerischen Modelle,
- im statistischen Postprocessing,
- in der Entwicklung spezieller meteorologischer Verfahren und
- in der Nutzung probabilistischer Methoden anerkannt zuverlässiger geworden.

Nachfolgend werden in diesem Übersichtsbeitrag diese neueren Verfahren und Methoden aus der Sicht der operationellen Wettervorhersage kurz beschrieben, gemäß obiger Gliederung eingeordnet und ihre Bedeutung für die Wettervorhersage im DWD aufgezeigt. Zugleich wird auf den jeweils entsprechenden Beitrag in diesem Heft hingewiesen.

Die eingeschränkte Vorhersagbarkeit des Wetters folgt aus der physikalischen Eigenschaft, dass die Atmosphäre ein chaotisches System ist. Im Mittel nimmt der Fehler einer deterministischen Vorhersage mit dem Prognosezeitraum zu. Weiterhin hängt die Vorhersagbarkeit auch von den internen Zeitskalen der atmosphärischen Prozesse ab. Hier sind es Zeitskalen im Bereich von Minuten oder Stunden bis zu mehreren Tagen. Tornados oder kleinräumige Gewitter haben eine Lebensdauer von Minuten bis zu 1 Stunde, ein Tiefdrucksystem von mehreren Tagen. Entsprechend sind die physikalischen Prozesse in den Modellgleichungen abzubilden und die räumliche Auflösung der Modelle zu wählen. Die Qualität der Wettervorhersage ist stark skalenabhängig (siehe Abbildung 1-1). Vorhersagen im globalen und regionalen Scale, das heißt für großräumige Wettersysteme wie Hoch- und Tiefdruckgebiete, skalige Niederschlagsgebiete, frontale Strukturen usw., haben einen hohen Standard erreicht, was letztlich auf die geringere Gittermaschenweite, die verbesserte Datenassimilation und Parametrisierung in den numerischen Modellen zurück-

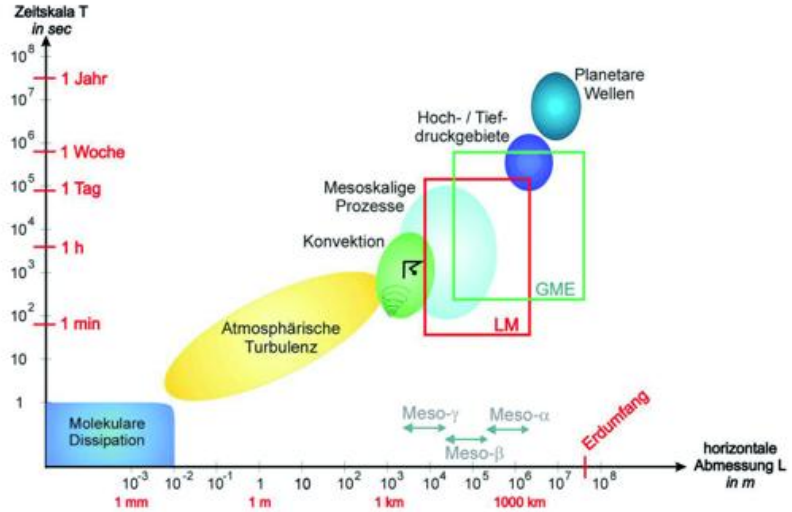


Abb. 1-1: Raum-, Zeitskalen für meteorologische Prozesse.

zuführen ist. In diesem Skalenbereich haben Ensemblevorhersagen zu einer weiteren Verbesserung der Vorhersage durch probabilistische Methoden beigetragen. In der konvektionsauflösenden Skala zwischen 1 km und etwa 100 km gibt es noch Defizite bei der Vorhersage von Wettersystemen wie Gewittern, Squall lines, Superzellen, Starkniederschläge. Die hierbei maßgeblichen Prozesse sind wegen ihrer kleinräumigen Struktur in den numerischen Modellen nur begrenzt auflösbar, zumal Orographie und Bodenbeschaffenheit (Bodenfeuchte) eine wichtige Rolle spielen. Während Temperaturen sich beispielsweise recht gut vorhersagen lassen, sind Berechnungen des Niederschlags in der Atmosphäre mit Unsicherheiten behaftet. Die Ursache liegt in der komplexen Struktur der Niederschlagsprozesse in der Atmosphäre.

Auch der Meteorologe oder Berater im Bereich der Wettervorhersage hat diese Skalen und Parameter zu beachten und die für jeden Wetterablauf geeigneten Informationen auszuwählen. Aufgabe des Prozesses Wettervorhersage im DWD ist es, die Vorhersagbarkeit des Wetters ständig zu verbessern, um die gestiegenen Anforderungen an die operationelle Wettervorhersage und an das Warnmanagement für Bevölkerung und Katastrophenschutzeinrichtungen zu erfüllen und die Beratungen für die Luftfahrt und Seeschifffahrt auf höchstem Niveau durchzuführen. Die Anforderungen an die Genauigkeit einer Vorhersage werden schließlich durch die Nutzer bestimmt.

2 Datengewinnung und Datenassimilation

2.1 Datengewinnung

Die Erfolge in der Wettervorhersage sind nicht nur durch die Verbesserung der numerischen Modelle, sondern auch durch den gestiegenen Umfang und die Qualität der Beobachtungsdaten begründet, zu denen insbesondere die Daten der geostationären und polar umlaufenden Satelliten gehören. Durch die Auswertung der Satellitendaten im Rahmen der Datenassimilation wurde eine Vorhersagequalität zum Beispiel auf der Südhalbkugel erreicht, die allein mit konventionellen Beobachtungsdaten über Land, von Flugzeugen und Schiffen niemals möglich geworden wäre.

Als Beispiel für die moderne Nutzung von Satellitendaten in der operationellen Wettervorhersage können die Temperatur-Feuchte-Profile genannt werden, die mit dem IASI (**I**nfrared **A**tmospheric **S**ounding **I**nterferometer)-Instrument des polar umlaufenden europäischen METOP-Satelliten gemessen werden. Sie werden in Kürze als Ergänzung zu Radiosonden oder AMDAR-Profilen (Vertikalprofile von Temperatur und Wind aus Flugzeugen) in dem Präsentationssystem NinJo des DWD bereitgestellt werden. Aus den Temperatur-Feuchte-Profilen des IASI-Instruments lassen sich in hoher Auflösung Labilitätsindizes ableiten, um bei entsprechenden Wetterlagen z. B. die Vorhersage von Wärmegewittern zu verbessern. Damit können Konvektionsereignisse früher erkannt werden, bevor sich die ersten Wolken bilden oder Radarechos zu erkennen sind. Abbildung 1-2 zeigt den KO–Labilitätsindex, welcher aus den METOP-IASI-Daten gewonnen wurde.

Auch der Ausbau von Beobachtungssystemen in datenarmen Gebieten hat erheblich zur Verbesserung der Datengewinnung beigetragen. Gerade über den Ozeanen beweisen satellitengestützte Scatterometerdaten der Satelliten QuickScat und METOP, welche mittels aktivem Radarsensor Richtung und Stärke des Bodenwindes über der Meeresoberfläche erfassen, den positiven Einfluss auf die Analyse- und Vorhersagequalität der DWD-Produkte.

Natürlich sind in diesem Zusammenhang auch moderne, bodengebundene Beobachtungssysteme zu nennen. Zu diesen zählen driftende Messbojen auf den Weltmeeren, aerologische Aufstiege von Schiffen (ASAP) und Messdaten von Flugzeugen im Rahmen des AMDAR-Beobachtungssystems.

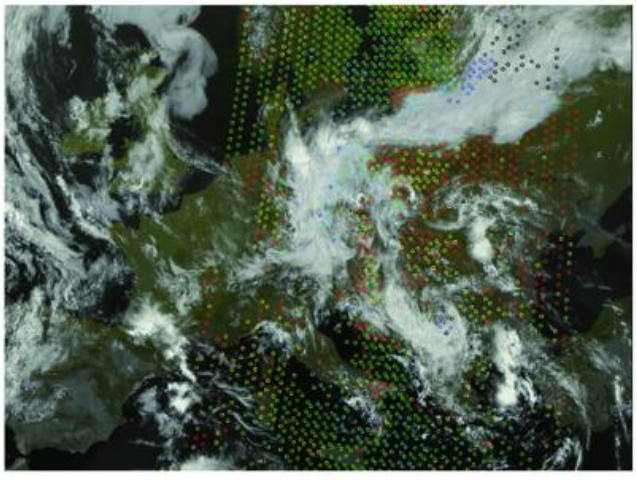


Abb. 1-2: Farbkomposit von Meteosat 9 und METOP KO-Index vom 25.06.2009, DWD/EUMETSAT.

Während die Assimilation von Beobachtungsdaten in numerischen Modellen große Fortschritte erzielt hat, weisen die bemannten Beobachtungsnetze am Boden und teilweise im aerologischen Netz durch die Automation immer größere Lücken auf. Dies führt bei der Analyse und Verifikation von Extremwetter zu Defiziten, weil bestimmte Beobachtungsgrößen wie z. B. Bedeckungsgrad oder gefrierender Regen noch nicht zuverlässig automatisch gemessen werden können. Um die Verringerung der Stationsnetze zu kompensieren und Flächendaten zu erhalten, hat man Radarverbund- und Blitzortungssysteme weiter ausgebaut, welche für die Erfassung von Gewittern und Starkniederschlägen unverzichtbar sind. Insbesondere die Radardaten liefern durch geeignete Auswertung (RADOLAN und RADVOR-OP, siehe Beitrag 10 in diesem Heft) gute quantitative Ergebnisse, die das Niederschlagsstationsnetz ergänzen.

2.2 Datenassimilation

Die Datenassimilation bestimmt den Anfangszustand einer numerischen Wettervorhersage. Die Leistungsfähigkeit der Modelle wird maßgeblich durch die Integration der genutzten Fernerkundungsdaten (Satelliten-, Radardaten) in die Datenassimilation bestimmt. Die Nutzung der Fernerkundungsdaten setzt die Verfügbarkeit variationeller Verfahren der Datenassimilation voraus, um den Anfangszustand des jeweils nächsten Modelllaufs zu bestimmen. Diese werden im DWD beim globalen und regionalen Modell über eine **dreid**imensionale **Var**iationsanalyse (3D-VAR) bereitgestellt. Dagegen werden in COSMO-DE erstmalig quantitative Radardaten als Eingangsgrößen in der numerischen Wettervorhersage genutzt, welches als „**L**atent **H**eat **N**udging“ (LHN) bezeichnet wird. Dieses verwendet die Reflektivitäten aus dem Radar-Niederschlagsumlauf. Die Idee des LHN besteht in der Verknüpfung zwischen den aus qualitätsgesicherten Radardaten abgeschätzten Niederschlagsraten und dem vertikalen Profil der latenten Heizraten des Modells. Das LHN ist für die Assimilation von konvektiven Systemen gut geeignet und ermöglicht in Fällen, in denen das Modell konvektive Entwicklungen nicht direkt generieren kann, entsprechende Niederschlagsgebiete zu entwickeln. Eine genauere Beschreibung des LHN findet man im Beitrag 11 „Das Regionalmodell COSMO-DE“.

Die Güte der EZMW-Mittelfristvorhersagen basiert auf der Anwendung des vierdimensionalen Datenassimilationsverfahrens (4D-VAR). Dieses Verfahren (WOODS 2006) ist sehr rechenintensiv und erfordert entsprechend leistungsfähige Großrechner. 4D-VAR stellt eine statistische, räumliche und zeitliche Interpolation von meteorologischen Beobachtungsdaten und einer Kurzfristvorhersage dar. Im Gegensatz zur 3D-VAR werden die Beobachtungsdaten aus einem größeren Zeitintervall den Modellfeldern zeitlich korrekt zugeordnet. Die ursprüngliche Vorhersage wird an die Beobachtungen innerhalb des Assimilations-Zeitfensters von 12 Stunden angepasst. Dies erfolgt durch die Anpassung des Bodendrucks und der Verteilung von Temperatur, Wind, Feuchte und Ozon in der gesamten Atmosphäre. Die korrigierten Daten führen zu einer besseren Vorhersage nicht nur innerhalb der 12-Stunden-Periode, sondern auch für mehrtägige Vorhersagen. Die Abbildung 1-3 stellt dieses Verfahren grafisch dar.

3 Weiterentwicklung der numerischen Modelle

Entwicklungsstufen der numerischen Wettervorhersage im DWD waren die operationelle Einführung des barotropen Modells (1966) mit den Vorhersagen nordhemisphärischer Geopotentialfelder, das feucht-barokline Modells BKF (1978) mit Routine-Niederschlagsvorhersage, das feucht-barokline Modell (1981) mit höherer Auflösung BKN, die Modellkette GM-EM-DM (1991) aus **g**lobalem **M**odell, **E**uropa-**M**odell und **D**eutschland-**M**odell mit jeweils höherer Auflösung, das **g**lobale **M**odell GME (1999), das nichthydrostatische Regionalmodell LM (1999) und ab 2007 das Regionalmodell COSMO-DE (ehemals LMK) mit einer Maschenweite von 2,8 Kilometern.

Mit der systematischen Weiterentwicklung der numerischen Wettervorhersage wurde eine neue Qualität der Wettervorhersage erreicht, welche uns heute in die Lage versetzt, eine Vorhersage über sechs Tage mit der gleichen Genauigkeit zu erstellen wie eine Zweitagesvorhersage zu Beginn der 70er

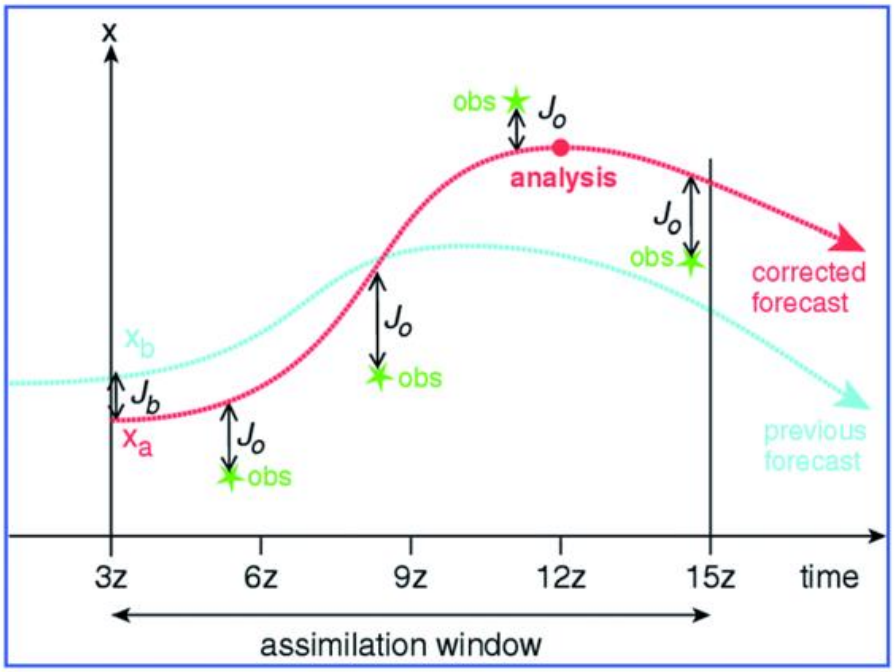


Abb. 1-3: Prinzip der 4D-VAR Datenassimilation des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersagen (Quelle: EZMW, Newsletter Nr. 115, 2008).

Jahre, d.h. die Vorhersagbarkeit ist etwa alle zehn Jahre um einen Tag verbessert worden (Abbildung 1-4)

Der DWD nutzt für die operationelle Wettervorhersage das globale Modell GME sowie die darin eingelagerten Regionalmodelle COSMO-EU und COSMO-DE. Die beiden letztgenannten Modelle sind nicht-hydrostatisch, d.h. sie lösen eine prognostische statt einer diagnostischen Gleichung für die Vertikalbewegung. Das COSMO-EU hat 7 km Maschenweite und 40 Schichten, das COSMO-DE (Mitteleuropa Ausschnitt) hat 2,8 km Maschenweite und 50 Schichten. Es wurde als Kürzestfristmodell für die Vorhersage auf der konvektionsauflösenden Skala entwickelt und verzichtet auf die explizite Parametrisierung der hoch reichenden Konvektion.

Die COSMO-Modelle werden im Rahmen eines Konsortiums mit anderen europäischen Wetterdiensten entwickelt. Das COSMO-LEPS (Limited-Area **E**nsemble **P**rediction **S**ystem) ist ein Ensemblesystem des Regionalmodells, welches auf Basis des EZMW-Ensembles gerechnet wird (näheres zu Ensemble-Verfahren im Beitrag 3 „Nutzung von Ensemble-Prognosen im Vorhersagedienst“).

Das COSMO-EU entwickelt seine Stärken in der operationellen Wettervorhersage bei großskaligen Wettersystemen wie Starkniederschläge im Alpenraum (z.B. Vb-Lagen) oder Sturmereignisse mit regionalem Ausmaß. Für die Vorhersage konvektiver Systeme wurde das Regionalmodell COSMO-DE entwickelt, welches in vielen Fällen gute Vorhersagen liefert, wenn die Auslösung der Konvektion richtig erfasst wird.

Die Modelle des DWD im Kurz- und Kürzestfristbereich zusammen mit den Modellergebnissen des EZMW im Mittelfristbereich liefern die Grundlage für alle Prognosen, die im Geschäftsbereich Wettervorhersage erstellt werden.

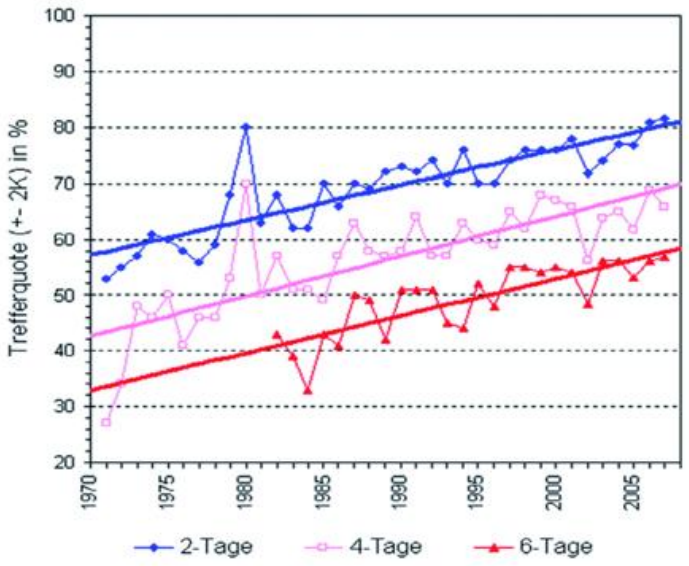


Abb. 1-4: Zeitreihe des Anteils von Vorhersagefehlern der Maximumtemperaturen kleiner als 2 K für 2-, 4-, und 6-Tagesvorhersagen.

4 Statistisches Postprocessing

Die deutliche Verbesserung der Wettervorhersage in den letzten Jahrzehnten wird nicht allein durch die numerische Vorhersage und die Qualität der Beobachtungsdaten bestimmt. Der Prozess Wettervorhersage beinhaltet auch das statistische Postprocessing, d.h. die Interpretation der direkten Modellergebnisse mittels objektiver statistischer Verfahren. Dabei wird der vom Modell vorhergesagte Wert (Direct Model Output) verändert. Die Korrektur ergibt sich im einfachsten Fall aus der über einen längeren Zeitraum gemittelten Abweichung zwischen prognostiziertem und eingetretenem Wert. 1994 erfolgte die Einführung der KALMAN-Filterung des direkten Modell-Outputs und im Jahre 1999 die „**M**odel **O**utput“-**S**tatistik MOS. Im Jahre 2004 wird das Verfahren MOS/MIX eingeführt, ein statistisches Verfahren, bei dem als „Model Output“ ein anomaliegewichtetes Mittel der globalen Modelle des DWD (GME) und des EZMW dient.

Es wird immer wieder die Frage gestellt, ob der Meteorologe die automatisch erstellten Vorhersageprodukte noch verbessern kann. Abb. 1.5 stellt das Ergebnis langjähriger Verifikation dar. Positive Werte in Abbildung 1.5 bedeuten, dass der Meteorologe das „Maschinenprodukt“ verbessern konnte; negative Werte zeigen, dass der Synoptiker schlechter als die automatische Vorhersage ist (BALZER 2002). Man erkennt, dass der Mensch als Prognostiker seit der Einführung von MOS/MIX im Zusammenspiel mit der gestiegenen numerischen Vorhersageleistung im Mittel (d.h. bei unkritischen Wetterlagen) keinen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Modellergebnisse zu leisten vermag.

Anders stellt sich die Situation im Warnmanagement bei der Vorhersage von extremen Wetterereignissen dar. Hierbei kann der Prognostiker gerade im Bereich von Nowcasting (0 bis 2 Stunden) und Kürzestfristvorhersage (0 bis 18 Stunden) durch die räumliche und zeitliche Präzisierung der Warnaussage eine Verbesserung der Vorhersagegüte erzielen.

Dieses Ergebnis wird durch neueste Verifikationsergebnisse zur Gewitterwarnung (GÖBER 2009) bestätigt. Tatsächlich sind durch ein räumlich und zeitlich detaillierteres, landkreisbasiertes Warnmanagement die falschen Alarme für Gewitter in den letzten Jahren deutlich zurückgegangen. Die Qualität und Nutzbarkeit der Warnungen hat durch die räumliche und zeitliche Präzisierung zugenommen. Dies ist nicht in erster Linie auf die numerische Wettervorhersage, sondern auf eine Veränderung des Warnverfahrens und des Verhaltens des Prognostikers zurückzuführen, welcher in der Erstellung der Warnung durch konsequenten Einsatz von Nowcasting-Methoden eine echte Verbesserung erreicht hat (näheres hierzu im

Beitrag 4 „Wetterwarndienst“ unter „Verifikation der Basiswarnungen“). Künftig sollen Warnverfahren wie WarnMOS und AutoWARN den Meteorologen bei der Erstellung von Warnungen noch stärker unterstützen. Insgesamt können durch statistisches Postprocessing die Warnergebnisse noch verbessert und die Objektivierung des Warnprozesses erhöht werden.

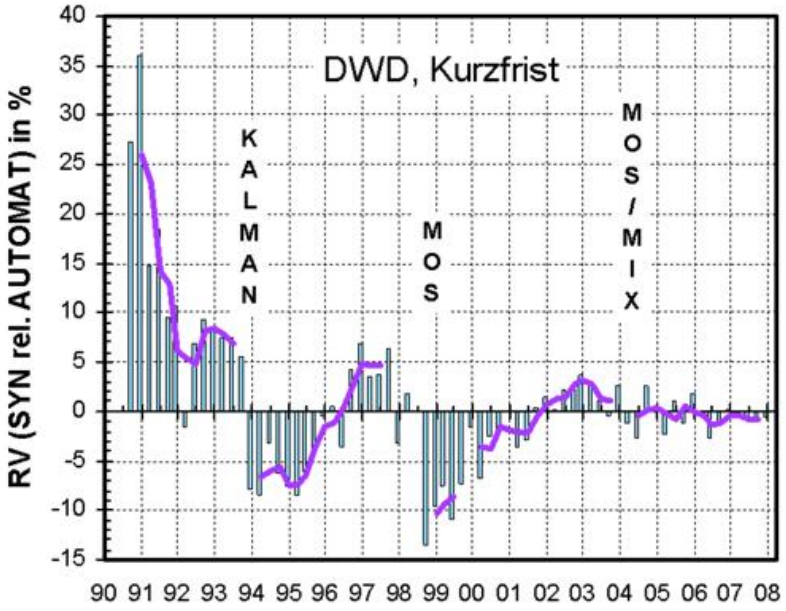


Abb. 1-5: Reduktion der Fehlervarianz RV des Synoptikers relativ zur jeweils besten automatischen Vorhersage in Prozent (GÖBER 2008)

5 Meteorologische Verfahren

5.1 Automation im Vorhersagedienst

Die moderne Wettervorhersage kommt nicht ohne die Entwicklung von Methoden und Verfahren zur Unterstützung des operationellen Vorhersage- und Warndienstes aus. Zur Darstellung der vielfältigen meteorologischen Beobachtungs- und Vorhersagedaten hat der DWD federführend zusammen mit anderen Wetterdiensten das sog. NinJo-Präsentationssystem entwickelt, welches ein umfassendes Werkzeug für die Darstellung der vielfältigen meteorologischen Produkte ist. Zugleich ist NinJo in der Lage, eine Vielzahl von meteorologischen Verfahrensanwendungen zu integrieren. Im Beitrag 8 „Das meteorologische Visualisierungs- und Produktionssystem NinJo“ wird dieses für die Vorhersagetätigkeit grundlegende System näher beschrieben.

Am Beispiel der in NinJo enthaltenen OOG (**O**bjektiv **O**ptimierte **G**uidance) wird deutlich, dass die Vielfalt der verfügbaren Informationsquellen aus Beobachtungs-, Modell-, Postprocessing- und Fernerkundungsdaten automatisch und objektiv zu deterministischen **P**unkt-**T**ermin-**P**rognosen (PTP) kombiniert werden können. Es findet hierbei eine kontinuierliche Anpassung an aktuelle Beobachtungs- und Nowcastingdaten statt. Die OOG ist die verbindliche Quelle für alle Produkte im Wettervorhersagedienst, die auf Punkt-Termin-Prognosen aufsetzen. Die Anpassung und Korrektur der PTP erfolgt über die Zeitachse, d.h. zu Beginn des Vorhersagezeitraums werden die Beobachtungen am stärksten gewichtet. Flächendaten wie z.B. Radardaten werden über ein Adaptionsverfahren in die Punkt-Termin-Prognose eingepasst. Für den kurz- und mittelfristigen Prognosezeitraum gewinnen die verschiedenen Modelldaten immer stärker an Gewicht. Die vorerst rein deterministische Betrachtungsweise der OOG soll künftig auf probabilistische Verfahren und Produkte erweitert werden. Eine ausführliche Beschreibung dieses Verfahrens findet man im Beitrag 7 „Objektive Optimierung – Automation von Punkt-Termin-Prognosen“.

In einem automatisierten Prozess der Produktgenerierung aus Modelldaten, Nowcasting-Verfahren und Beobachtungsdaten muss eine manuelle Eingriffsmöglichkeit vorgesehen werden. Dieses geschieht im Rahmen der Datenart MMO (**M**anually **M**odified **O**utput) und in der Kombination von OOG und MMO, welche als OMG (**O**bjective **M**anual **G**uidance) bezeichnet wird. Näheres hierzu ist im Beitrag 6 „Objektivierung und Automation des Vorhersage- und Warndienstes“ beschrieben.

Die Weiterentwicklung von statistischen Verfahren zur Erfassung von konvektiven Ereignissen führte zu dem ebenfalls in NinJo integrierten Verfahren BlitzMOS, das für Zwecke des Warnmanagements eingesetzt wird. BlitzMOS dient der Vorhersage der Gewitterwahrscheinlichkeit im Rahmen der Kurzfristvorhersage. Ein zweijähriger Datensatz, basierend auf Blitzortungsdaten, wurde verwendet, um Regressionsgleichungen für sechs Prediktanden zu entwickeln. Es wird die Blitzanzahl, die Wahrscheinlichkeit für mindestens 1, 10, 100 Blitze und die Häufigkeit des Eintretens eines Gewitters (vereinzelt, zahlreich) vorhergesagt. Genutzt werden vor allem die Vorhersagen bis t + 3 Stunden. Das Vorhersagegebiet umfasst Deutschland und angrenzende Gebiete.

In Analogie zum BlitzMOS wurde ein MOS-Verfahren zur Vorhersage von Radarreflektivitäten und daraus abzuleitenden Größen entwickelt, das sogenannte RadarMOS. Auf der Grundlage von Blitzortungs- und Radardaten ist für die Vorhersage von Gewitterzellen wiederum das CellMOS-Verfahren entstanden (HOFFMANN 2008). Dieses leitet, basierend auf dem Lagrangeschen Bezugssystem, Prediktanden für jede Zelle ab und berechnet entsprechende Prediktoren aus Modell, Persistenz usw. für den aktuellen Ort der Zelle. Will man für alle deutschen Landkreise und für die 27 vom DWD definierten Warnkriterien einen aktuellen und vorhergesagten Warnzustand erzeugen, so dient das Verfahren WarnMOS als objektive Entscheidungshilfe. Alle genannten MOS-Verfahren sind im Beitrag 9 „Statistische Vorhersage- und Warnverfahren“ beschrieben.

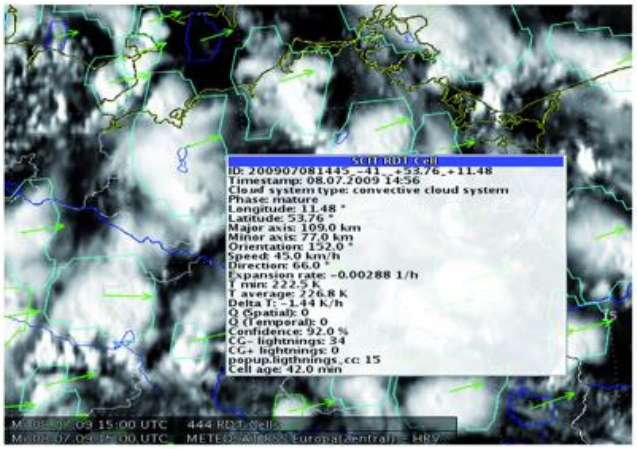


Abb. 1-6: **R**apid **D**eveloping **T**hunderstorm (RDT)-Produkt des Nowcasting SAF (grüne Pfeile: Verlagerung; Umriss türkis: aktive Zelle).

5.2 Verfahren mit Fernerkundungsdaten

Im Rahmen der von EUMETSAT koordinierten **S**atellite **A**pplication **F**acilities (SAF) ist es das SAF für **Now**casting und Kürzestfristvorhersage (NWC SAF, nwcsaf.inm.es), welches die Vorhersage von extremen Wettererscheinungen durch Auswertung von Satellitendaten unterstützt. Ein Beispiel hierfür ist das Verfahren zur Erfassung von sich schnell entwickelnden Gewittern (RDT) aus Daten der MSG-Satelliten (**M**eteosat **S**econd **G**eneration). Die Detektion der konvektiven Zellen erfolgt alle 15 Minuten über die Oberflächentemperatur der Infrarot-Satellitenbilddaten. Mittels eines speziellen Algorithmus werden die Zellen unter Zuhilfenahme von Blitzortungsdaten verfolgt. Jedes Wolkenelement ist mit einer Vielzahl von Informationen über Verlagerungsgeschwindigkeit, Oberflächentemperatur, Expansionsrate etc. versehen. Abbildung 1-6 gibt ein Beispiel, wobei die verschiedenen Farben der Umrisse der Gewitterzellen den Entwicklungszustand der Zelle angeben. Dieses Verfahren ist in NinJo integriert und dient in Ergänzung zur Radarinformation der Erfassung und Verlagerung von Gewittern.

Weitere Verfahren zur Gewinnung von Wolkenparametern, Niederschlag und Luftmassenparametern stehen im Nowcasting-SAF zur Verfügung.

Die Daten moderner Radarverbundsysteme sind Voraussetzung für die Erkennung von konvektiven Wetterentwicklungen und sind besser als alle anderen Beobachtungsverfahren geeignet, den Meteorologen über die Intensität und vertikale Ausbreitung von gefährlichen Gewitterzellen zu informieren. Im DWD kommt hierzu das Auswerteverfahren KONRAD zur Anwendung, das aus den 5-minütigen Radarniederschlagsscans der lokalen Radarverbundgeräte Gewitterzellen detektiert. KONRAD filtert mittels Bildanalyseverfahren aus dem Gesamtbild der Niederschlagsfelder die Kerne der Gewitterzellen heraus, analysiert und bewertet sie nach Echostärke, Flächenausdehnung, Zugrichtung und leitet daraus Warnhinweise zu Hagel, Starkregen und Windböen ab (Abbildung 1-7). Bei der Anwendung des Verfahrens muss berücksichtigt werden, dass KONRAD die Zugbahnen der Gewitterzellen geradlinig im Sinne einer Extrapolation bestimmt, was für reale Gewitter jedoch häufig nicht zutrifft.

Eine Weiterentwicklung des KONRAD-Verfahrens stellt das Niederschlag-Nowcasting-System RADVOR-OP dar, welches in Echtzeit räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagsprognosen für den Kürzestfristzeitraum bis zu zwei Stunden in der Vorhersagezeit generiert. Kern dieses Verfahrens bildet ein spezieller Verlagerungsalgorithmus, der alle fünf Minuten qualitativ-quantitative Vorhersagen aus der Interpolation von Verlagerungsvektoren erzeugt. Dieses Verfahren, das auf der Radardatenaneichung (Verfahren RADOLAN) beruht, ist auch in der Lage, stratiforme Niederschlagsgebiete vorher zu sagen. Nähere Einzelheiten sind im Beitrag 10 „Radargestützte Niederschlagsanalyse und -vorhersage“ beschrieben.

In der synoptischen Praxis werden die Radarinformationen mit den Blitzdaten aus dem Blitzdaten-Informationssystem überlagert, was die Gewitterdiagnose weiter verbessert.

5.3 Integrales Vorhersage- und Warnverfahren

Die weiter wachsende Flut an Wetterinformationen aus Modellen, Postprocessing, Beobachtungsdaten und spezifischen Verfahren ist von dem Vorhersagemeteorologen und dem Berater kaum noch zu bewältigen. Aufgrund der gestiegenen Anforderungen an die Qualität der Vorhersagen und Warnungen in Raum und Zeit hat der DWD das Verfahren AutoWARN entwickelt, das alle zur Zeit verfügba-

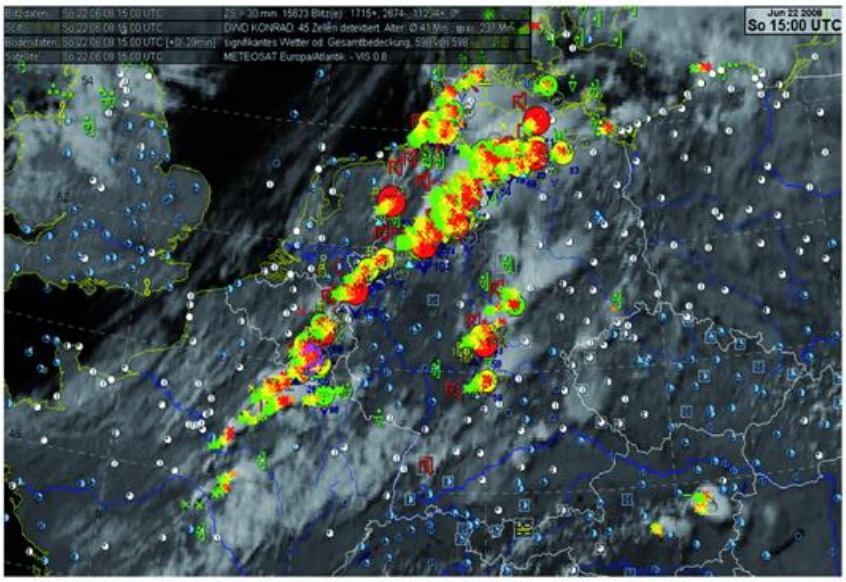


Abb. 1-7: Darstellung der Intensität und Verlagerung von Gewitterzellen aus Radardaten (KONRAD – Produkt, überlagert von Blitz- und Satellitendaten).

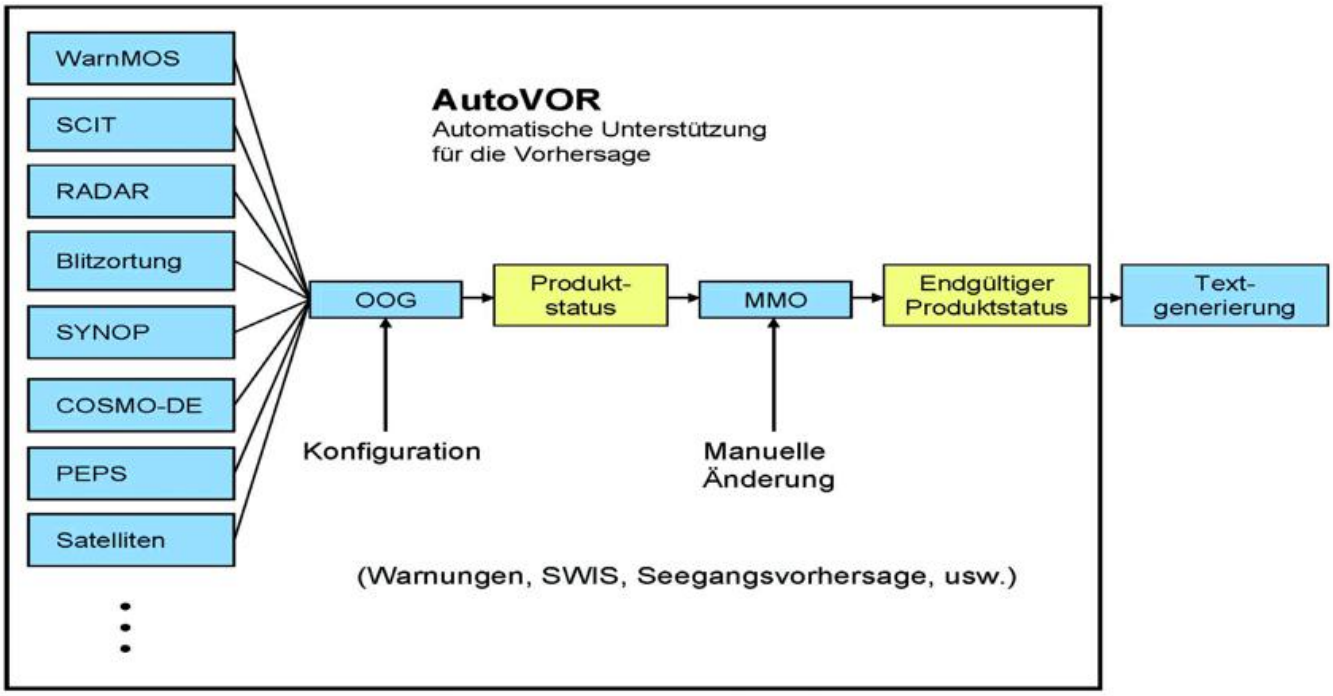


Abb. 1-8: AutoVOR: Prinzip eines automatisierten Vorhersageverfahrens zur Unterstützung des operationellen Vorhersagedienstes.

ren meteorologischen Informationen zusammenführt und automatisiert aufbereitet.

AutoWARN nutzt Beobachtungs- und Fernerkundungsdaten, bezieht vorhandene Modellergebnisse sowie Produkte des statistischen Postprocessing ein und nutzt die Ergebnisse der verfügbaren meteorologischen Verfahren. AutoWARN wird in dem Beitrag 12 „AutoWARN - Automatische Unterstützung der Herausgabe von Unwetterwarnungen“ beschrieben.

Nach einem entsprechenden Prinzip lassen sich außer den Warnungen künftig auch weitere Vorhersageprodukte z.B. für den Straßenwetterdienst, die Luftfahrt und die Seeschifffahrt erzeugen, wobei die letzte Kontrolle dem Meteorologen überlassen bleibt. Zur Umsetzung dieses Prinzips entwickelt der Deutsche Wetterdienst das Verfahren AutoVOR (Abbildung 1-8). Es zeichnet sich ab, dass auch andere Wetterdienste beginnen, einen ähnlichen Weg in der operationellen Wettervorhersage zu beschreiten.

6 Wahrscheinlichkeiten in der Wettervorhersage

Die Ungenauigkeit einer einzelnen Modellvorhersage liegt in der Unsicherheit der Anfangsbedingungen und in der Näherungslösung der atmosphärischen Gleichungen. Um die Unsicherheiten der Vorhersage zu beschreiben, geht man zu Ensemblevorhersagesystemen über, die entweder durch eine Kombination verschiedener Modelle („Multi Model“) oder durch Variationen eines einzelnen Modells („Single Model“) gekennzeichnet sind. Für die mittelfristigen Wettervorhersagen verwendet der DWD erfolgreich die Ensemblevorhersagen des EZMW. Das operationelle Ensemblevorhersage-System EPS des EZMW besteht aus einer Basis-Vorhersagerechnung und einem Ensemble aus 50 Vorhersagerechnungen mit anders ausgewählten Anfangsbedingungen, kombiniert mit Variationen in der Modellphysik. Die veränderten Anfangsbedingungen werden mit Hilfe von stochastischen Störungen als auch mit Hilfe von „singular vectors“ erzeugt. Letztere kennzeichnen Störungen, die innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls maximal anwachsen und üblicherweise in Gebieten starker Baroklinität zu finden sind (BUIZZA 2005). Die Ensemblevorhersagen des EZMW sind eine grundlegende Hilfe bei der frühzeitigen Vorhersage von Orkanen wie z. B. Kyrill. Auch im Bereich der Kürzestfristvorhersagen wird der DWD auf die Ensemble-Rechnungen setzen. Hierfür kommt das Regionalmodell COSMO-DE unter Nutzung der gestiegenen Rechenleistung des neuen DWD-Großrechners zum Einsatz. Man verspricht sich dadurch u.a. Verbesserungen in der Vorhersage starker Konvektion insbesondere im Warnmanagement unter Nutzung des Verfahrens AutoWARN.

Die Kombination verschiedener Modelle zur Beschreibung der Vorhersageunsicherheit bezeichnet man als Multi-Model-Ensemble. Beispielsweise werden in Europa von 20 nationalen Wetterdiensten täglich Regionalmodellvorhersagen gerechnet, die zu einem „Poor Man’s“ -Ensemble zusammengefasst werden können. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen eines warnwürdigen Wetterereignisses, wie z.B. Starkniederschläge, wird durch die Anzahl der Modelle pro Gitterpunkt, welche entsprechend hohe Niederschlagswerte vorhersagen, bestimmt. Die Erfahrungen in der operationellen Wettervorhersage mit dem „Poor Man’s-Ensemble“ sind äußerst positiv. Im Beitrag 3 „Nutzung von Ensemble-Prognosen im Vorhersagedienst“ sind die operationell im DWD verwendeten Ensemblevorhersagesysteme beschrieben.

Der Schritt von der Stichprobe aus Ensembles bis zur Wahrscheinlichkeitsverteilung stellt sich als Interpretation des

Ensembles dar, wofür z.B. das statistische Postprocessing dienen kann. Solche Interpretationen sind wichtig, um die Wahrscheinlichkeitsaussagen objektivieren zu können. Insbesondere finden Wahrscheinlichkeitsaussagen in Form von Prozentzahlen inzwischen auch in der operationellen Wettervorhersage Eingang. Die Kommunikation der Prozentzahlen im Zusammenhang mit dem Eintreten eines Wetterereignisses (z. B. Regenwahrscheinlichkeit) ist allerdings weder bei den Nutzern im Katastrophenschutz, noch in der Bevölkerung bisher umgesetzt beziehungsweise ausreichend kommuniziert worden. Hierbei muss noch sehr viel Entwicklungsarbeit geleistet werden.

7 Entwicklungen im operationellen Wettervorhersagedienst

Es gehört zu den wichtigsten staatlichen Aufgaben, die Bevölkerung vor Gefahren bei Unwettern durch die frühzeitige Herausgabe von Unwetterwarnungen zu schützen.

Zu diesem Zweck hat der DWD in der operationellen Wettervorhersage ein dreistufiges Warnsystem eingeführt, das aus den Frühwarninformationen, den Vorwarnungen und den eigentlichen Wetter- bzw. Unwetterwarnungen besteht. Die Mehrstufigkeit des Warnsystems gewährleistet mit Annäherung des gefährlichen Wetterereignisses die Herausgabe immer detaillierterer Informationen auf Landkreisebene. Je nach Vorlaufzeit und Wetterereignis kommen eine Auswahl von Modelldaten, Verfahren und Beobachtungssystemen zur Anwendung, die zu einem optimierten Warnvorschlag führen. Diese Warntätigkeit nimmt inzwischen einen großen Anteil an der Arbeit der Regionalzentralen ein. Das dreistufige Warnsystem des DWD zusammen mit der Verifikation der Warnprodukte ist im Beitrag 4 „Wetterwarndienst“ näher beschrieben.

Zu den wichtigsten Abnehmern der Warnungen gehören die Behörden und Einrichtungen des Katastrophenschutzes in Bund und Ländern, die Feuerwehren und Technischen Hilfsdienste, sowie die Polizei. Für Feuerwehren hat der DWD ein Internet-basiertes Informationssystem FeWIS entwickelt, das die Warnungen kompakt und nach individuellen Gesichtspunkten ausgibt. Zu den Schlüsselkunden zählen ebenfalls die Hochwasserzentralen der Länder, die bereits ab dem Bereich der Frühwarnung durch den DWD im Rahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes versorgt werden. Meteorologische Daten, Modellergebnisse, spezielle Produkte und Warninformationen des DWD bilden im Ereignisfall die Grundlage für die Hochwasserberechnungen durch die Landeshochwasserzentralen und die daraus abgeleiteten Katastrophenschutzmaßnahmen. Nicht zuletzt ist die Information der breiten Öffentlichkeit über bevorstehende Wettergefahren besonders wichtig.

Die in dem Beitrag 2 „Struktur und Methodik der operationellen Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst“ näher beschriebene und zur Zeit gültige Struktur und Arbeitsweise in der Wettervorhersage und im Warnmanagement des DWD werden zur Zeit einer stärkeren Zentralisierung und Automation unterworfen. Künftig wird die Erzeugung der synoptischen Basisprodukte und die mit Hilfe des Verfahrens AutoWARN teilautomatisch erstellten Wetter- und Unwetterwarnungen zentral am Standort Offenbach in der **V**orhersage- und **B**eratungs**z**entrale (VBZ) des DWD erfolgen. Hier wird das **N**ationale **W**arn**z**entrum (NWZ) mit Wetterüberwachung und Warndienst für die gesamte Bundesrepublik eingerichtet.

Auch die zentrale Produktion von synoptischen Arbeitskarten (thematische Karten wie Bodendruck- und Bodenvorhersagekarten) in der VBZ wird durch den Einsatz von NinJo und dem interaktiven grafischen Editor verändert werden. Durch „On-Screen“-Bodendruck- und Frontenanalysen sollen warnwürdige Wettererscheinungen grafisch aufbereitet werden. Die Zusammenschau aller Einflussgrößen (Jetstream, Trogachse, Potenzielle Vorticity, Vertikalbewegung usw.) in der Analysen-Arbeitskarte wird dem Supervisor und dem Warnmeteorologen als kompaktes und informatives Hilfsmittel zur besseren Diagnose der aktuellen Wetter- und Warnlage dienen.

Die Regionalzentralen, die zurzeit auch für das Warnmanagement verantwortlich sind, werden in **R**egionale **W**etter**b**eratungen (RWB) umgewandelt. Die bisherigen Standorte Hamburg, Essen, Potsdam, Leipzig, Stuttgart und München bleiben bestehen. Die RWBen versorgen in der Region die Katastrophenschutz- und Hochwassereinrichtungen der betroffenen Bundesländer mit allen notwendigen Wetterinformationen, beraten auf der Grundlage zentral erstellter Vorhersage- und Warnprodukte, informieren die Öffentlichkeit und vertreiben Daten und spezielle Produkte an Kunden.

Nicht weniger von Bedeutung sind die Vorhersagen und Warnungen im Bereich des Seewetterdienstes, die in der **R**egional- und **S**eewetter**z**entrale (RSZ) Hamburg erarbeitet werden. Der Seewetterdienst überwacht maritim-meteorologisch die Teilgebiete der Nord- und Ostsee, andere europäische Gewässer und das Mittelmeer und warnt vor Starkwind, Sturm und Orkan und berät spezielle maritime Nutzer und Hilfsorganisationen. Die Aktualisierung der Wasserstandsvorhersagen der Mündungsgebiete von Elbe, Weser und Ems durch treffsichere Windvorhersagen sowie die Beratung des Eisdienstes des BSH und der Forschungsschiffe in den Polargebieten gehören zu den wesentlichen Aufgaben der operationellen Seewettervorhersage. Eine detaillierte Beschreibung des Seewetterdienstes findet man im Beitrag 5 „Seewettervorhersage“.

8 Ausblick

Während die Wettervorhersage insgesamt durch die Fortschritte in der numerischen Wettervorhersage anerkannt zuverlässiger geworden ist, gibt es Wetterphänomene, welche noch nicht zufriedenstellend vorhersagbar sind. Dazu gehören konvektive Systeme und Starkniederschlagsereignisse, insbesondere im Zusammenhang mit

sommerlichen Gewitterlagen, die Grenzschicht mit Nebelbildung und Inversionen, Vereisung und Turbulenz. Besonders im Bereich des Katastrophenschutzes auf Länder- und Landkreisebene sowie im Bereich der Luftfahrt steigen die Anforderungen an die räumliche und zeitliche Auflösung der Vorhersagen und Warnungen. Die gestiegenen Anforderungen sind bei allen Entwicklungsaufgaben zu berücksichtigen.

Der DWD arbeitet daran, durch Ensemblerechnungen lokaler Modelle, durch Erweiterung und Verbesserung der meteorologischen Verfahren, durch statistisches Postprocessing und durch Nowcasting auf der Grundlage moderner Messmethoden (Dual-Polarisationsradar, hoch aufgelöste Satellitenscandaten, Integrierte Flughafensysteme usw.) die Vorhersage zu verbessern. Durch die Zentralisierung und Automation wird die operationelle Wettervorhersage ihre Methoden und Arbeitsprozesse verändern. Dazu trägt auch das moderne Informations- und Präsentationssystem NinJo bei, welches eine Vielzahl moderner Verfahren (z.B. AutoWARN) integriert und hergebrachte Arbeitstechniken (z.B. synoptische Handanalyse) durch On-Screen-Verfahren ersetzen wird. Davon dürfte auch die Qualität der Unwetterwarnungen speziell im Kürzestfristbereich profitieren. Wichtig ist, dass die probabilistische Vorhersagemethodik weiter ausgebaut wird.

Unter diesen Voraussetzungen werden in den nächsten Jahren weitere Fortschritte in der Verbesserung der Wettervorhersage und des Warnmanagements möglich und die Effizienz der Vorhersagestruktur gesteigert werden. Damit beschreitet der DWD den Weg, den auch andere fortschrittliche Wetterdienste einschlagen.

Literatur

BALZER, K., 2002: Zum Mensch-Maschine-Konflikt in der Wettervorhersage. *Promet* **28**, 1/2, 46 – 54.

BUIZZA, R., 2005: EPS skill improvements between 1994 and 2005. *ECMWF Newsletter* **104** – Summer 2005, 10-14.

GÖBER, M., 2008: Verifikationsbericht zur Güte lokaler Wettervorhersagen Nr. 37. *Deutscher Wetterdienst*, Offenbach, 64 S.

GÖBER, M., 2009: Verifikationsbericht zur Güte lokaler Wettervorhersagen Nr. 39. *Deutscher Wetterdienst*, Offenbach, 61 - 77.

HOFFMANN, J., 2008: Entwicklung und Anwendung von statistischen Vorhersage-Interpretationsverfahren für Gewitternowcasting und Unwetterwarnungen unter Einbeziehung von Fernerkundungsdaten. Dissertation, Freie Universität Berlin.

WOODS, A, 2006: Medium-Range Weather Prediction. *Springer Science and Business Media*, New York, 270 pp.

Liste der Abkürzungen

BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
DWD	Deutscher Wetterdienst
EPS	Ensemble Prediction System
EUMETSAT	European Organisation for the Exploratation of Meteorological Satellites
EZMW	Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen
MOS	Model Output"-Statistik
SAF	Satellite Application Facility

promet, Jahrg. 35, Nr. 1-3, 12-22
© Deutscher Wetterdienst 2010

S. KRENOVSKY, B. ANGER, K. BÄHNKE, J. HOFFMANN, A. ENGEL

2 Struktur und Methodik der operationellen Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst (DWD)

Structure and methodology of operational weather forecasting at the Deutscher Wetterdienst (DWD)

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird der moderne operationelle Wettervorhersagedienst im DWD beschrieben, wobei der Schwerpunkt darauf gelegt wird, was sich an traditioneller Synoptik auch heute noch wieder findet und worin sowohl organisatorisch wie auch methodisch die wesentlichen Änderungen gegenüber der früheren synoptischen Arbeit im Vorhersagedienst bestehen. Zum heutigen Zeitpunkt unterscheidet man den zentralen Vorhersagedienst unter der fachlichen Führung eines überregional arbeitenden Supervisors (Chefmeteorologe) in der Vorhersage- und Beratungszentrale in Offenbach vom regionalen Vorhersage- und Warndienst mit Zuständigkeit für die Bereiche der 6 Regionalzentralen in Hamburg, Potsdam, Essen, Leipzig, Stuttgart und München plus dem in die VBZ integrierten Regionalanteil in Offenbach. Eingegliedert in den Vorhersagedienst der Zentrale in Offenbach ist die Produktion von meist standardisierten Wettervorhersagen für die Medien.

Abstract

This article is a description of the DWD's modern operational weather forecasting service. A special emphasis is being placed on which elements of traditional synoptic meteorology are still in use and what the major organisational and methodological changes are as compared with the former synoptical work in the field of forecasting. Nowadays, a differentiation is made between the 'Central Forecasting Service' led by a supra-regionally acting 'supervisor' (meteorologist-in-chief) at the Weather Forecasting and Advisory Centre (VBZ) in Offenbach on the one hand and, on the other, the 'Regional Forecasting and Warning Services' provided for their area by the DWD's 6 Regional Centres in Hamburg, Potsdam, Essen, Leipzig, Stuttgart and Munich and by the regional component of the VBZ at Offenbach. Forecasting services at Offenbach also incorporate the production of mostly standardised weather forecasts for the media.

1 Einleitung

Bereits zweimal wurde in früheren Promet-Ausgaben über die Arbeit des operationellen Wettervorhersagedienstes des DWD berichtet, nämlich 1982 und 1995/1996. Nach weiteren 14 Jahren ist nun erneut die operationelle Wettervorhersage Gegenstand einer Promet-Ausgabe, wobei diesmal der Schwerpunkt darauf gelegt wird, was sich an traditioneller Synoptik im modernen Wettervorhersagedienst noch wieder findet und worin sowohl organisatorisch als auch methodisch die wesentlichen Veränderungen bestehen.

Mit Einführung des Qualitätsmanagements im DWD wurde die synoptische Meteorologie in den strategischen Prozess „Wettervorhersage und Warndienste" eingebettet. Organisatorisch steht dabei den fünf **R**egionalzentralen (RZ) sowie der **R**egional- und **S**eewetterzentrale **H**amburg (RSZ) als regionale Komponenten die **V**orhersage- und **B**eratungszentrale (VBZ) in Offenbach als zentrale Komponente mit integriertem Regionalanteil gegenüber (Abb. 2-1).

Die 7 Regionalzentralen und ihre Zuständigkeitsbereich
(Der Bereich der RZ Offenbach ist der VBZ angegliedert)

Abb. 2-1: Zuständigkeitsbereiche der Regionalzentralen des DWD.

2 Struktur der operationellen Vorhersage

Mit Reduktion der Anzahl der früheren Wetterämter (ein Wetteramt pro Bundesland) auf sechs regionale Vorhersagezentralen (5 RZn und 1 RSZ) plus der regionalen Komponente der VBZ in Offenbach kam es zu einer Neustrukturierung der Arbeitsabläufe und Zuständigkeiten im operationellen Vorhersagedienst des DWD. Dabei wurden die Zuständigkeitsbereiche der regionalen Vorhersagezentralen im Vergleich zu den früheren Wetterämtern größer, zugleich wurde es für die VBZ einfacher, den gesamten Vorhersageprozess im Wetterdienst zu steuern.

Damit wird nicht zuletzt dem Umstand Rechnung getragen, dass in den letzten zehn Jahren die Darstellung der Arbeitsergebnisse des DWD für die Öffentlichkeit über das Medium des Internets sehr große Bedeutung erlangt hat. Der Nutzer des Internets nimmt aber allein aufgrund der Art der grafischen Präsentation von Wettervorhersagen- und warnungen nicht mehr so sehr die Arbeit der einzelnen Regionalzentralen wahr als vielmehr das Gesamtbild für ganz Deutschland. Von diesem Gesamtbild wird selbstverständlich erwartet, dass es ein nachvollziehbares und in sich schlüssiges Vorhersage- und Warnkonzept wiedergibt und keine Brüche an den Bundesländergrenzen sowie an den Grenzen zu den Nachbarländern durch mögliche unterschiedliche synoptische Sichtweisen der Regionalzentralen aufweist.

Dies erfordert eine steuernde Instanz, die man in Person des **Supervisors** in der Vorhersage- und Beratungszentrale geschaffen hat. Dessen Hauptverantwortlichkeit ist es, ein einheitliches nationales Vorhersage- und Warnkonzept durch eine entsprechende überregionale Guidance und Steuerung sicherzustellen. Dies geschieht vor allem mittels der von ihm geleiteten täglichen Konferenzgespräche mit den RZn (Abb. 2-2).

Abb. 2-2: Schematischer Arbeitsablauf im operationellen Vorhersage- und Warndienst des DWD.

Darüber hinaus sind als wesentliche Aufgaben zu erwähnen:

- Wissenschaftliche Begründung für das Analyse-Vorhersage- und Warnkonzept und Darstellung der physikalischen Abläufe und Ursachen für die erwartete Wetterentwicklung in Form von schriftlichen Leitberichten.
- Finden von Lösungen bei widersprüchlichen Modellvorhersagen bzw. divergierendem Verlauf von modellierter und tatsächlicher Entwicklung durch Auswertung von Kurzfrist-Ensemble-Vorhersagen.
- Darstellung von möglichen Alternativen, Einschätzung des Vertrauensgrades der verschiedenen Alternativen und Begründung der Vorhersagebasis.

3 Methodik

3.1 Zentraler Vorhersagedienst

Die eingangs erläuterten verschiedenen Namensgebungen über die Jahre deuten die Richtung der Entwicklung nur recht ungenau an. Zwar ist im Jahre 1995 mit der Umbenennung von Analysen- und Vorhersagezentrale in Zentrale Vorhersage der Begriff „Analyse“ aus dem Namen der zentralen Organisationseinheit verschwunden; dies war jedoch rein organisatorisch und nicht methodisch begründet. Nach wie vor nimmt die **Wetteranalyse** einen wichtigen Platz im Rahmen des Vorhersageprozesses ein.

Bereits seit einigen Jahrzehnten gibt es eine Koexistenz zwischen den numerischen Analysen als Basis für die Modellprognosen und den Handanalysen. Nahezu seit einem Vierteljahrhundert ist die Analyse von Potential- und Temperaturverteilung auf den Standarddruckflächen nun schon eine reine Domäne der Numerik. Geblieben ist die manuelle Analyse der Bodenwetterkarten mit Isobaren und Fronten und man mag sich fragen, welche Berechtigung diese Tätigkeit heute in Anbetracht der technischen Möglichkeiten, numerische Analysen beliebiger Felder zu visualisieren, überhaupt noch hat.

Es gibt aber durchaus gute Gründe für die traditionelle Analyse der Bodenwetterkarte im Rahmen der operationellen Wettervorhersage. Die Analyse bewährt sich immer dann, wenn es unter Nutzung aller verfügbaren Informationen gelingt, den **aktuellen Wetterzustand** so darzustellen, dass im Sinne der konzeptionellen Modelle eine Wettersituation und die damit verbundenen Prozesse verstanden werden können. Dabei sind es vor allem die frontalen Strukturen, seien es mesoskalige Gewitterlinien während der Sommersaison oder Frontalwellen mit dem Potential zur Sturmzyklogenese während des Winters, die einer detaillierten Analyse bedürfen.

Die Bodenwetterkarten werden im Europa-Ausschnitt in festen 3-stündigem Zeitintervallen (00, 03, 06,... 21 UTC) und im Europa-Nordatlantik-Ausschnitt (00, 06, 12 und 18 UTC) analysiert. Beim Europa-Ausschnitt geht es vor allem darum, Feinstrukturen zu erkennen, die für die kürzestfristige Wetterentwicklung in Mitteleuropa von Bedeutung sind. Im Europa-Nordatlantik-Ausschnitt steht die Erkennung der relevanten Strukturen im synoptischen Scale im Vordergrund, wobei die Abbildungen 2-3, 2-4 und 2-5 zeigen, wie mit modernen Hilfsmitteln in einer Bodenwetterkarte mittels manueller Analyse signifikante Strukturen sichtbar gemacht werden können, die sonst nur schwer erkennbar wären. Um die mit dem roten Kreis in Abb. 2-3 markierte Warmfrontwelle über dem östlichen Atlantik manuell herausarbeiten zu können, bedient man sich seit Neuestem eines Hilfsmittels, das sich besonders in Gebieten mit nur wenigen Messstationen bzw. Beobachtungen als besonders wertvoll herausgestellt hat. So sind auf den polarumlaufenden Satelliten der neuesten Generation (Metop) Mikrowellensender (Scatterometer) im Einsatz, mit denen ein aktives Abtasten der Erdoberfläche möglich ist. Meeresoberflächenwinde rufen eine charakteristische Welligkeit der Wasseroberfläche hervor, die die Rückstreueigenschaften so beeinflusst, dass hieraus auf die Windgeschwindigkeit und -richtung geschlossen werden kann. Auf diese Weise ist mit den Scatterometern in einem Streifen an der Meeresoberfläche unterhalb der Zugbahn eine indirekte Windmessung möglich.

Die Warmfrontwelle war anhand der Bodenbeobachtungen sowie auch allein anhand des konventionellen Meteosat-IR-Bildes nicht erkennbar, sehr wohl jedoch mithilfe der Scatterometerwinde (Abb. 2-4, 2-5).

Wenn auch nicht von vorrangiger Bedeutung, so ist festzustellen, dass die einzig mit Stations- bzw. Beobachtungsdaten versehenen manuell zu analysierenden Bodenwetterkarten im kleineren Europa-Ausschnitt etwa 90 Minuten und im größeren Nordatlantik-Ausschnitt etwa zwei Stunden nach Hauptbeobachtungstermin früher zur Bearbeitung vorliegen als die gerechneten Modellanalysen, die beide erst etwa 2,5 Stunden nach Modelltermin fertig gestellt sind. Die zur manuellen Analyse gehörenden Hilfskarten (Temperatur- und Druckfelder) können demzufolge immer nur kurzfristige Prognosen sein und keine Analysen und sind daher mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten. In einigen Fällen, die allerdings selten geworden sind, lassen sich mit einer guten manuellen Analyse auch Fehler in der numerischen Vorhersage rasch entdecken und ggf. beurteilen.

Von Bedeutung ist wiederum die traditionelle Analyse nach wie vor als Glied einer Kette, bestehend aus der Bodenwetterkarte und einer Serie von Bodenvorhersagekarten (mit Fronten). Mit keinem anderen Hilfsmittel ist ein Wetterablauf so klar zu strukturieren und einfach zu verstehen, weil es sich auf die wesentlichen Merkmale beschränkt. Vervollständigt wird das „Gesamtbild" oder die „Zusammenschau" (Synoptik) durch die ganze Fülle der numerischen Produkte. Entscheidend dabei ist, dass es gelingt ein stringentes Konzept zu entwerfen, das sich von der Analyse bruchlos bis in alle Vorhersagen hinein verfolgen lässt.

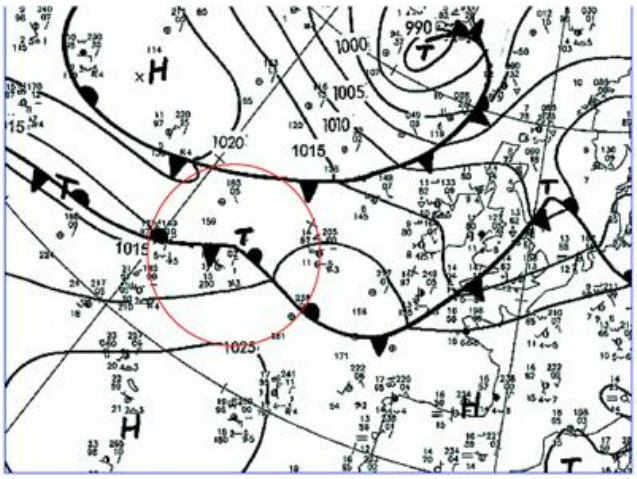


Abb. 2-3: Ausschnitt der Europa-Nordatlantik-Bodenwetterkarte vom 15.10.2008, 00 UTC.

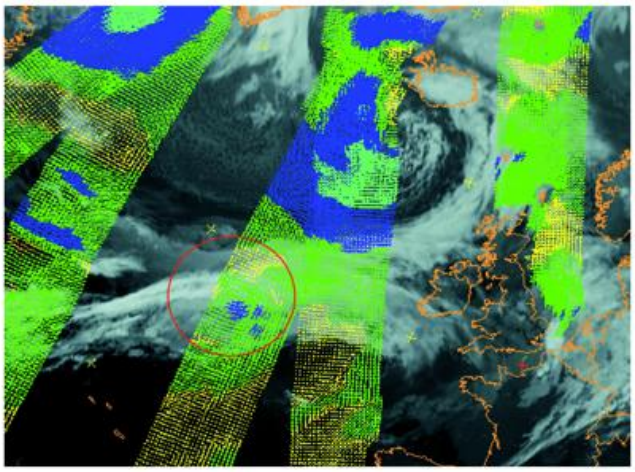


Abb. 2-4: IR-Bild von Meteosat 9 vom 14.10.2008, 23 UTC, mit METOP/ERS.

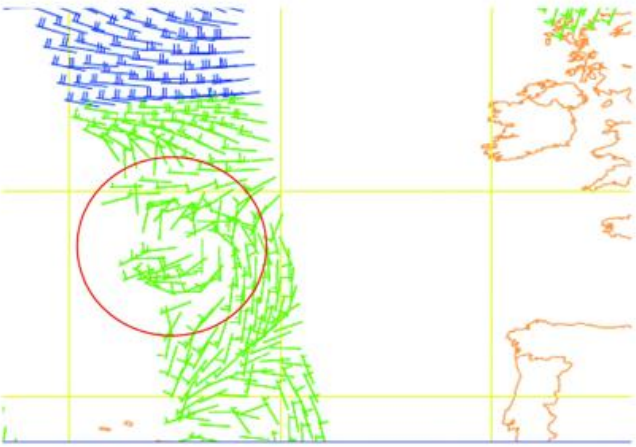


Abb. 2-5: Vergrößerte Kompositdarstellung der Scatterometer-Windfieder.

Aus diesen Feststellungen geht bereits hervor, dass auch die **Bodenvorhersagekarten** (Abb. 2-6) ihre Bedeutung behalten haben. Deren Struktur wurde gegenüber der Vergangenheit etwas verändert. Der besseren Übersichtlichkeit ist es geschuldet, dass die bis vor einigen Jahren noch dargestellten Wolkengebiete nicht mehr enthalten sind. Der Vorhersagezeitraum, der bis Anfang des Jahrzehnts noch bei 72

Stunden endete, wurde inzwischen erweitert und deckt nun das Intervall bis zum 4. Folgetag ab (108 Stunden).

Die wichtigsten Prozessschritte auf dem Weg zu zentral und regional erstellten Vorhersageprodukten sind die **Wetterdiagnose** und darauf aufbauend die Erarbeitung eines **Vorhersagekonzepts**. Wie sich dabei die Gewichte im Laufe der Jahre verschoben haben, lässt sich ganz gut an der von der VBZ erstellten **synoptischen Übersicht** ablesen. Zu Zeiten der ehemaligen AVZ (**A**nalysen- und **V**orhersagezentrale) war für eine solche Übersicht nur eine halbe DIN-A4-Seite vorgesehen. In knapper Form wurde quasi eine Bildbeschreibung der Vorhersagekarten vorgenommen, wobei der Vorhersagezeitraum anfangs nur 48, später dann 72 Stunden umfasste. Zu warnwürdigen Wetterereignissen wurde so gut wie gar nicht Stellung genommen, galt doch das Warnwesen als Domäne der damaligen Wetterämter, in das die Zentrale tunlichst nicht hineinzuregieren hatte.

Methodisch konnte auch noch nicht von einer Diagnose gesprochen werden. Dies änderte sich dann Mitte der 80er Jahre, als verstärkt die klassische quasigeostrophische Diagnostik zum Einsatz kam, die dann auch durch die IPV-Diagnostik (IPV = **i**sentrope **p**otentielle **V**orticity) nach HOSKINS ergänzt wurde. Es ging nun nicht mehr nur darum, einen Ablauf rein phänomenologisch zu beschreiben, sondern physikalisch relevante Prozesse aktuell und mit Hilfe geeigneter Felddarstellungen der Modellprognosen zu erkennen, um so eine Grundlage für den Vorhersagedienst in Form einer synoptischen Übersicht zu formulieren, mit der eine optimale Einschätzung der Entwicklung möglich war. Ergänzend zu den Übersichten wurden nun auch **Warnhinweise** auf warnwürdige Wetterereignisse innerhalb von Deutschland für die nächsten 24 Stunden herausgegeben.

Die quasigeostrophische Diagnostik war in ihren Anfängen auf die zur damaligen Zeit vorhandenen operationellen Modelle mit Gitterweiten von 200 bis 300 Kilometern zugeschnitten. Mit Übergang zu den hoch auflösenden Modellen hat sich die Diagnostik und die Vorhersagemethodik innerhalb der letzten 10 bis 15 Jahre noch einmal ganz entscheidend verändert, wobei als Gründe aufzuführen sind:

- Verfügbarkeit von Informationen einer Fülle globaler, regionaler und lokaler Vorhersagemodelle mit zeitlich und räumlich hoher Auflösung,
- Ausbau und Vervollkommnung der Fernerkundungsverfahren (MSG, Radarprodukte einschließlich KONRAD, Blitzortung),
- Möglichkeiten der kombinierten Visualisierung von Beobachtungs- und Fernerkundungsdaten und Produkten der numerischen Modelle mit Hilfe von graphischen Arbeitsplatzsystemen (NinJo, davor MAP).

In der modernen Synoptik ist an die Stelle der reinen quasigeostrophischen Diagnostik das Arbeitsprinzip der **konzeptionellen Modelle** getreten. Ein konzeptionelles Modell beschreibt die für die wesentlichen meteorologischen Erscheinungsformen ablaufenden physikalischen Prozesse und die Methode, mit den verfügbaren Informationen die Strukturen einzuordnen. Damit hat der Meteorologe die Aufgabe, die verfügbare Vielzahl von Informationen völlig unterschiedlicher Art, seien es herkömmliche synoptische Beobachtungen, Satellitendaten und andere Fernerkundungsdaten oder Ergebnisse der Modellrechnung zusammenzufügen und damit die wesentlichen Charakter-

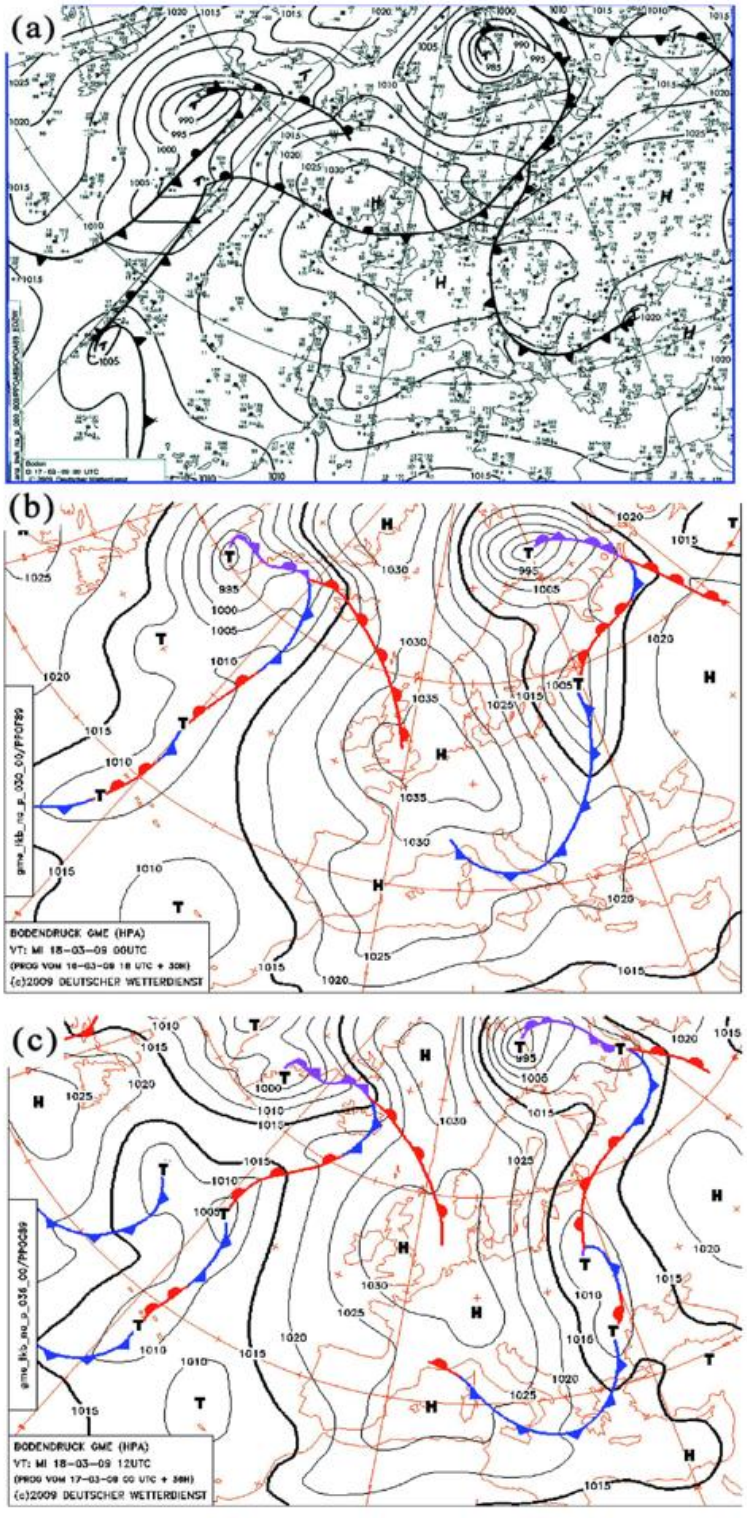


Abb. 2-6 (a), (b) und (c): Sequenz von Bodenanalyse und Bodenvorhersagekarten vom 17. und 18. März 2009.

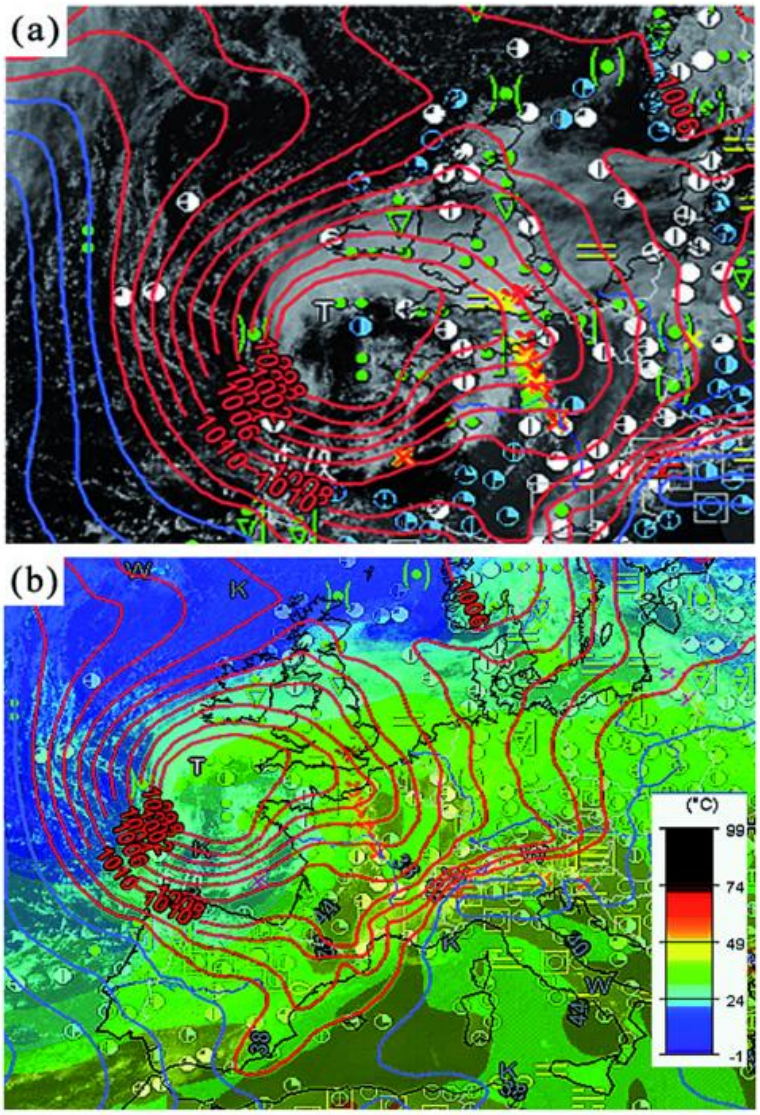


Abb. 2-7 (a): Bodendruckverteilung (GME), Meteosat 8 HRV-Bild, Blitzortung und Synop-Beobachtungen vom 13.5.2007, 12 UTC. 2-7 (b): Bodendruckverteilung und potentielle Äquivalenttemperatur in 850 hPa (GME), Meteosat 8 HRV-Bild (gedimmt), Blitzortung und Synop-Beobachtungen vom 13.5.2007, 12 UTC.

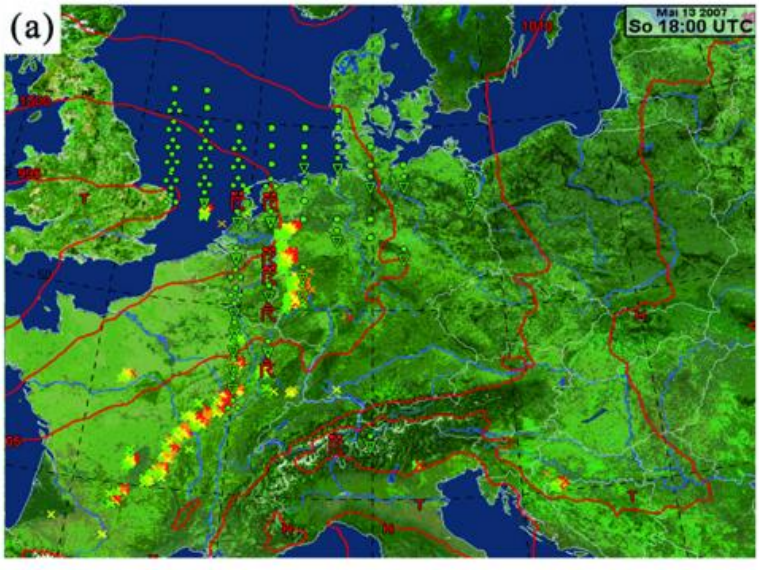


Abb. 2-8 (a): Blitzbeobachtungen am 13.5.2007, 17 UTC, sowie vorhergesagte Druckverteilung und signifikantes Wetter (COSMO-EU + 06 Stunden).

züge der zum jeweiligen Zeitpunkt relevanten meteorologischen Strukturen und Prozesse zu verstehen.

Die Bilderserie der Schwergewitterlage vom 13. Mai 2007 (Abb. 2-7, 2-8) soll die Möglichkeiten der modernen Diagnostik und Kurzfristprognose veranschaulichen. Aus der Bildfolge wird deutlich, dass über Südengland und Nordfrankreich ein linienhafter Gewitterherd vorhanden ist, gekoppelt an eine Kaltfront und eingebettet in ein markantes isallobarisches Feld. Es wird der Fortschritt auf dem Gebiet der Fernerkundung erkennbar, der es ermöglicht, eine solche Struktur hinsichtlich Position und Intensität genau zu vermessen. Die Koppelung an die meteorologischen Felder ermöglicht dann eine Diagnose. Eine Kürzestfristvorhersage wäre auf diese Weise schon mit Hilfe traditioneller Extrapolationsverfahren möglich. Die Frage ist, welches der Nutzen der Modellergebnisse für die Prognose ist.

In den letzten Jahren sind vor allem die hoch auflösenden DWD-Modelle COSMO-EU und COSMO-DE zu einer wichtigen Säule im Vorhersagedienst geworden. Dabei steht nicht mehr so sehr die Nutzung der traditionellen Basisfelder im Vordergrund, sondern die Fülle abgeleiteter Größen wie z.B. signifikantes Wetter oder Böen. In vorangegangenen Jahrzehnten sah sich der Synoptiker in der Situation, aus wenigen verfügbaren Produkten der numerischen Vorhersage durch Einbringen seiner Erfahrung eine Vorhersage abzuleiten. Heute ist diese Erfahrung eher notwendig, um rasch zu erkennen, in welcher Situation welche Auswahl aus der Fülle der verfügbaren Darstellungen zu treffen ist. So werden z.B. für die Prognose des signifikanten Wetters üblicherweise Pseudosynops verwendet. Sie sind das Ergebnis des Postprocessings der Modelle. Alternativ stehen z.B. für die Gewittervorhersage auf der Basis von COSMO-DE Vorhersagen der Radarreflektivität zur Verfügung, das heißt die Prognose des konvektiven Niederschlags lässt sich in Form von Pseudo-Radarbildern darstellen. Die folgenden Abbildungen zeigen, dass eine solche unkonventionelle Darstellungsform durchaus Vorteile haben kann.

In Abb. 2-8 (a) erkennt man zum bereits dargestellten 17 UTC-Termin (COSMO-EU 12 + 05 Stunden) die Pseudosynops und die Bodendruckvorhersage in Form zweier Isobaren, die der Darstellung der beobachteten Blitze (farbige Kreuze) überlagert wurden. Man sieht, dass nicht nur die linienhafte Struktur der Gewitter, sondern auch ihre Lage vom Modell gut herausgearbeitet wurde. Nicht erkennbar ist jedoch, wo der Kernbereich der mesoskaligen Struktur liegt. Dies zeigen die Bilder der vom COSMO-DE prognostizierten maximalen Radarreflektivität. In der 8h- Prognose (Abb. 2-8 (b)) auf der Basis des 09 UTC-Laufs erkennt man im Bereich Moselmündung

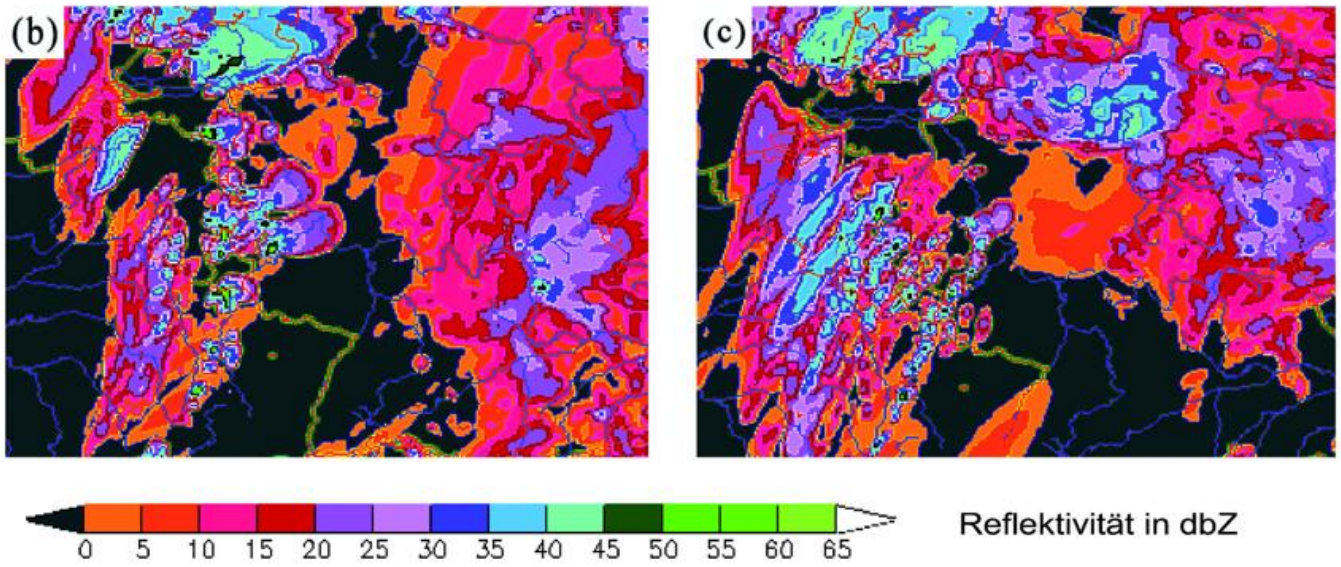


Abb. 2-8: Vorhergesagte Radarreflektivitäten für den 13.5.2007, 17 UTC, ((b) COSMO-DE + 8 Stunden, (c) COSMO-DE + 05 Stunden).

– Kölner Bucht zwei zirkulare Strukturen, die auf Superzellen hindeuten. In der fünfstündigen Prognose von 12 UTC (Abb. 2-8 (c)) tritt dieses Signal schwächer in Erscheinung. Somit werden die Möglichkeiten, aber auch die Probleme der Arbeit mit zeit- und räumlich hoch auflösenden Modellen deutlich. Sie sind manchmal verblüffend gut in der Lage, mesoskalige Strukturen zu modellieren, andererseits können die Ergebnisse von Modelllauf zu Modelllauf sehr stark variieren, und in vielen Fällen gelingt es nicht vor Eintreten des Ereignisses zu entscheiden, welche der angebotenen Varianten die höchste Eintreffwahrscheinlichkeit hat. Das Beispiel veranschaulicht die Arbeitsmethodik unter Nutzung moderner Hilfsmittel in der Kurz- und Kürzestfristvorhersage und damit auch im Warndienst, der sich ja im Wesentlichen in diesem Zeitscale abspielt.

Der Schwerpunkt der Arbeit im Vorhersagedienst hat sich in den letzten Jahren sehr stark in den Warndienst verlagert und diese Komponente dominiert auch in hohem Maße die Wahrnehmung sowohl innerhalb des Wetterdienstes als auch in der Öffentlichkeit. Darüber tritt fast in den Hintergrund, dass die allgemeine Wettervorhersage, vor allem im Mittelfristzeitraum nach wie vor einen hohen Stellenwert hat. Ein enormer Fortschritt in der numerischen Wettervorhersage wurde ja gerade im Mittelfristbereich erzielt. Dabei spielt eine große Rolle, dass vor allem durch die verfügbaren Darstellungen in NinJo und den Zugang zu Informationen über das Internet eine Fülle von Ergebnissen auch anderer globaler Modelle, teils in deterministischer Form, teils in probabilistischer Form zur Verfügung stehen. Hier sind neben dem globalen Modell des DWD (GME) im Wesentlichen zu nennen:

- Modell des EZMW Reading (verfügbar bis 240 Stunden),
- Modell des NCEP Washington (verfügbar bis 384 Stunden),
- Modell des UK MetOffice Exeter (verfügbar bis 144 Stunden),
- Modell von Meteo France Toulouse (verfügbar bis 96 Stunden).

Von erheblichem öffentlichen Interesse und – denkt man z.B. an die Belange des Tourismus – von großer ökonomischer Bedeutung sind immer wieder die Prognosen vor Feiertagen. Bereits im Frühherbst (!) kommen jeweils von den Medien die ersten Anfragen nach der Möglichkeit „weißer Weihnachten". Um in Anbetracht der Unsicherheit von **Mittelfrist-**

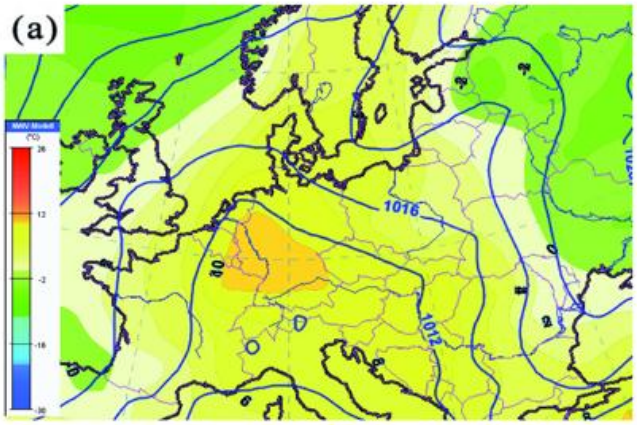


Abb. 2-9 (a): Bodendruck- und Temperaturverteilung in 850 hPa vom 12.4.20099, 12 UTC.

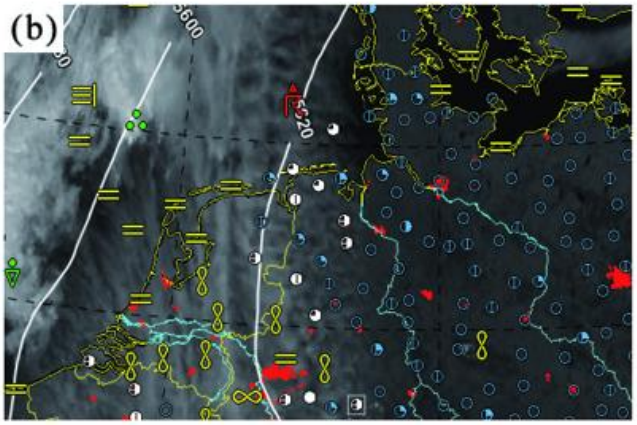


Abb. 2-9 (b): Wetter, Meteosat-HRV-Bild und Geopotential (500 hPa) vom 12.4.2009, 12 UTC.

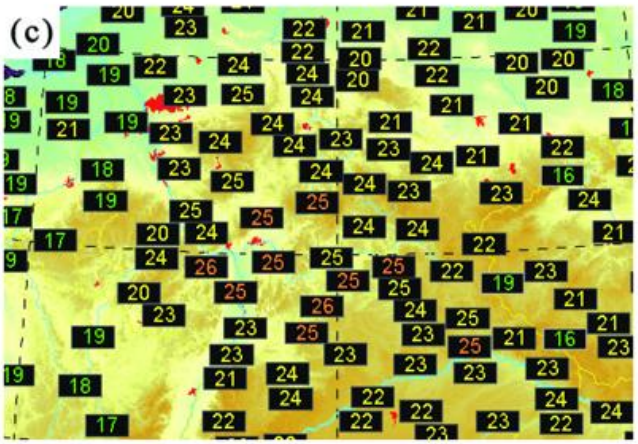


Abb. 2-9 (c): Höchsttemperaturen vom 12.4.2009, 18 UTC.

prognosen eine einigermaßen seriöse Information bieten zu können, gab es früher eine dienstinterne Vereinbarung, maximal fünf Tage vor Feiertagen mit einer Einschätzung an die Öffentlichkeit zu gehen. Mittlerweile enthält das täglich von der VBZ herausgegebene Mittelfristbulletin bereits routinemäßig detailliertere Prognosen bis zum 7. Folgetag und eine Trendprognose bis zum 10. Folgetag. Die in den letzten 10 bis 15 Jahren völlig veränderte Konkurrenzsituation mit den privaten Wetteranbietern lässt keine andere Strategie mehr zu. Bereits zum frühesten Termin, den Modellinformationen abdecken, gehen viele Medien meist schon mit Feiertagsprognosen aus unterschiedlichen Quellen an die Öffentlichkeit.

Ein Beispiel soll die heutigen Grenzen und Möglichkeiten bei der Mittelfristprognose für den Ostersonntag 2009 (12. April) beschreiben. Wie die Abbildungen 2-9 (a) bis (c) zeigen, lag Deutschland im Bereich einer Warmluftblase. Dabei befand sich über einer flachen Tiefdruckrinne am Boden eine Antizyklone in der Höhe (500 hPa). Daher war es überwiegend sonnig, nur im Westen gab es einige Wolken und ganz vereinzelt Schauer und mit Temperaturen bis 26 Grad wurde es frühsommerlich warm.

Wie der Vergleich einiger Prognosen des GME und des EZMW-Modells 144 Stunden und 48 Stunden vor dem Ereignis zeigt, kann auch heute eine Mittelfristprognose noch mit großen Unsicherheiten behaftet sein (Bilder der Abbildungen 2-10 und 2-11). 144-stündig lässt zwar das Modell des EZMW die Struktur der Bodendruckverteilung und die Temperaturverteilung in 850 hPa schon in etwa erahnen; sowohl GME als auch EZMW-Modell zeigen aber für ganz Deutschland Niederschläge und lassen somit einen eher unfreundlichen Witterungscharakter erwarten. 48 Stunden vor dem Verifikationstermin war dann eine sichere Prognose möglich, die dann auch eingetroffen ist. Sie lautete: *„ ...Auch am Ostersonntag scheint weiterhin vielerorts die Sonne und es bleibt meist trocken. Lediglich im Südwesten und Westen entwickeln sich im Tagesverlauf einige Quellwolken, die zu einzelnen Schauern oder Gewittern führen können. Die Temperatur steigt auf 18 bis 24 Grad, lediglich in Küstenregionen, wo der Wind von der kalten Nord- oder Ostsee kommt, wird es nicht so warm. Der Wind ist meist schwach, frischt vor allem in Gewitternähe böig auf und kommt aus unterschiedlichen Richtungen... “*

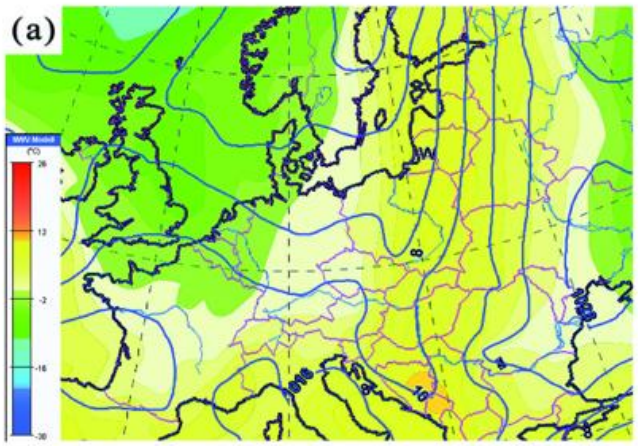


Abb. 2-10 (a): Bodendruck- und Temperaturverteilung in 850 hPa für 12.4.2009, 12 UTC (GME + 144 Stunden) .

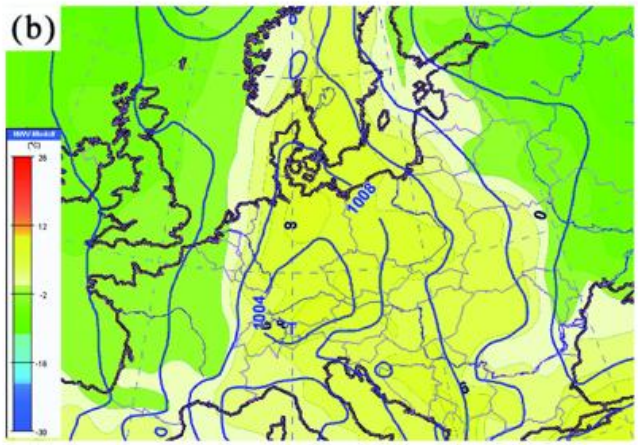


Abb. 2-10 (b): Bodendruck- und Temperaturverteilung in 850 hPa für 12.4.2009, 12 UTC (EZMW + 144 Stunden).

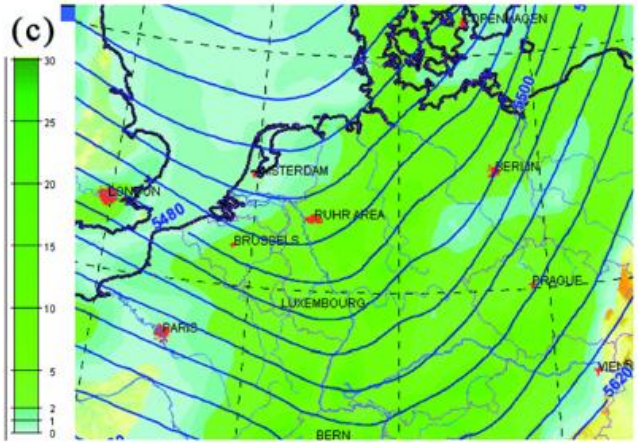


Abb. 2-10 (c): Geopotential 500 hPa und prognostizierte 24h-Niederschlagssumme für 12.4.2009, 12 UTC (GME + 144 Stunden).

Die demonstrierten Unsicherheiten versucht man in der Praxis durch den Rückgriff auf probabilistische Modellergebnisse abzumildern. Deren Einsatz in der Praxis wird in einem gesonderten Beitrag noch beschrieben.

3.2 Regionaler Basisvorhersagedienst im DWD

An den oben genannten sechs Regionalzentralen in Hamburg, Potsdam, Leipzig, Essen, Stuttgart und München

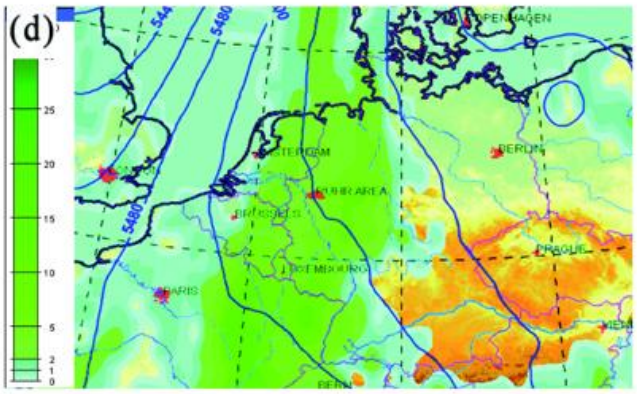


Abb. 2-10 (d): Geopotential 500 hPa und prognostizierte 24h-Niederschlagssumme für 12.4.2009, 12 UTC (EZMW + 144 Stunden).

sowie dem in die VBZ integrierten RZ-Anteil Offenbach werden **Basiswettervorhersagen** erstellt und **Wetterberatungen** im 24-stündigen Wechselschichtdienst durchgeführt. Dabei stellt der Meteorologe vom Dienst das Bindeglied zwischen der wissenschaftlich-operationellen (Vor-)Arbeit innerhalb der einzelnen Zentralen und dem zumeist hoheitlichen Nutzer (Polizei, Feuerwehr, THW, etc.) beziehungsweise dem kommerziellen Kunden dar. Er hat die Aufgabe, die im synoptischen Scale gewonnenen Erkenntnisse auf die für das Vorhersage- und Warnmanagement oder den Kunden erforderliche subsynoptische Größenordnung herunter zu brechen, wie z.B. auf Bundesländer- oder Landkreisgröße oder als Punkt-Termin-Prognose für einen Ort. Somit spielt neben der zunehmend von numerischen Produkten verdrängten klassischen Vorhersage die Erstellung von Warnungen und die Wetterberatung eine immer wichtigere Rolle (Anmerkung: der Warndienst des DWD wird in einem gesonderten Beitrag in diesem Heft behandelt).

Ausgehend vom Analyse- und Vorhersagekonzept der VBZ (vom Supervisor koordiniert und gesteuert) sind das Wettermonitoring (Überwachung) und das Nowcasting (Kürzestfristvorhersage) zentrale Bestandteile der Arbeit des regional arbeitenden Synoptikers auf dem Weg zum Warnmanagement. Dazu werden alle zur Verfügung stehenden aktuellen Daten (z.B. mindestens zwei Mal tägliche an einzelnen Standorten durchgeführte Vertikalsondierungen, alle 60 oder 30 Minuten eingehende Wettermeldungen, alle 15 Minuten (teils alle 5 Minuten „rapid scan"-Bilder) eingehende Satellitenbilder, alle 5 Minuten eingehende Niederschlags-Radarreflektivitäten (alle 15 Minuten Volumenscans), nahezu in Echtzeit aufgenommene Blitzdetektionen) auf ihre Konsistenz und eventuelle Abweichungen von den erwarteten Vorhersagen überprüft.

Dabei führt die unreflektierte Berücksichtigung der eingehenden Daten nicht selten auf eine falsche Fährte. Gerade die Kenntnis der Fernerkundungsverfahren und der (in der Regel) automatischen Interpretation und Weiterverarbeitung der Daten (z.B. Radarsummenbildung) sind von Bedeutung, um das Gefahrenpotential und die Warnrelevanz auftretender Wettererscheinungen beurteilen zu können und in der Regel kostenintensiven „Fehlalarm" zu vermeiden.

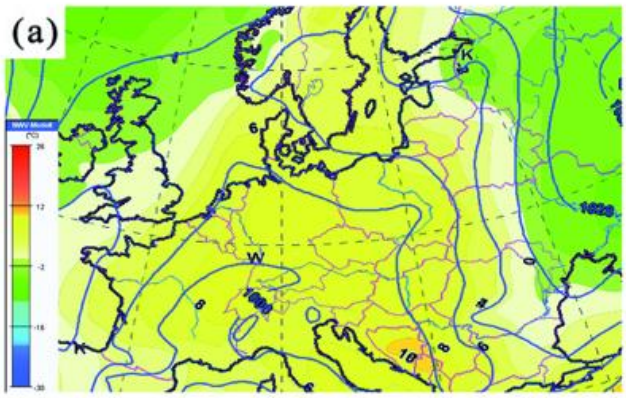


Abb. 2-11 (a): Bodendruck- und Temperaturverteilung in 850 hPa für 12.4.2009, 12 UTC (GME + 48 Stunden) .

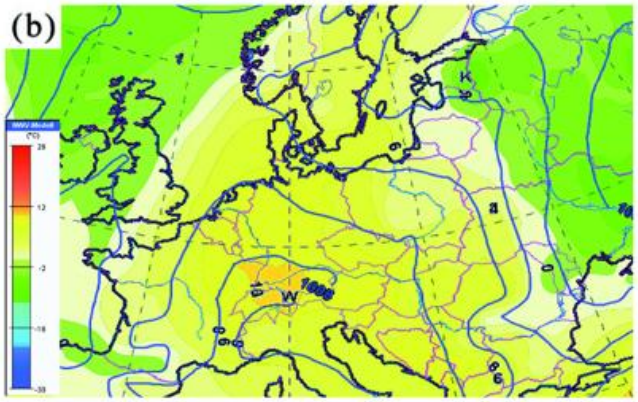


Abb. 2-11 (b): Bodendruck- und Temperaturverteilung in 850 hPa für 12.4.2009, 12 UTC (EZMW + 144 Stunden).

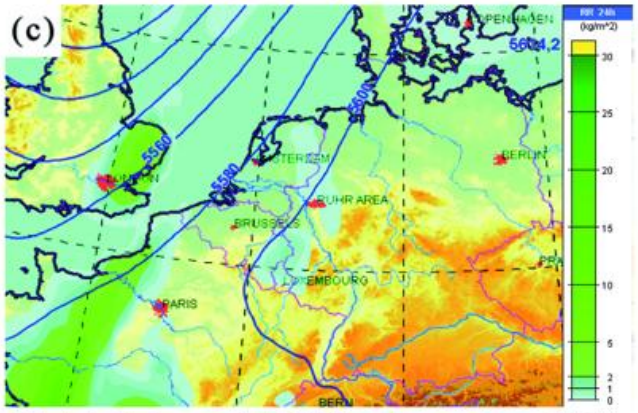


Abb. 2-11 (c): Geopotential 500 hPa und prognostizierte 24h-Niederschlagssumme für 12.4.2009, 12 UTC (GME + 144 Stunden).

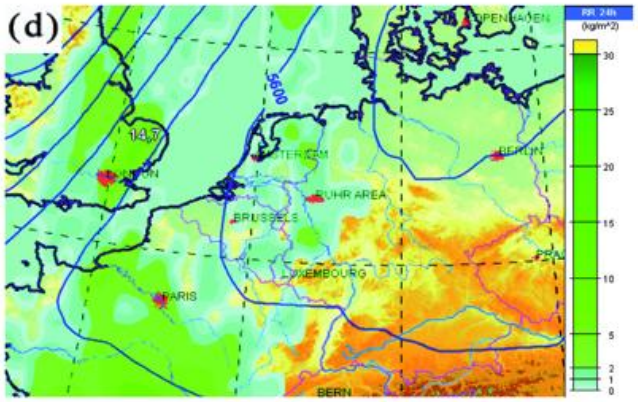


Abb. 2-11 (d): Geopotential 500 hPa und prognostizierte 24h-Niederschlagssumme für 12.4.2009, 12 UTC (EZMW + 48 Stunden).

Am Beispiel einer Gewitterlage vom 14. April letzten Jahres sei ein Fall dargestellt, der von rein automatischen Verfahren vermutlich zunächst als Unwetter gewertet worden wäre.

Anhand der Analyse/Diagnose des Wettergeschehens der Vortage zeigte sich, dass die Niederschlagsintensität der auftretenden Gewitterzellen in den Radarsummen deutlich überschätzt wurde, so dass die Diskrepanz zwischen Messung und aus Radarabtastungen abgeleiteter Niederschlagsmenge (Abb. 2-12) plausibel erschien. Nach Abschätzung der tatsächlichen Intensität der Gewitterschauer anhand der Volumenscans des Radarmessnetzes (Aufschlüsselung der Radarechos nach Höhe über Grund zur Ermittlung der Höhe der konvektiven Systeme) und Beurteilung von Zugrichtung und -geschwindigkeit wurde von der RZ Offenbach von der Herausgabe einer Unwetterwarnung abgesehen, was sich auch als richtig erwies.

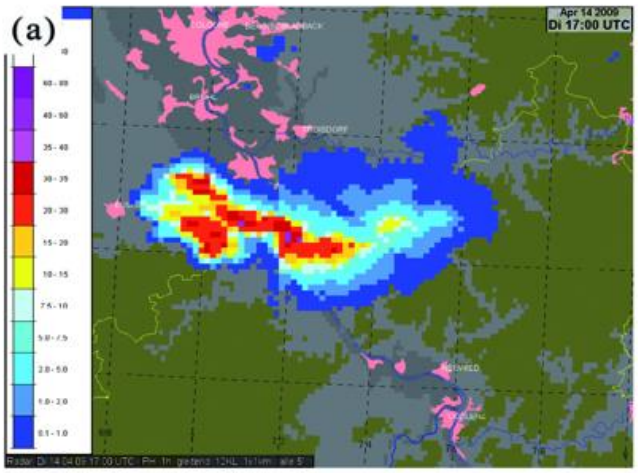


Abb. 2-12 (a): Unkorrigierte, gleitend aufsummierte, aus Radarreflexion abgeleitete 1h-Niederschlagssummen. Die Mengen sind eindeutig oberhalb der Unwetterschwelle.

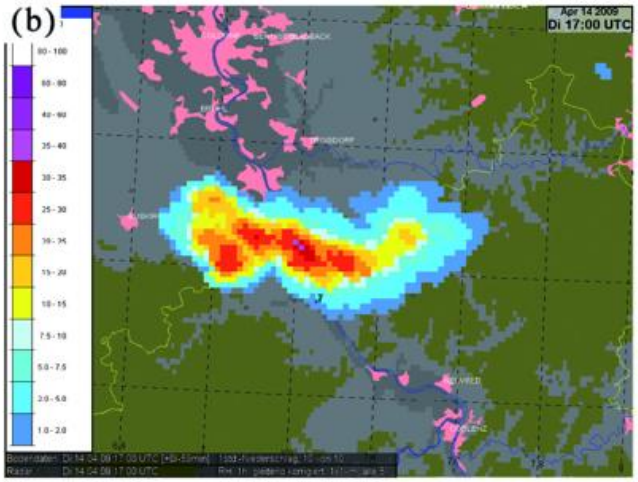


Abb. 2-12 (b): Stündliche, gleitend aufsummierte Niederschlagssumme aus Radarscan mit angebrachten Korrekturen. Auch hier sind die Niederschlagsmengen unwetterträchtig. Dazu eingeblendet sind die in dieser Region vorhandenen synoptischen Niederschlagsmessungen (stündlich), wobei es nur eine einzige Messung mit 0,7 mm/h gibt. Nach der Radarsumme sollten dort rund 2 mm gefallen sein.

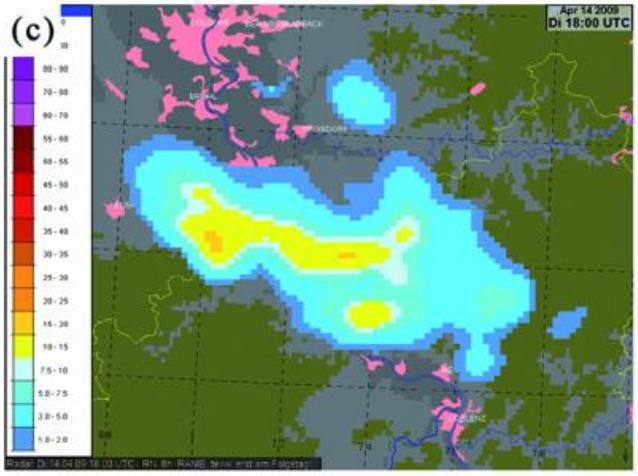


Abb. 2-12 (c): Mit allen verfügbaren synoptischen und nicht-synoptischen Niederschlagsmeldungen angeeichte Radarsumme der Niederschlagsmenge.

3.3 Zentrale Produktion von Wettervorhersagen für die Medien

Ende 2003 hat sich der Deutsche Wetterdienst aus der „ersten Reihe" der individuellen Medienversorgung mit Wetterprodukten zurückgezogen und dieses Feld den diversen privaten meteorologischen Dienstleistern überlassen. Trotzdem bietet der DWD weiterhin verschiedene Produkte an, die von den Medien jeglicher Art genutzt werden können, im Gegensatz zu der Zeit vor 2004 aber überwiegend standardisiert sind und dadurch kaum die individuellen Wünsche der Kunden berücksichtigen können. So gehören komplette fertig gestellte Wetterseiten für die Printmedien ebenso der Vergangenheit an wie spartenspezifische Wetterberichte (z.B. Berichte im lockeren Schreibstil für Radiosender A oder im sachlich-nüchternen Stil für Sender B usw.). Das gilt auch für regelmäßige tägliche Radio- und TV-Interviews zur aktuellen Wetterlage, um nur ein paar wenige Beispiele zu nennen.

Stattdessen bietet der DWD zahlreiche Standardprodukte in Form von Texten, Tabellen, Datenbulletins usw. an, die teils automatisch generiert werden, teils aber auch noch der manuellen Erstellung und Bearbeitung bedürfen. Diese Produkte können von den verschiedenen Medien für ihre Arbeit genutzt werden, stehen zum Teil aber auch Privatpersonen via Internet oder E-Mail zur Verfügung. Der DWD erfüllt mit Veröffentlichung dieser Produkte seine gesetzliche Pflicht (Gesetz über den Deutschen Wetterdienst), nämlich die **Erbringung meteorologischer Dienstleistungen für die Allgemeinheit.**

Die genannten Aufgaben werden in der **V**orhersage- und **B**eratungszentrale (VBZ) in einem so genannten **Mediendienst** erledigt. Dabei handelt es sich um einen rund zehnstündigen Tagesdienst, der von Montag bis Sonntag – auch an Feiertagen - von Meteorologen besetzt ist.

Eine wichtige Aufgabe dabei ist die Erstellung, Pflege und Aktualisierung des **Deutschlandwetterberichts,** der die

Vorhersage für den laufenden Tag sowie die drei Folgetage zum Inhalt hat und der vor allem im Internet veröffentlicht wird. Dieser Bericht ist mehr oder weniger im klassischen Stil verfasst, wobei die Wetterentwicklung mit Temperatur- und Windangabe beschrieben wird. Der individuellen Gestaltungsmöglichkeit des jeweiligen Bearbeiters sind dabei insofern Grenzen gesetzt, als dass sowohl die vom Supervisor und den Meteorologen und Meteorologinnen der Regionalzentralen abgesteckten Rahmenbedingungen der Wetterentwicklung bis zum zweiten Folgetag als auch die vom Mittelfristmeteorologen bearbeiteten Vorhersagen ab dem dritten Folgetag zu berücksichtigen sind. Dies trifft in besonderem Maße auf warnwürdige Wetterereignisse zu, die in den Berichten entsprechende Erwähnung finden müssen.

Als Erweiterung des formellen Deutschlandwetterberichts wird täglich am späten Vormittag ein Pressebulletin **(„Deutschlandwetter aktuell“)** erstellt, das zusätzlich zu dem erwähnten Deutschlandbericht noch sieben Regionalvorhersagen – diese werden von den Außenstellen geliefert - sowie eine möglichst plakative Beschreibung der aktuellen und zukünftigen Wetterlage enthält. Dabei sollen anstehende meteorologische Besonderheiten und Gefahren (z.B. Orkantief, Schneefront, schwere Gewitter) detailliert erörtert werden, es kann aber auch auf mögliche Unsicherheiten in der Vorhersage oder auf mögliche Randerscheinungen (z.B. Pollenflug, UV-Strahlungsbelastung usw.) eingegangen werden. Dieses Bulletin stellt eine Grundversorgung insbesondere für Presseagenturen, Zeitungen, Internetdienste und Sendeanstalten dar, kann aber auch von Privatpersonen via Newsletter-E-Mail abonniert werden.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Erstellung des **„Thema des Tages“**, das täglich im Laufe des Vormittags auf der Homepage des DWD veröffentlicht wird. Dabei beschreibt und erklärt der Bearbeiter beispielsweise ein besonderes, meist aktuelles meteorologisches Phänomen, was nicht zwingend Deutschland betreffen muss (z.B. auch tropische Wirbelstürme, Hitze-/Kältewellen in Übersee, besondere meteorologische Phänomene usw.). Auch klimatologische Begebenheiten oder Ereignisse aus der Wetterhistorie können erörtert werden wie Singularitäten (Eisheilige, Schafkälte usw.) oder unterschiedliche Begrifflichkeiten (meteorologische/astronomische/phänologische Jahreszeiten). Die reichhaltige und äußerst variable Palette möglicher Themen kombiniert mit dem individuellen Sprachduktus des jeweiligen Verfassers machen das „Thema des Tages“ zu einem der beliebtesten und meist gelesenen Produkte des DWD.

Zusätzlich zu den genannten Kernaufgaben kommen diverse und mitunter völlig unterschiedlich geartete **Wetterauskünfte** in mündlicher und schriftlicher Form. Dazu gehören Wettervorhersagen für private und öffentliche Dienstleister (andere Behörden, Bauunternehmer, Fotografen, Event-Veranstalter, Privatleute usw.), die telefonisch oder schriftlich beantwortet werden und teilweise auch Orte im Ausland betreffen können. Dazu gehören aber auch Interviews für Radio- und TV-Anstalten sowie Printmedien zu besonderen Wetterlagen oder Anlässen (z.B. Orkantief KYRILL, Sommeranfang, Weihnachtswetter usw.) genauso wie die Beantwortung allgemeiner Fragen zu Wetter und Klima aus der Öffentlichkeit.

Hinzu kommen **Beratungen** incl. Vorhersagen **für Institutionen des Katastrophenschutzes,** die ebenfalls im Gesetz über den Deutschen Wetterdienst verankert sind. So bekommt z.B. das THW derzeit Kurzfrist-Wetter- und Temperaturvorhersagen in tabellarischer Form für verschiedene und ständig wechselnde Einsatzorte auf der Welt.

Summa summarum lässt sich konstatieren, dass der zentrale Mediendienst ein universelles meteorologisches Arbeitsfeld im operationellen Vorhersagedienst darstellt, das nicht nur eine mannigfaltige Arbeitspalette aufweist, sondern auch ein wichtiges Bindeglied zwischen DWD und Öffentlichkeit darstellt.

4 Ausblick

Eine feststehende Konstante auch in der modernen synoptischen Meteorologie ist und bleibt die **Kartendarstellung** als die am besten geeignete Form zur Vermittlung synoptischer Inhalte, da sie nicht nur atmosphärische Zusammenhänge auf einen Blick lesbar macht, sondern dem erfahrenen Prognostiker auch noch ermöglicht, sich daraus zumindest annähernd die voraussichtliche Weiterentwicklung des Wettergeschehens abzuleiten. Eine übersichtliche und ästhetisch attraktive Gestaltung der graphischen Form trägt dabei wesentlich zur Aussagekraft einer **Wetterkarte** bei.

Da das innovative Arbeitsplatzsystem **NinJo** die Möglichkeit bietet, Daten auf eine vielfältige und ansprechende Weise darzustellen, liegt es nahe, damit auch **thematische Wetterkarten** zu produzieren, was im Übrigen der Philosophie des DWD entspricht, möglichst alle informationstechnischen Anwendungen auf nur einem einzigen System zu betreiben.

In diesem Sinne hat der DWD im Rahmen eines internationalen Projekts – unter maßgeblicher Beteiligung eines kanadischen Entwicklerteams - einen **I**nteraktiven **G**raphischen **E**ditor **(IGE)** in NinJo integriert, mit dem seit Oktober 2009 die signifikanten Wetterkarten „Low-Level-SWC“ für die Luftfahrt und im Mai 2010 auch die **t**hematischen Vorhersage**k**arten des **B**odendruckfeldes **(TKB)** erstellt werden.

Ein weiteres Projekt wird sich mit der Entwicklung der **Onscreen-Analyse** in NinJo anschließen, die wie die TKB je nach Bedarf (Prognostiker- und Nutzeranforderung) konzeptionell aufbereitet werden kann. Hierbei können zur Verbesserung der Diagnose und Prognose vor allem warnwürdiger (extremer) Wettererscheinungen durch geeignete grafische Symbolik z.B. wetterwirksame Störungen/Strukturen in der Troposphäre (Troglinien/Jetstream-Achsen, Bereiche **p**otenzieller **V**orticity,

PV) und barokline Zonen markiert und somit deutlicher identifiziert werden.

Mit den Ergebnissen hoch aufgelöster Modelle wie dem **COSMO-DE** und einer sich zurzeit in Entwicklung befindenden darauf aufgesetzten **Ensemble-Technik** können dann in diesen Karten im Kürzestfristzeitraum kritische Frontendurchgänge wie Squall-Lines prognostisch erfasst, verfolgt und für das Unwetterwarnmanagement verwendet werden.

Durch die Zusammenschau aller Einflussgrößen kann dem Supervisor und Warnmeteorologen ein kompakt informierendes, objektives und dokumentiertes Hilfsmittel für die Einschätzung der aktuellen Wetter- und Warnlage sowie deren Entwicklung im „Short Range" gegeben werden, so dass die traditionelle Arbeitsweise eines synoptisch arbeitenden Meteorologen nicht nur in erheblichem Maße effizienter gestaltet werden kann, sondern sich der modernen Arbeitsweise anderer nationaler Wetterdienste anschließt.

T. SCHUMANN

3 Nutzung von Ensemble-Prognosen im Vorhersagedienst

The operational use of Ensemble-based forecast methods

Zusammenfassung
Die im DWD operationell genutzten EPS-Verfahren, deren Anwendung sowie deren Stärken und Schwächen werden diskutiert. Schwerpunkt wird dabei auf das EPS des EZMW gelegt. Für die moderne Wetterprognose sind EPS-basierte Prognosemethoden unverzichtbar. Sie ermöglichen die Abschätzung des Potentials für gefährliche und / oder extreme Wetterereignisse. Bei der Nutzung von EPS für die Prognose gefährlicher oder extremer Ereignisse sind aus einer unüberschaubaren Vielzahl von Informationen für die entsprechende synoptische Lage relevante Muster, Strukturen und Signale zu selektieren und diese zu verfolgen. Eine aus vielen Jahren Praxis gewonnene synoptische Erfahrung ist erforderlich, um erkannte Signale zu werten und richtig zu interpretieren. Daher wird durch die verstärkte Nutzung von EPS-basierten Verfahren die Bedeutung des Prognostikers zunehmen.

Abstract
EPS based weather prediction methods used operationally at the DWD will be discussed by pointing out the advantages, weaknesses and the limits of each method. Priority will be given the EPS of the ECMWF. For a "State of the Art" prediction of high impact weather EPS based methods are indispensable. A first assessment of the severity of an event may be possible. Forecasting of severe weather by EPS tools means that a vast amount of information has to be taken into consideration. Patterns and signals related to the synoptic situation were to be detected, analyzed and tracked. A long term synoptic experience is to interpret these signals in a correct way. Therefore the increased use of EPS-based weather forecast methods especially for the prediction of high impact weather makes the job of a forecaster more important in the future.

1 Warum werden verstärkt Ensemble-basierte Prognosen genutzt?

Seit der Einführung der Numerischen Wetterprognose Mitte der 60er und Anfang der 70er Jahre wurden die Vorhersagemodelle stetig verbessert. Dies erfolgte durch eine Verfeinerung der horizontalen und vertikalen Auflösung der Modelle, mittels aufwändigerer Parametrisierung der physikalischen Prozesse und verstärkt seit Beginn der Satellitenära durch die Einbeziehung der Fernerkundungsdaten.

Mit jeder neuen Modellversion konnte die Vorhersagegüte, die anhand von international anerkannten Verfahren ermittelt wird, verbessert werden. Ausgereifte statistische Anschlussverfahren (Postprocessing) ermöglichte die zunehmend automatische Erstellung und Verbreitung von mannigfaltigen Endprodukten für Kunden und Nutzer. In diesen Produktionsprozess kann der Forecaster kaum noch eingreifen. Abgesehen davon wurde es bei „normalen" Wetterlagen selbst für den erfahrenen Meteorologen zunehmend schwieriger, eine höhere Vorhersagegüte zu liefern als die Numerik.

Bei allen Fortschritten stellt jede Modellsimulation ein deterministisches Zufallsprodukt dar. Dieses ist abhängig von den Anfangs- und Randwerten der meteorologischen Variablen, d.h. eine bereits geringe und unterhalb des Messfehlers liegende Variation der Eingangsgrößen kann mit zunehmender Prognosedauer zu unterschiedliche Vorhersagen führen. Schließlich sind die Beobachtungen, die in die Vorhersagemodelle einfließen, nur Stichproben, d.h. in dem vierdimensionalen Medium Atmosphäre (die vierte Dimension stellt die Zeitachse dar) Nadelstiche. Zwar ermöglichen von Satelliten gemessene Strahldichten inzwischen eine quasikontinuierliche Erfassung zahlreicher Parameter, aber die meisten dieser Verfahren liefern bei Wolkenbedeckung nicht die gewünschten Ergebnisse.

Schließlich liefern deterministische Verfahren nur Aussagen wie „Es gibt übermorgen früh an der Nordseeküste Sturmböen bis 100 km/h", die sich maximal als Alternativaussage nutzen lassen, wie: „Orkanartige Böen ab 105 km/h treten nicht auf". In Kenntnis dieser Schwächen wurde zu Beginn der 90er Jahre von den führenden Wetterdiensten – so am EZMW (**E**uropäisches **Z**entrum für **M**ittelfristige **W**ettervorhersagen) in Reading und wenig später auch vom amerikanischen Wetterdienst – die Entwicklung von Vorhersageverfahren begonnen, die auf der EPS-Technik (EPS = **E**nsemble **P**rediction **S**ystem) basieren. Diese waren anfangs für mittelfristige Vorhersagen konzipiert. In

den vergangenen zehn Jahren wurden aber verstärkt Anwendungen von EPS-basierten Verfahren für Kurzfristprognosen entwickelt.

Die Idee, mehrere Vorhersagen zu berücksichtigen, ist nicht neu. Das Verfahren AFREG-MIX (**A**naloge **F**älle und **Reg**ression), das Elemente der Ensembletechnik bereits vorweg nahm und das auch gegenwärtig im DWD genutzt wird, wurde bereits in den 80er Jahren beim Meteorologischen Dienst der früheren DDR entwickelt und kam dort zum Einsatz. Hierzu werden aus einem Datenarchiv, das seit 1970 fortgeführt wird, für ein Zeitfenster von 30 Tagen vor oder nach dem aktuellen Datum die 35 ähnlichsten Fälle der prognostizierten Wetterlage selektiert und aus dem Eintreffen bestimmter Ereignisse (Gewitter, Sonnenscheindauer, Nebel, Niederschlag, …) Wahrscheinlichkeiten abgeleitet. Dafür werden das EZMW- und das GME-Modell gleichwertig berücksichtigt, d.h. beide Modelle werden ge**mix**t. Dieses wenig rechenzeitintensive Verfahren braucht für mittelfristige Prognosen einen Vergleich mit modernen Methoden auch heute nicht zu scheuen.

Ende der 90er Jahre setzte sich bei der Kurzfristvorhersage beim DWD die Erkenntnis durch, dass die Einbeziehung der Modelle anderer nationaler Vorhersagezentren eine Verbesserung der Finalprognose ermöglicht. Dieses Verfahren wird international als „Poor-Man-EPS“ bezeichnet. Begünstigt wurde dies durch eine verstärkte Nutzung des Internets sowohl durch mehrere Anbieter der Modelldaten, d.h. der Wetterdienste, als auch durch deren Nutzer.

Da aber jedes Modell andere Parameter beinhaltet und auch keine einheitliche Norm der Bereitstellung der Modelldaten existiert, ist eine Automatisierung bisher gescheitert. Dort, wo es noch möglich ist und der Prognostiker in den Produktionsprozess eingreifen kann sowie auch manuell erstellte Produkte gefragt sind, werden beim Vorhersageprozess die Ergebnisse des Poor-Man-EPS berücksichtigt.

Es liegt auf der Hand, dass jeder der Modellläufe eines EPS ein eigenes Wetter-Szenario aufzeigt, wobei natürlich abhängig vom Modell und mit zunehmender Prognosedauer die Lösungen divergieren können. Die Prognose der Unsicherheit einer Wettervorhersage und damit der Vorhersagbarkeit ist hierdurch möglich. Entsprechende Verfahren, die im kommenden Abschnitt beschrieben werden, sind bereits im Einsatz oder befinden sich in Entwicklung.

Um beim oben aufgeführten Beispiel mit den Sturmböen an der Nordsee zu bleiben, könnten mehrere Ensemblemitglieder Lösungen zeigen, die eine heftigere Entwicklung als das deterministische Modell erwarten lassen. So könnte dann die Aussage lauten: „Die Wahrscheinlichkeit für orkanartige Böen liegt bei 40 Prozent, für Böen von Orkanstärke bei 5 Prozent“. Dies entspricht zwar der oben getroffenen deterministischen Aussage, ermöglicht aber ein ganz anderes Warnmanagement sowie eine qualifiziertere Beratung der Nutzer und Kunden, so dass deren Bedürfnisse besser befriedigt werden können.

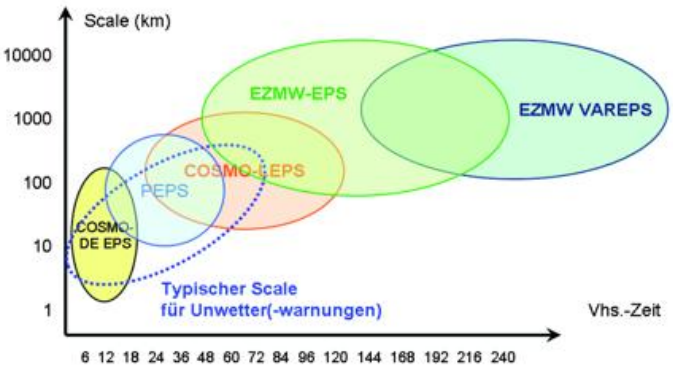


Abb. 3-1: Raum-/zeitliche Einordnung (Scales) der EPS-Systeme.

2 Welche EPS-Systeme stehen zur Verfügung bzw. sind in Entwicklung?

Gegenwärtig werden Ensemble-Systeme genutzt, die nahezu alle Scales von meteorologischen Ereignissen umfassen. Ein System, das die Prognosen im unteren Meso-Scale ermöglichen soll, ist in Entwicklung. Die Tabelle 3-1 und Abb. 3-1 vermitteln einen Überblick.

Die Vorhersagbarkeit von meteorologischen Ereignissen ist von den Eigenschaften des EPS-Systems abhängig. Um eine meteorologische Erscheinung prognostizieren zu können, muss diese von wenigstens drei Gitterpunkten eines Modells aufgelöst werden. Im folgenden Abschnitt wird auf die einzelnen EPS-Systeme und deren Verwendung eingegangen.

Ein Ensemble wird erzeugt, indem in die Analyse des Anfangszustandes „Störungen“ implementiert werden, deren Amplitude in der Größenordnung der Fehler der Anfangsanalyse liegt. Mittels dieser „gestörten“ Analysen wird ein Satz von alternativen Prognosen produziert. Die Methode, wie diese „gestörten“ Analysen erzeugt werden, ist bei jedem EPS eine andere.

2.1 Für Europa entwickelte EPS-Verfahren

Zuerst sei hier das COSMO-DE-EPS aufgeführt, das sich in Entwicklung befindet. Ziel des COSMO-DE (**C**onsortium for **S**mall-Scale **Mo**delling-**De**utschland), das seit April

System	Vorhersagezeitraum	Anzahl der Einzelläufe	Läufe pro 24Std	Zeitliche Auflösung	Horizontale Auflösung	Vorhersagegebiet
COSMO-DE-EPS (in Entwicklung)	0.....18	20-40	alle 3h	15 min/1h	2,8 km	Deutschland + Alpen
SRNWP-PEPS	6.....54	23	0,12	1h/3h	7 km	Europa
SRNWP-PEPS	6.....54	11	6,18	1h/3h	7 km	Europa
COSMO-LEPS	24...132	16	12	3h	10 km	Europa
EZMW-EPS	24...240	51	0, 12	3h/6h/12h	50 km	Global
VAREPS (EZMW)	216...360	51	0, 12	12 h	80 km	Global

Tab. 3-1: EPS-Systeme, die beim DWD bereits im Einsatz sind bzw. sich noch in Entwicklung befinden.

2007 operationell genutzt wird, ist vor allem eine Verbesserung von Prognosen gefährlicher Wetterereignisse im Zusammenhang mit hoch reichender Konvektion und der Wechselwirkung mit feinskaliger Topographie. Dabei ist COSMO-DE in der Lage, derartige Konvektion explizit aufzulösen. Dieses Modell bezieht die Anfangs- und Randwerte von COSMO-EU.

Bisher lieferte COSMO-DE meist brauchbare Vorhersagen in Situationen, die durch großräumige synoptische Strukturen wie Höhentröge oder Bodenfronten in Verbindung standen. Bei Ereignissen, die luftmassenintern auftraten (hoch reichende Konvektion mit intensiven Niederschlägen im Sommerhalbjahr, aber auch Grundschichtprozesse wie die Auflösung von Nebel und tiefem Stratus im Winterhalbjahr) stieß die bisherige deterministische Betrachtungsweise an ihre Grenzen.

Neben einer Verbesserung der Parametrisierung der Grenzschicht werden hier Fortschritte durch die Nutzung der Ensemble-Technik erwartet. Eine Vorhersage von Ereignissen mit einer horizontalen Auflösung unterhalb von etwa 9 km wird aber auch mit dem neuen System nicht möglich sein.

Der kurzfristige Vorhersagezeitraum wird durch ein weiteres Ensemblebasiertes Vorhersagesystem, dem SRNWP-PEPS, abgedeckt. Dieses vom DWD im Rahmen des EUMETNET **S**hort-**R**ange **N**umerical **W**eather **P**rediction Programms (SRNWP) betriebene und seit 2005 im quasioperationellen Einsatz befindliche System basiert auf den Berechnungen von 23 Regionalmodellen von 21 europäischen Wetterdiensten, die zu einem Multi-Modell-Ensemble (Poor-Man-Ensemble) zusammengefasst werden. Die Modelle weisen Unterschiede in der Auflösung, Parametrisierung, Datenassimilation sowie in den Anfangs- und Randwerten auf, die die Unsicherheiten der Vorhersage abbilden. Da die Modelle unterschiedliche Gebiete abdecken, variiert die Ensemblegröße von minimal drei bis maximal 21 Modellen. Im engeren Sinne handelt es sich hierbei um ein „Poor Man"-EPS, das aber aufgrund der großen Anzahl der darin eingehenden Modelle wie ein „echtes" EPS behandelt werden kann.

Dieses System hat sich nach subjektiven Einschätzungen der Prognostiker als eines der „besten" EPS herauskristallisiert, die in den vergangenen Jahren für die operationelle Praxis entwickelt worden sind. Gut erfasst werden skalige Ereignisse im synoptischen und subsynoptischen Scale, wobei eine recht detaillierte Einschätzung des Einflusses der Orographie möglich ist. Die Schwäche des PEPS besteht in der Erfassung von Ereignissen, die im Zusammenhang mit hoch reichender Konvektion stehen. Die damit einher gehenden Starkniederschläge wie auch konvektive Böen wurden bisher unterschätzt.

Als Anwendung, die sowohl Prognosen im Kurzfrist- als auch für den anschließenden mittelfristigen Vorhersagezeitraum ermöglicht, ist das COSMO-LEPS (**L**imited-Area **E**nsemble **P**rediction **S**ystem) zu nennen, das in Zusammenarbeit der Wetterdienste von Deutschland, Griechenland, Italien, Polen, Rumänien und der Schweiz entwickelt wurde. Im Gegensatz zum zuvor aufgeführten System handelt es sich hierbei um ein „echtes" EPS. Es kombiniert die Vorteile eines EPS, basierend auf einem globalen Modell (EZMW) mit den Vorzügen eines hoch auflösenden Lokalmodells. Ziel ist die Identifikation und quantitative Abschätzung gefährlicher Wetterereignisse wie Starkregen, heftiger Schneefall, Sturm und extreme Temperaturen im Zusammenspiel mit komplexer Orografie.

Hierzu erfolgt, ausgehend von zwei EPS-Läufen um 00 und 12 UTC eines Tages (die 102 Simulationen beinhalten) eine Clusteranalyse, wodurch exakt 16 Cluster erzeugt werden. Von diesen Clustern wird jeweils ein repräsentativer EPS-Lauf gewählt. Diese repräsentativen EPS-Simulationen stellen die Randwerte für das COSMO-Modell bereit, das eine vom Schweizer Wetterdienst entwickelte Version des COSMO-EU darstellt. Abhängig von der Besetzung der 16 Cluster, d.h. wie viele Einzelsimulationen ein Cluster enthält, werden die darauf aufgesetzten Rechnungen des COSMO-Modells mit einem unterschiedlichen Gewicht versehen, was dann das EPS ergibt. COSMO-LEPS ermöglicht Vorhersagen von 48 bis 132 Stunden, die am EZMW gerechnet werden. Dem Grundprinzip des EPS kommt dieses System somit deutlich näher als das zuvor beschriebene SRNWP-PEPS.

Die Stärke von COSMO-LEPS besteht in der Abschätzung von Starkniederschlägen insbesondere an den Alpen sowie den Mittelgebirgen und von Sturmereignissen. Schwächen zeigt dieses System bei der Erfassung von Erscheinungen, die mit hoch reichender Konvektion im Zusammenhang stehen sowie bei der Erkennung von extremen Temperaturminima und -maxima. Da es sich beim COSMO-LEPS um ein Downscaling des EPS des EZMW handelt, werden Charakteristika des antreibenden Modells sichtbar. Auf das EPS des EZMW wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

2.2 Ensemble-Prognosen am EZMW

Mit dem Ziel, die mittelfristigen Vorhersagen und insbesondere die Prognose gefährlicher und schadensträchtiger Wetterereignisse signifikant zu verbessern, wurde im Oktober 1973 das EZMW gegründet. Das EZMW betreibt seit August 1979 ein deterministisches Modell, das bereits damals Vorhersagen bis zu 10 Tagen im Voraus berechnete.

Während der ersten Jahre des operationellen Betriebs des EZMW reifte die Erkenntnis, dass trotz Fortschritten bei der Modellentwicklung mit zunehmendem Vorhersagezeitraum die Einzelvorhersagen für einen definierten Termin divergieren, d.h. eine verlässliche Prognose für den späteren mittelfristigen Zeitraum nicht möglich ist. Synoptische Strukturen, die bei einem vorherigen Modelllauf noch gut ausgeprägt waren, zeigte der aktuelle Lauf häufig nicht mehr und umgekehrt. Diese als Inkonsistenz be-

zeichnete Eigenschaft der Modelle, die dem chaotischen System Atmosphäre geschuldet ist und die in allen Scales auftritt, setzt den Wert der Vorhersagen für den Endnutzer herab. Somit galt es hier eine Verbesserung herbei zu führen. Hierzu wurde am EZMW ein Ensemble aus Vorhersagen (EPS) entwickelt.

Für eine Ensemble-Vorhersage wird das deterministische Modell traditionell mit der Hälfte der horizontalen und einer deutlich geringeren vertikalen Auflösung 51 mal gerechnet, wobei in 50 Simulationen „gestörte" Anfangsbedingungen eingehen und die 51. Rechnung „ungestört" erfolgt. Die Reduktion der Auflösung erfolgte aufgrund der (nicht) vorhandenen Rechnerkapazität. Das erste Ensemble Prediction System wurde im Dezember 1992 implementiert. Während anfangs das EPS aus 32 Simulationen bestand, wurde die Anzahl der „gestörten" Läufe im Herbst 1996 auf 50 erhöht und seitdem nicht mehr verändert.

Das EPS wird erzeugt, indem dort, wo die Troposphäre am empfindlichsten darauf reagiert, „Störungen" in die Anfangsanalyse injiziert werden. Dies geschieht für die Nordhalbkugel polwärts von 30°N. Mittels 50 orthogonaler Eigenvektoren werden Analysenfehler optimiert, um einen maximalen Effekt auf die 48-stündige Vorhersage, bezogen auf die Gesamtenergie der Hemisphäre, zu erzielen. Daher ist die Nutzung des EPS des EZMW für Prognosen deutlich unterhalb von 48 Stunden nicht sinnvoll.

Diese „gestörten" Analysen führen mit zunehmendem Vorhersagezeitraum zu wachsenden atmosphärischen Abweichungen, d.h. die Vorhersagen, die mit den „gestörten" Analysen erzeugt werden, divergieren. Diese Divergenz, die sich in den Feldern als Standardabweichung oder Spread äußert, ist ein Maß für die Unsicherheit der deterministischen Prognose.

Als Ergebnis ist für den Prognostiker eine unüberschaubare Vielzahl von Informationen verfügbar. Um diese sinnvoll zu verdichten, wurden verschiedene Produkte entwickelt. An dieser Stelle soll nur auf die im operationellen Vorhersagedienst des DWD genutzten Produkte eingegangen werden.

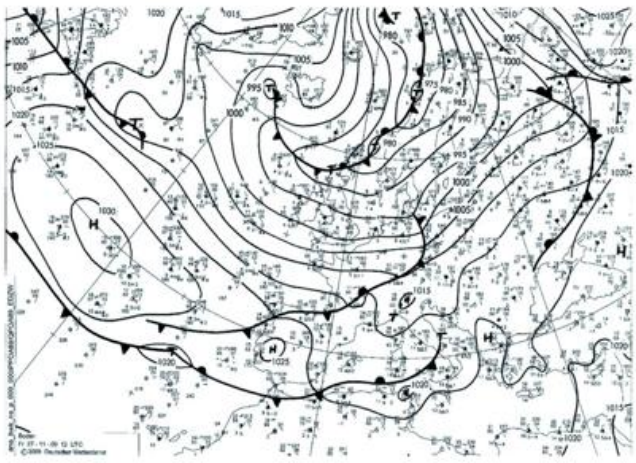


Abb. 3-2: Bodendruck-Analyse Nordatlantik-Format für den 27.11., 12 UTC.

2.2.1 Cluster

Cluster vermitteln dem Prognostiker einen ersten groben Überblick. Mittels Clusteranalyse werden, basierend auf dem Geopotential in 500 hPa, ähnliche Vorhersagen anhand der mittleren quadratischen Abweichung gruppiert. Als Ergebnis werden neue Vorhersageprodukte erstellt, die die Mittel der „ähnlichen" EPS-Vorhersagen darstellen. Die Clusterung erfolgt für Vorhersagezeiten von 96 bis 168 Stunden, wobei die synoptische Kontinuität berücksichtigt wird. Die Anzahl der EPS-Läufe pro Cluster bleibt über den gesamten Zeitraum hinweg konstant. Es werden maximal sechs Cluster für vier Gebiete in Europa (Nordwest-, Nordost-, Südwest- und Südosteuropa) sowie für Gesamteuropa einschließlich des östlichen Nordatlantiks erstellt. Ein ideales Clusterverfahren gibt es nicht. So wie der Erstellung der Cluster muss auch bei jedem anderen Verfahren, welches der Informationsverdichtung dient, ein Verlust von Informationen in Kauf genommen werden.

2.2.2 EFI

Das in dieser Hinsicht am intensivsten diskutierte Produkt ist der EFI (**E**xtreme **F**orecast **I**ndex). Hohe Werte für den EFI zeigen Gebiete, wo die Verteilungsfunktion des EPS für ein definiertes Wetterelement und einen Prognosezeitraum oder -schritt gegenüber einem Klima (das dem langjährigem Mittel nahe kommt) extrem abweicht. Dies kann ein extremes und/oder gefährliches Wetterereignis sein, muss es aber nicht. Mit Hilfe des EFI erhält der Prognostiker einen bis in den frühen mittelfristigen Vorhersagezeitraum, d.h. bis 132 Stunden, reichenden Überblick, ob etwas an extremen und/oder gefährlichen Wetterereignissen zu erwarten ist. Es ist keine Aussage möglich, welche Schwellenwerte (z.B. bei Windböen oder bei Niederschlagsmengen) überschritten werden, eine Regionalisierung lässt sich kaum vornehmen.

Die Funktionsweise des EFI sei an einer für den Herbst 2009 typischen synoptischen Lage illustriert. Am 27. November wurde Deutschland von einem schwachen, in der Frontalzone nach Osten schwenkenden Bodentrog überquert. Die vor

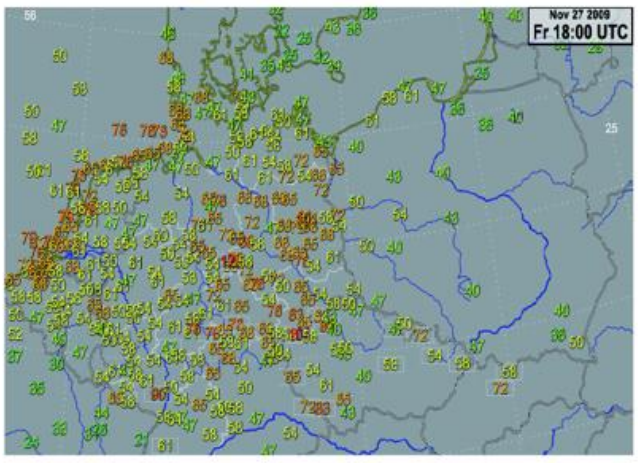


Abb. 3-3: Beobachtete maximale Windböen, 27.11.09, 12 bis 18 UTC.

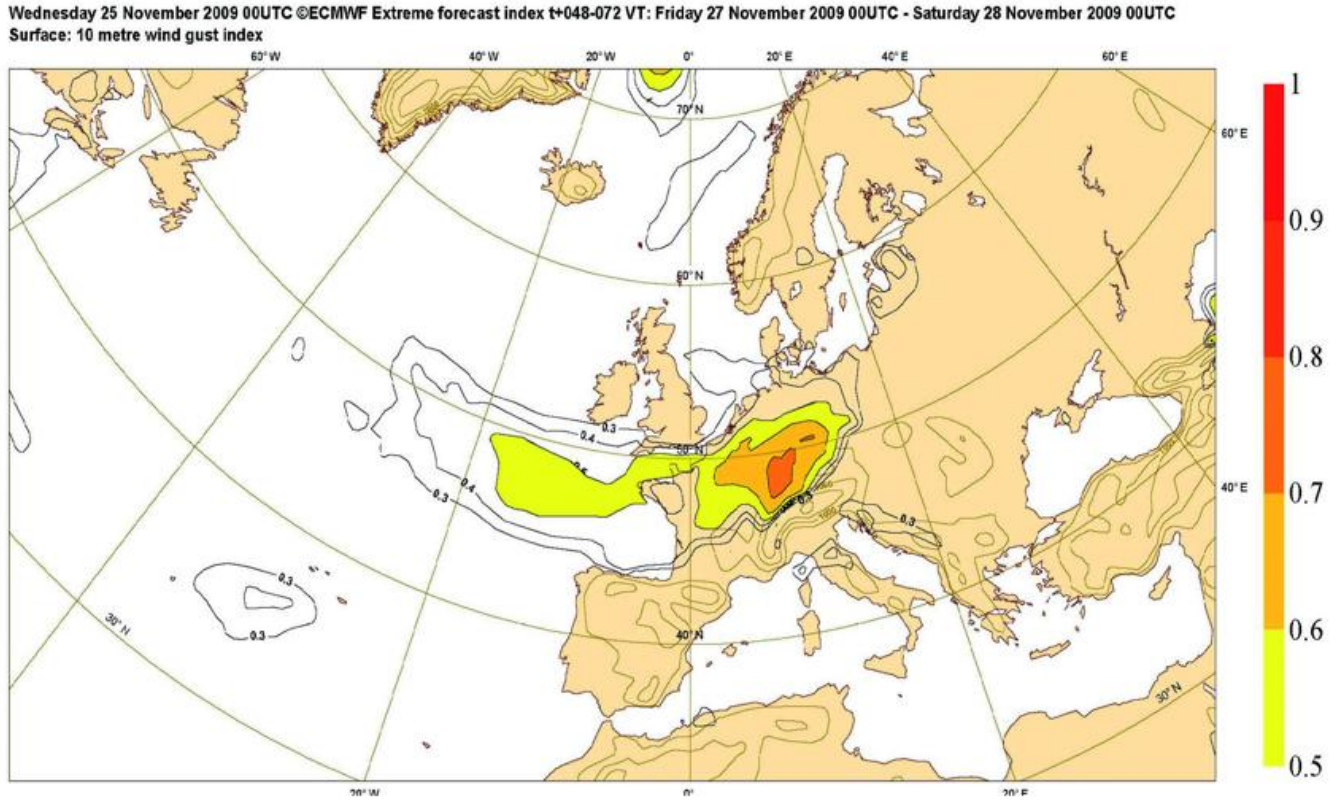


Abb. 3-4: Vorhersage des EFI für den 27.11.09, 00 bis 24 UTC, Modelllauf vom 25.11.09, 00 UTC.

dem Trog liegende Kaltfront ist in der Nordatlantik-Analyse vom 27.11.2009, 12 UTC, zu sehen (Abb. 3-2).

Am 27.11.2009 traten im Norden und in der Mitte Deutschlands im Zusammenhang mit der Passage der Kaltfront und des Bodentroges verbreitet Böen bis Stärke 8 und vereinzelt auch 9 (75 bis 88 km/h) auf (Messstationen mit noch stärkeren Böen sind Bergstationen). Böen der Stärke 9 waren auf die mittleren Gebiete und die offene Nordsee beschränkt (Abb. 3-3).

Mittels des EFI wurden die mittleren Gebiete Deutschlands hervorgehoben. Die beobachteten Sturmböen waren in dieser Region gegenüber dem Modellklima außergewöhnlich, aber nicht extrem. An der Nordseeküste wäre dagegen dieses Ereignis noch nahezu als „normal" zu bezeichnen, obwohl dort ebenfalls Böen bis Sturmstärke gemessen wurden. Folglich lieferte der EFI im Küstenbereich nur schwache Signale (Abb. 3-4).

2.2.3 Spread

Mittels weiterer Verfahren kann der Meteorologe im Vorhersagedienst tiefer ins Detail gehen. Hier bietet sich der Spread an, was die Standardabweichung ist. Gebiete, in welchen für den gewählten Parameter die die Vorhersagbarkeit herabgesetzt ist, d.h. die Einzellösungen des EPS erheblich divergieren, werden durch einen erhöhten Spread kenntlich gemacht. Dies erfolgt in einer für den Prognostiker sinnvoller Darstellungsweise. Wir kommen hiermit einem der Zwecke des EPS, der Prognose der Vorhersagbarkeit, näher.

Konsequenterweise müsste der Prognostiker jeden einzelnen EPS-Lauf für jeden Vorhersagetermin auf den Gehalt an Signalen für extreme und/oder gefährliche Wetterereignisse hin „abklopfen" und hierbei noch möglichst mehrere Modellläufe berücksichtigen. Dies ist aus objektiven Gründen nicht zu leisten und soll dem Prognostiker erspart werden. Es sind somit derartige Produkte bereitzustellen, die hinsichtlich der Darstellungsform und der Quantität überschaubar sind, aber die Information der Läufe mit extremen Szenarien enthalten.

2.2.4 Wahrscheinlichkeitsaussagen

Als weitere Möglichkeit und als gebräuchlichste Methode der Informationsverdichtung bieten sich Wahrscheinlichkeiten an, mit welchen definierte Schwellenwerte (die z.B. den Kriterien für die Ausgabe von Wetter- und Unwetterwarnungen entsprechen) über- oder ggf. auch unterschritten werden. Dieses Verfahren findet bei allen EPS-Systemen Anwendung.

2.2.5 EPS-Meteogramme („Rauchfahnen" und „Candle Sticks")

Bisher wurden nur Produkte diskutiert, die einen Sachverhalt quasi-geografisch präsentieren. Häufig erfordern z.B. Beratungen punktgebundene Daten. Hierzu lassen sich teils für beliebig frei wählbare, teils für vordefinierte Punkte EPS-Meteogramme erstellen, die den Verlauf eines oder mehrerer Parameter zeigen.

Der Verlauf meteorologischer Parameter lässt sich als Rauchfahne visualisieren, d. h. jeder einzelne EPS-Lauf wird als kontinuierliche Kurve gezeigt. Hierzu müssen alle EPS-Simulationen des jeweiligen Parameters in der gewünschten zeitlichen Auflösung vorliegen. Aufgrund des hohen Speicherplatzbedarfes werden nur die Daten weniger Punkte bereitgehalten.

Eine weitere Möglichkeit der Visualisierung ist die Darstellung als „Candle Sticks". Hier sind nur so viele Felder pro Parameter erforderlich, wie Quantile dargestellt werden, d.h. deutlich weniger Speicherplatz ist erforderlich. Dadurch können EPS-Meteogramme in dieser Form „on the fly" an beliebigen Punkten erzeugt werden. Für die am EZMW erzeugten „EPSgramme" sind jeweils sieben Felder pro Parameter und Zeitschritt notwendig (Maximum, 90%, 75%, Median, 25%, 10%, Minimum). Als Beispiel sei hier das Meteogramm für den Gitterpunkt dargestellt, der der Stadt Erfurt am nächsten liegt (Abb. 3-5).

2.2.6 VAREPS

Während das EPS des EZMW für Prognosen bis zu 10 Tagen beziehungsweise 240 Stunden ausgelegt ist, ermöglicht VAREPS (**Va**riable **R**esolution **EPS**) Vorhersagen bis zu 32 Tagen im Voraus. Die Bezeichnung „VAREPS" wurde gewählt, da dieses anfänglich mit einer jenseits des 15. Folgetages reduzierten horizontalen Auflösung gerechnet wurde. Seit März 2008 liegt vom 10. bis zum 32. Folgetag die einheitliche Auflösung bei etwa 80 km. Bis einschließlich des 15. Folgetages läuft VAREPS täglich zum 00 und 12 UTC-Termin, für den Vorhersagezeitraum danach einmal wöchentlich in der Nacht von Donnerstag auf Freitag.

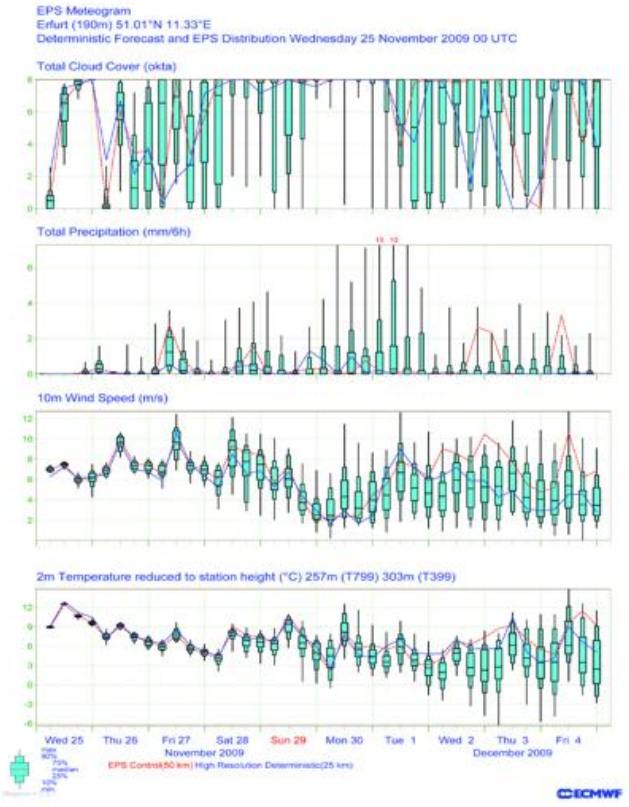


Abb. 3-5: EPS-Meteogramm für Erfurt, Modelllauf vom 25.11.09, 00 UTC.

Im operationellen Dienst werden allerdings nur die Produkte für Prognosen bis zum 10. Folgetag genutzt. Vom EZMW werden aber Vorhersagen bis zu 15 Tage im Voraus angeboten, wobei die Art der Darstellung einen nahtlosen Übergang zwischen dem hoch auflösenden EPS und VAREPS impliziert.

3 Was ist mit welchem System vorhersagbar?

Die Vorhersagbarkeit von Ereignissen ist einerseits durch das Auflösungsvermögen des EPS-Systems (sowohl horizontal als auch zeitlich) limitiert. Das Ereignis, das durch ein Vorhersagesystem erfasst werden soll, muss eine horizontale Ausdehnung von mindestens drei Gitterpunkten aufweisen. Somit kann man z.B. vom EPS des EZMW und erst recht vom VAREPS nicht erwarten, dass an den Mittelgebirgen orografisch verstärkte Niederschläge korrekt erfasst werden. Hier kommt man dann mit höher auflösenden EPS-Systemen, z.B. COSMO-LEPS oder SRNWP PEPS, weiter, die Wetterereignisse mit einer Ausdehnung von 20 bis 30 km erfassen können. Aber auch dem EPS-Verfahren mit dem höchsten Auflösungsvermögen, dem noch in Entwicklung befindlichen COSMO-DE EPS, sind Grenzen gesetzt. Bei einem horizontalen Auflösungsvermögen von 2,8 km sollten die zu erfassenden Ereignisse eine Ausdehnung von mindestens 9 km aufweisen. Einzelne Gewitterzellen, die während der warmen Jahreszeit als Wärmegewitter in Erscheinung treten, werden somit wahrscheinlich nicht erfasst.

Dabei kann das EPS nur so „gut" sein wie das jeweils antreibende deterministische Modell. Ereignisse, die von diesem aus physikalischen Gründen nicht erfasst werden können, wird auch das EPS nicht zeigen.

4 Anwendung der hier vorgestellten EPS-Verfahren

Welches Verfahren wann angewendet wird, ist abhängig vom Vorhersagezeitraum. Für Prognosen von mehr als 5 bis 6 Tagen im Voraus werden über mehrere Modellläufe hinweg konsistente Strukturen gesucht, die möglichst von den Modellen verschiedener Vorhersagezentren abgebildet werden. In diese Betrachtungsweise werden EPS-Produkte wie EPS-Mittel, Spread sowie Cluster einbezogen. Ziel ist die Erstellung einer möglichst konsistenten Konsensvorhersage. Augenmerk wird vor allem auf unwetterrelevante Strukturen wie Austropfprozesse mit kräftiger Zyklogenese, Vb-artige Entwicklungen, Blockierungslagen oder eine scharf ausgeprägte Frontalzone gelegt. In diesem Falle kann man durch Einbeziehung von Wahrscheinlichkeiten der Überschreitung warnrelevanter Schwellenwerte die Prognose aufwerten. Mittels AFREG-MIX oder MOS kann ein Downscaling auf regionale Ebene erfolgen. Die Ergebnisse dieser Betrachtung werden im DWD in den „Weiteren Aussichten" der „Wochenvorhersage Wettergefahren" publiziert.

Zur Betrachtung des „frühen“ mittelfristigen Vorhersagezeitraumes, d.h. für Prognosen für drei bis etwa fünf Tage im Voraus steht als weiteres Produkt der EFI zur Verfügung. Mit dessen Hilfe lässt sich die Intensität möglicher Ereignisse in Bezug auf klimatologische Normalwerte grob abschätzen. Die Einbeziehung von Überschreitungswahrscheinlichkeiten warnrelevanter Schwellenwerte ermöglicht eine detailliertere Einschätzung. Das EPS des EZMW ist für den frühen mittelfristigen Vorhersagezeitraum optimiert. Daher sollten sich die Aussagen im Wesentlichen auf dieses System stützen. Ergänzend kann noch COSMO-LEPS herangezogen werden, das insbesondere über orografisch gegliedertem Gelände eine Präzisierung der Aussagen ermöglicht. Die Resultate dieser Überlegungen bilden den Hauptbestandteil der „Wochenvorhersage Wettergefahren“.

Liegt das zunächst mittelfristig erkannte unwetterrelevante Ereignis bereits im kurzfristigen Vorhersagezeitraum, gewinnen neben COSMO-LEPS und SRNWP-PEPS deterministische Verfahren mehr und mehr an Bedeutung. Das EPS des EZMW tritt in den Hintergrund und sollte für Prognosen im Kürzestfristbereich, d.h. unterhalb von 36 Stunden Vorhersagezeit, nicht mehr genutzt werden. Für diesen Vorhersagezeitraum unterscheiden sich im Regelfall auch die deterministischen Lösungen nicht wesentlich.

Für den Vorhersagezeitraum unterhalb von 24 Stunden oder gar für das Nowcasting, das ein Prognosezeitfenster von 12 Stunden abdeckt, sollte das zu betrachtende Ereignis in der Analyse vorhanden sein und sich somit anhand relevanter Strukturen bzgl. seiner Intensität und Lage qualitativ abschätzen lassen (z.B. extrem hohe CAPE- und PPW-Werte, KO-Index unter -10 oder Luftdruckfall von mehr als 10 hPa innerhalb von drei Stunden, Böen im Einzugsgebiet). Neben den aus der Analyse gewonnenen Erkenntnissen ließen sich anhand des Outputs hoch auflösender regionaler Modelle bzw. des sich noch in Entwicklung befindenden COSMO-DE-EPS entsprechende Vorwarnungen ableiten.

5 Fazit

EPS-basierte Vorhersageprodukte sind aus der operationellen Praxis nicht mehr wegzudenken. Sie ermöglichen für alle Scales, d.h. alle Vorhersagezeiträume und Größen der betrachteten Region eine Abschätzung des Risikos von extremen und/oder extremen Wetterereignissen. Stärken und Schwächen sowie die Grenzen der einzelnen Verfahren wurden hier diskutiert. Die Vorhersagbarkeit bestimmter Entwicklungen lässt sich einschätzen.

EPS-basierte Prognoseverfahren sind kein Allheilmittel zur Verhinderung von Fehlprognosen. Bei der Nutzung EPS-basierter Methoden kommt es darauf an, aus einer unüberschaubaren Vielzahl von Informationen die Muster, Strukturen und Signale zu selektieren und zu verfolgen, die für die jeweilige Fragestellung, d.h. synoptische Situation, relevant sind.

Eine aus vielen Jahren Praxis gewonnene synoptische Erfahrung ist erforderlich, um erkannte Muster und Strukturen in ihrer Entwicklung zu beobachten, zu werten und richtig zu interpretieren. Daher wird durch die verstärkte Nutzung von EPS-basierten Verfahren in naher Zukunft die Bedeutung des Prognostikers nicht abnehmen.

Literatur

BALDAUF, M., FÖRSTER, J., KLINK, S., REINHARDT, T., SCHRAFF, C., SEIFERT, A., STEPHAN, K., 2007: Modell- und Datenbankbeschreibung für COSMO-DE - Stand Februar 2007. *Deutscher Wetterdienst*, Offenbach.

PALMER, T. N., BUIZZA, R., LEUTBECHER, M., HAGEDORN, R., JUNG, T., RODWELL, M., VITART, F., BERNER, J., HAGEL, E., LAWRENCE, A., PAPPENBERGER, F., PARK, Y-Y., VON BREMEN, L., GILKMOUR, I., 2007: The Ensemble Prediction System - Recent and Ongoing Developments. Technical Memorandum No. **540**. *ECMWF*, Reading.

MOLTANI, A., MARSIGLI, S., PACCAGNELLA, T., 2007: Fife years of limited-area ensemble activities at ARPA-SIM: The COSMO-LEPS system. 11th Workshop on Meteorological Operational Systems, Reading, 12-16 November 2007.

PERSSON, A., GRAZZINI, F., 2007: User Guide to ECMWF forecast products. Version 4.0. *ECMWF*, Reading.

promet, Jahrg. 35, Nr. 1-3, 30-38
© Deutscher Wetterdienst

H. WEINGÄRTNER, U. SCHICKEDANZ, M. GÖBER

4 Wetterwarndienst

Weather Warning Management

Zusammenfassung

Die Erstellung und Herausgabe von amtlichen Warnungen gehören zum gesetzlichen Auftrag und damit zu den Kernaufgaben des Deutschen Wetterdienstes. Den Schwerpunkt im Leistungsprozess Wettervorhersage- und Warndienst bilden die Basiswarnungen. Dabei wird ein breites Nutzerspektrum mit Informationen über insgesamt 28 Warnereignisse informiert. Ein wichtiger Aspekt ist dabei, dass die vollständige Warninformation mittels Internet für die Öffentlichkeit kostenfrei abrufbar ist. Das Warnsystem ist dreistufig aufgebaut, wobei beginnend mit einer Frühwarninformation eine Woche vor dem erwarteten Ereignis bis zur konkreten Landkreiswarnung die zeitliche und räumliche Präzision laufend zunimmt. Zur Optimierung des Warnprozesses führt der DWD sowohl eine kontinuierliche Kommunikation mit den Nutzern der Warninformation als auch eine Qualitätsüberprüfung der Warnprodukte mittels modernster Verifikationsverfahren durch. Dabei hat sich gezeigt, dass sich die Basiswarnungen zu einer räumlich und zeitlich detaillierten sowie nutzerorientierten Warninformation auf Landkreisebene entwickelt haben. Die Qualität der Warninformation ist dabei deutlich angestiegen, so wurde beispielsweise die Anzahl der unnötigen Warnungen (Falsche Alarme) bei Gewittern in den letzten Jahren etwa halbiert. Neue Verfahren, die im Zuge der Einrichtung des Nationalen Warnzentrums (NWZ) ab 2010 zum Einsatz kommen werden, sollen weitere Qualitätsverbesserungen bei gleichzeitiger Schonung personeller Ressourcen bringen. Ein Warnsystem außerhalb der auf Landkreise bezogenen Basiswarnungen mit speziellen regionalen Aspekten stellt der von der DWD-Regionalzentrale in Stuttgart und Meteo Schweiz in Zürich gemeinsam betriebene Sturmwarndienst am Bodensee dar. Aus Windprognosen, die sich bei Gründung des Sturmwarndienstes Bodensee vor knapp 70 Jahren noch mit den Grundregeln der klassischen Synoptik begnügen mussten, ist ein High-Tech-Produkt der modernen Wettervorhersage geworden. Auch hier finden laufende Qualitätsüberprüfungen statt, die eine Steigerung der Traffer von 65 auf etwa 90 % in den letzten Jahren bei deutlicher Absenkung der Falschen Alarme zeigen. Der Sturmwarndienst Bodensee ist im Zuge dieser Entwicklung ein Aushängeschild erfolgreicher internationaler Zusammenarbeit geworden.

Abstract

The compilation and publishing of official warnings is a legal duty and therefore one of the core responsibilities of the German Weather Service. The Basis Warnings are the main focus of the weather forecasting and warning service and provide a wide variety of users information about 28 different warning events. An important aspect of these warnings is that all of the information is available to the public, via the internet, free of charge. The warning system consists of three different levels, from early warning information which provides a broad description of an expected weather event issued one week in advance, through to the high detailed district warnings which provide much more precise information about the time and location of a specific weather event. To optimize the warning process the DWD maintains regular contact with users of the warning system. It also performs quality control checks of the warnings by employing the most modern verification techniques. By doing so it has shown that the Basis Warnings on a district level have developed into a user orientated warning product which provides important details about the time and area of a specific event. The quality of the information in the warnings has also been significantly improved. For example, the number of unnecessary warnings (false alarms) for thunderstorms has halved in the last years. In the course of establishing a new National Warning Centre, which is expected to come into operation in 2010, new procedures have been developed which should further improve the quality of the warnings. This will be achieved by simultaneously improving the efficient use of decreasing human resources. An example for a regional warning system beside the Basis Warnings is the joint venture between the DWD Regional Centre in Stuttgart and Meteo Swiss in Zurich, which provides the Storm Warning Service for the Lake of Constance. Wind prognoses which at the foundation of the Storm Warning Service for the Lake of Constance nearly 70 years ago were subjected to the basic rules of classic synoptic meteorology have become a High-Tech product of modern weather forecasting. Again, continual quality control checks take place that have shown an increased success rate from approximately 65 to around 90 percent in the last years with a clear decrease in the false alarm rate. The Storm Warning Service for the Lake of Constance has become in the course of this development a successful example of international cooperation.

1 Grundlagen

1.1 Anforderungen an den Wetterwarndienst

Im Gesetz über den Deutschen Wetterdienst ist „die Herausgabe von amtlichen Warnungen über Wettererscheinungen, die zu einer Gefahr für die öffentliche Sicherheit und Ordnung führen können …“ als Auftrag festgeschrieben. Der DWD nimmt dies als Kernaufgabe im Leistungsprozess Wettervorhersage- und Warndienst wahr. Nutzer der Warninformation sind die breite Öffentlichkeit über die Medien, die Lagezentren der Katastrophenschutzeinrich-

tungen, die Einsatzführer von Feuerwehr, Technischem Hilfswerk und weiteren Hilfsorganisationen, Hochwasserzentralen, Wasser-, Energie- und Bauwirtschaft, Verkehr und Winterdienste sowie alle Veranstalter und Organisationen, die Verantwortung für Menschen und Material tragen, welche wetterbedingten Gefahren ausgesetzt sind. Die vom DWD herausgegebene amtliche Warninformation muss:

- umfassend und strukturiert sein, das heißt alle in Mitteleuropa möglichen Wettergefahren sind zu berücksichtigen und meteorologisch sinnfällig nach Schwere der Auswirkung anhand von Schwellenwerten in einem Warnereigniskatalog zu erfassen,
- räumlich und zeitlich differenziert sein, das heißt die erwarteten Warnereignisse müssen so weit als möglich räumlich eng begrenzt und im zeitlichen Verlauf exakt prognostiziert werden,
- rechtzeitig vorliegen, das heißt es muss möglich sein, geeignete Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Die Balance zwischen frühzeitiger Information und der mit wachsender Vorhersagezeit zunehmenden Prognoseunschärfe muss warnereignis- und nutzerorientiert gefunden werden,
- unentgeltlich und jederzeit frei verfügbar sein, das heißt im Rahmen der staatlichen Daseinsvorsorge ist die Warninformation eine Grundversorgung, auf die jedermann uneingeschränkt Anspruch hat.

See- und Luftfahrt haben spezielle, hier nicht dargestellte Anforderungen an den Warndienst. Im Bereich der Medizinmeteorologie gibt es Warnungen vor Hitze und UV-Belastung, welche hier auch nicht beschrieben sind.

1.2 Warnereignisse

Es wurden 28 Warnereignisse definiert, für die standardisierte Basiswarnungen erstellt werden, welche den größtmöglichen Nutzerkreis abdecken sollen (siehe Tab. 4-1 bis 4-6). Aufgrund der landkreisbezogenen Organisation des Katastrophenschutzes wurden die Landkreise als räumlicher Bezug für die Warnungen gewählt, verbunden mit einer weiteren Differenzierung in 200-Meter-Höhenstufen. Die kleinste räumliche Warnzelle ist also ein bestimmter Landkreis (bzw. eine kreisfreie Stadt) in einer bestimmten Höhenstufe. Alle Landkreise und Höhenstufen in Deutschland ergeben zusammen 932 Warnzellen. In der Regel werden mehrere Warnzellen von einer Basiswarnung erfasst. Die Warnungen werden nach Gefährlichkeit beziehungsweise Schadenauswirkung des erwarteten Warnereignisses klassifiziert: Wetterwarnungen (gelb), markante Warnungen (ocker), Unwetterwarnungen (rot) und Extreme Unwetterwarnungen (violett). Nachfolgende Tabellen zeigen alle Warnereignisse in sechs Warngruppen mit den zugehörigen Schwellenwerten sowie Angaben über die angemessene Vorlaufzeit der Warnungsausgabe vor dem eintreffenden Ereignis.

1.3 Dreistufiges Warnsystem

Das räumlich und zeitlich in drei Stufen gegliederte Warnsystem stellt sicher, dass mit Annäherung eines gefährlichen Wetterereignisses die Herausgabe immer detaillierterer Information erfolgen kann. Die Frühwarninformation basiert auf den numerischen Vorhersagemodellen einschließlich der Ensemble-Prognosen (siehe Beiträge 2, 3 und 12). Für den präventiven Katastrophenschutz und die interessierte Öffentlichkeit wird täglich vormittags die Wochenvorhersage Wettergefahren herausgegeben, welche im mittelfristigen Zeitraum von 2 bis 7 Tagen großräumig erwartete markante Wettersituationen oder Unwetterereignisse mit einer qualitativen Einschätzung der Eintreffwahrscheinlichkeit (möglich, wahrscheinlich, sehr wahrscheinlich) benennt. Im Zeitraum von 48 bis 12 Stunden vor einem erwarteten signifikanten Wetterereignis erfolgt die Vorwarninformation als regelmäßiger Warnlagebericht 5 mal täglich für Deutschland und 12 Regionen oder - bei erwartetem Unwetter – auch frühestmöglich als landkreisbezogene Unwetter-Vorwarnung. Schließlich werden mit einer Vorlaufzeit von 12 bis 0 Stunden vor einem erwarteten Ereignis die landkreisbezogenen Basiswarnungen herausgegeben. Vorwarninformation und Basiswarnungen basieren auf den deterministischen numerischen Vorhersagemodellen mit angeschlossenem statistischem Postprocessing (MOS, Warn-MOS, siehe Beiträge 2, 6, 8 und 10) sowie insbesondere bei konvektiven Warnereignissen auf den Nowcasting-Prozeduren mit aktuellsten Wetterbeobachtungen und Fernerkundungsdaten.

1.4 Produktion und Kommunikation der Warninformation

Die Zahl der vom DWD erstellten Warnprodukte ist erheblich. Pro Jahr werden 365 Wochenvorhersagen Wettergefahren, 23725 Warnlageberichte und durchschnittlich 20 000 Basiswarnungen (davon 1300 Unwetterwarnungen = 6,5%) herausgegeben. Konkrete Nutzer der Warninformation werden unmittelbar per Fax, E-Mail oder SMS informiert und bei Bedarf auch telefonisch beraten. Die Öffentlichkeit wird über die Medien informiert, wobei das Internet die zentrale Rolle spielt. Auf seinen Internetseiten “www.dwd.de” und „www.wettergefahren.de“ hat der DWD zusammen pro Tag durchschnittlich 63 000 Besuche durch 43 000 unterschiedliche Nutzer. Die Besucher informieren sich ausführlich, denn bei jedem Besuch werden im Mittel 18 Seiten aufgerufen, also mehr als 1 Million “Page Impressions“ pro Tag, wobei der Bereich Wetter und Warnungen mit Abstand am häufigsten nachgefragt wird.

Das Interesse an der Warninformation und damit die Internetzugriffe schwanken naturgemäß. An Tagen mit Unwetter sind 2 bis 3 Millionen “Page Impressions“ die Regel, bei extremen Wetterereignissen auch deutlich mehr. Spitzenreiter ist nach wie vor der 18. Januar 2007, der Tag des Orkans Kyrill, an dem 9,4 Millionen mal auf DWD-Seiten zugegriffen wurde. Zusätzlich wird bei Unwetterlagen wiederholt und ständig aktualisiert die Medieninformation Unwetter direkt an die Nachrichtenredaktionen der Rundfunk- und Fernsehanstalten gesendet, um über die Medien die breite Öffentlichkeit zu erreichen.

Warnereignis	Kriterien	Vorlauf [h]	Bemerkungen
Windböen	ab 50 km/h Bft 7	6 - 1	In 10 Meter Höhe über offenem Gelände Böen in exponierten Gipfellagen als Einzelfall-entscheidung
Sturmböen	ab 65 km/h Bft 8 – 9	6 - 1	
Schwere Sturmböen	ab 90 km/h Bft 10	6 - 1	
Orkanartige Böen	ab 105 km/h Bft 11	6 - 1	
Orkanböen	ab 120 km/h Bft 12	6 - 1	
Extreme Orkanböen	überörtlich ab 140 km/h Bft 12+	6 - 1	

Tab. 4-1: Warnereignis „Wind-, Sturm- und Orkan-Böen“ mit Kriterien und Vorlaufzeit.

Warnereignis	Kriterien	Vorlauf [h]
Starkregen	10 - 25 l/m² in 1 Stunde 20 - 35 l/m² in 6 Stunden	3 - 0
Heftiger Starkregen	> 25 l/m² in 1 Stunde > 35 l/m² in 6 Stunden	2 - 0
Dauerregen	25 - 40 l/m² in 12 Stunden 30 - 50 l/m² in 24 Stunden 40 - 60 l/m² in 48 Stunden	12 - 2
Ergiebiger Dauerregen	> 40 l/m² in 12 Stunden > 50 l/m² in 24 Stunden > 60 l/m² in 48 Stunden	12 - 2
Extrem ergiebiger Dauerregen	verbreitet > 70 l/m² in 12 Stunden > 80 l/m² in 24 Stunden > 90 l/m² in 48 Stunden	12 - 2

Tab. 4-2: Warnereignis „Stark- und Dauer-Regen“ mit Kriterien und Vorlaufzeit.

Warnereignis	Kriterien	Vorlauf [h]	Bemerkungen
Glätte	durch überfrierende Nässe nach starker Taubildung, durch sehr starke Reifablagerung	6 - 1	Einzelfall-entscheidung: auch bei überfrierender Nässe mit (verbreitet) erheblichen Verkehrsbehinderungen
Glätte	nach Schneefall	1 - 0	
Örtlich Glatteis	kurzzeitig oder kleinräumig durch gefrierenden Regen oder Sprühregen	3 - 0	
Glatteis	verbreitet Glatteisbildung durch gefrierenden Regen oder Sprühregen am Boden oder an Gegenständen	3 - 0	

Tab. 4-3: Warnereignis „Glätte“ mit Kriterien und Vorlaufzeit

Warnereignis	Kriterien	Vorlauf [h]	Bemerkungen
Leichter Schneefall	bis 5 cm in 6 Stunden bis 10 cm in 12 Stunden	6 - 1	Einzelfall-entscheidung in Lagen über 800 Meter
Schneefall	5 bis 10 cm in 6 Stunden 10 bis 15 cm in 12 Stunden über 800 m: bis 30 cm in 12 Stunden	6 - 1	
Schneeverwehung	Neuschnee oder lockere Schneedecke 5 – 10 cm und wiederholt Böen ab Bft 6	6 - 1	
Starker Schneefall	> 10 cm in 6 Stunden > 15 cm in 12 Stunden über 800 m: > 30 cm in 12 Stunden	6 – 1	
Starke Schneeverwehung	Neuschnee oder lockere Schneedecke > 10 cm und wiederholt Böen ab Bft 8	6 - 1	
Extrem starker Schneefall	verbreitet > 25 cm in 12 Stunden über 800 m: > 50 cm in 12 Stunden	6 - 1	
Extrem starke Schneeverwehung	Neuschnee oder lockere Schneedecke > 25 cm und wiederholt Böen ab Bft 8	6 - 1	

Tab. 4-4: Warnereignis „Schneefall und -verwehungen“ mit Kriterien und Vorlaufzeit.

Der DWD festigt damit das „Single-Voice-Prinzip“: die Öffentlichkeit soll bei drohenden Wettergefahren unverzüglich und umfassend informiert werden und die Darstellung der Gefahrenlage soll verlässlich aus einer amtlichen Quelle ohne Irritation mittels festgelegter Begrifflichkeit und klar definierten Schwellenwerten erfolgen. So können angemessene Entscheidungen unmittelbar getroffen werden. Alle privaten meteorologischen Dienstleister können die vollständige DWD-Warninformation jederzeit unverzüglich und unentgeltlich erhalten, um diese inhaltlich unverändert an ihre Kunden weiterzugeben und damit das “Single-Voice-Prinzip“ zu unterstützen.

1.5 Objektivierung und Automation

Der DWD verfolgt mit seiner Strategie der Zentralisierung und Automation im Vorhersagedienst zwei Ziele: einerseits, vor dem Hintergrund ständig steigender Anforderungen, die Verbesserung der Qualität und Nutzerorientierung von Vorhersagen und Warnungen trotz schrumpfender Personalressourcen und andererseits die Entlastung der Meteorologen im wissenschaftlichen Betriebsdienst von automatisierbaren Routineaufgaben und dadurch die Freisetzung von Kapazität für manuell wertschöpfende Prozesse in der synoptischen Praxis. Hierzu wurde das Verfahren AutoWARN entwickelt (siehe Beitrag 11), welches von zentraler Bedeutung für die Modernisierung des Wetterwarndienstes ist. Dabei wird aus aller verfügbaren und für die Vorhersage nutzbaren Information (Wetterbeobachtungen, Fernerkundungsdaten, Nowcasting- und Modellergebnisse sowie Produkte des statistischen Postprocessing) automatisch ein Warnstatus generiert. Er umfasst alle 28 definierten Warnereignisse bis 72 Stunden Vorhersagezeit für jeden beliebigen Ort beziehungsweise frei wählbaren geographischen Raum in Deutschland. Zunächst wird noch die kategorische Ja/Nein-Aussage für das Eintreffen des Warnereignisses prognostiziert, später wird der Warnstatus auch mit Wahrscheinlichkeitsaussagen versehen.

Der Meteorologe im **N**ationalen **W**arnzentrum (NWZ) der **V**orhersage- und **B**eratungszentrale (VBZ) in der Zentrale in Offenbach überwacht den automatisch generierten Warnstatus kontinuierlich; er modifiziert diesen nach eigenem Ermessen auf der Grundlage seiner eigenen synoptischen Erkenntnisse und Bewertungen, verwirft den Warnstatus ggf. auch komplett und generiert manuell einen neuen. Schließlich gibt er den Warnstatus als endgültigen frei, woraufhin die automatische Produktion und Verteilung von alphanumerischen und graphischen Warnprodukten erfolgt, die in der räumlichzeitlichen Strukturierung und in der Auswahl der Warnereignisse nutzerorientiert gestaltet wird. Die (teil-)automatische Warnungserstellung soll ab Herbst 2011 zentral im NWZ erfolgen.

Warnereignis	Kriterien	Vorlauf [h]	Bemerkungen
Gewitter	elektrische Entladung, auch in Verbindung mit Windböen	3 - 0	
Starkes Gewitter	in Verbindung mit Sturmböen, schweren Sturmböen, Starkregen oder Hagel	3 - 0	mindestens ein Zusatzkriterium muss erfüllt sein
Schweres Gewitter	in Verbindung mit Orkan(artigen)Böen, heftigem Starkregen oder Hagel > 1.5 cm	2 - 0	

Tab. 4-5: Warnereignis „Gewitter" mit Kriterien und Vorlaufzeit.

Warnereignis	Kriterien	Vorlauf [h]
Nebel	überörtlich Sichtweite unter 150 Meter	6 - 1
Frost	verbreitet Lufttemperatur unter 0 Grad C für April bis Oktober in Lagen bis 800 m	12 - 2
Strenger Frost	überörtlich oder anhaltend Lufttemperatur unter – 10 Grad C in Lagen bis 800 m	12 - 2
Starkes Tauwetter	mit Dauerregen bei einer vorhandenen Schneedecke > 15 cm	12 - 2

Tab. 4-6: Sonstige Warnereignisse mit Kriterien und Vorlaufzeit.

2 Sturmwarndienst Bodensee

2.1 Übersicht und Historie

Der Bodensee dient mit seinen 571 Quadratkilometern Wasseroberfläche nicht nur als riesiger Trinkwasserspeicher, sondern ist auch ein bedeutendes Revier für Fischfang und Wassersport. Nicht nur am Ufer des Sees tummeln sich im Sommerhalbjahr viele Erholungssuchende, auch auf dem Wasser gehen viele Freizeitskipper ihrem Hobby nach. Ein gut funktionierender Sturmwarndienst ist somit in dieser stark touristisch geprägten Region von hoher Bedeutung. So wurde 1937 erstmals am Bodensee ein Warnsystem installiert, das nach Unterbrechung im zweiten Weltkrieg im Jahre 1950 wieder aufgenommen wurde und seit dieser Zeit ununterbrochen existiert. Tradition hat dabei die grenzüberschreitende Zusammenarbeit der Wetterdienste. Bereits 1950 wurde der Sturmwarndienst Bodensee gemeinsam von der Wetterwarte Friedrichshafen und der Flugwetterwarte Zürich betrieben. Diese intensive Zusammenarbeit zwischen Meteorologen in Deutschland und der Schweiz hat bis heute Bestand. Dabei wurden auch die Warnregionen immer weiter verfeinert. War in den Anfängen des Sturmwarndienstes der Bodensee noch ein einziges Warngebiet, folgte 1966 die Aufteilung in Ost- und Westteil und im Jahre 2000 dann die Dreiteilung in Westteil, Mitte und Ostteil des Sees (Abb. 4-1). Im Jahr 2009 wird der Sturmwarndienst gemeinsam von der Regionalzentrale Stuttgart des Deutschen Wetterdienstes und Meteo Schweiz in Zürich wahrgenommen. Erfolgte in den Anfängen des Sturmwarndienstes die Signalisierung der Stürme noch durch das Hissen von Korbbällen und Flaggen, so ist heutzutage von jedem Punkt des Bodensees aus zumindest eine der 36 jeweils 2000 Watt starken Sturmwarnleuchten sichtbar.

Die Starkwind- und Sturmwarnungen am Bodensee sind Nowcast-Warnungen und sollen eine Stunde vor dem Ereignis den Seenutzer vor gefährlichen Windereignissen ab Böenstärke 6 warnen. Innerhalb einer Stunde ist es von jedem Punkt des Sees aus möglich mit einem Wasserfahrzeug das rettende Ufer anzulaufen. Das Problem für die Seenutzer in dieser eher windschwachen Region besteht vor allem darin, dass die Winde oftmals aus einer flautenähnlichen Situation heraus sehr jäh auffrischen. So wird in Stuttgart und Zürich (Abb. 4-2) das Wettergeschehen vor allem in Bezug auf die Prognose dieser Ereignisse überwacht.

2.2 Warnkriterien und Warnstrategie

Die Warnschwellen am Bodensee liegen für Starkwindwarnungen bei Böen der Stärke 6 (25 Knoten) und für

Abb. 4-1: Grenzen der Warngebiete und Lage der Wetter- und Windmessstationen am Bodensee.

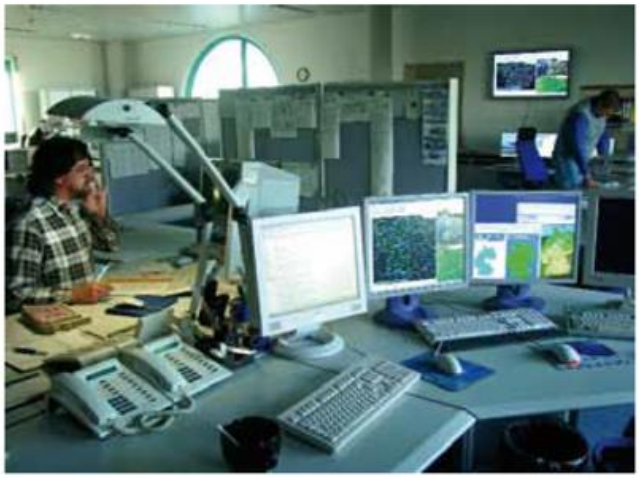


Abb. 4-2: Modernste Technik unterstützt die Prognostiker in Zürich und Stuttgart.

Abb. 4-3: Wasserhosen über dem Bodensee am 4. August 2006 (Quelle: Meteo Schweiz).

Sturmwarnungen bei Böen der Stärke 8 (34 Knoten). Wird von den Meteorologen in Zürich oder Stuttgart das Erreichen der Warnschwellen innerhalb der nächsten Stunden für möglich gehalten, erfolgt telefonische Kontaktaufnahme, bei der das weitere Vorgehen und gegebenenfalls eine Warnungsausgabe festgelegt werden. Die Warnungsausgabe wird dann an die Wasserschutzpolizei Konstanz bzw. die Seepolizei Thurgau zur Auslösung der Signalisierung weitergegeben. Die Signalisierung erfolgt vom 1. November bis zum 31. März von 7 bis 20 Uhr. Um den Belangen der Berufsfischer gerecht zu werden, die in der warmen Jahreszeit bereits früh auf dem See ihrer Tätigkeit nachgehen, werden die Warnungen vom 1. April bis zum 31. Oktober von 6 bis 22 Uhr signalisiert. Wie Tabelle 4-7 zeigt, sind auf Grund der klimatologisch windschwachen Situation am Bodensee Sturmböen ein seltenes Ereignis.

Die Warnstrategie und daraus resultierend auch die Verifikation sind wegen des Nowcastcharakters stundenbezogen ausgelegt. Das bedeutet, dass ein zwar korrekt vorhergesagtes, aber deutlich zu früh bewarntes Sturmereignis nicht als Erfolg gewertet wird. Diese Zusammenhänge werden im folgenden Kapitel „Verifikation" noch ausführlich erläutert. Im Unterschied zu maritimen Regionen - wie beispielsweise der Nordsee - spielen am Bodensee die großräumigen Windfelder im Zusammenhang mit nordatlantischen Sturmzyklonen als Antrieb für Windsituationen keine so domi-nierende Rolle. Vor allem im Sommerhalbjahr sind häufig kleinräumige konvektive Prozesse die Ursache für Sturmsituationen. So wurden beispielsweise am 4. August 2006 mehrere Wasserhosen über dem Bodensee gesichtet (Abbildung 4-3).

Im Ostteil des Sees kommen noch Föhndurchbrüche aus dem Alpenrheintal hinzu. All dies bedeutet für den Warnprozess, dass die numerischen Produkte zwar eine Abschätzung des Potenzials für Sturmereignisse liefern, die Entscheidung über eine konkrete Warnungsausgabe aber vor allem im Sommer anhand weiterer Hilfsmittel wie Radarprodukten, Blitzortung und Stationsmessungen stromauf erfolgen muss.

2.3 Verifikation

Die registrierten Windböen werden Stundenintervallen zugeordnet und mit den verschiedenen Warnungstypen und der Warnregion verglichen. Geprüft werden die Warnzeiten der Sommersaison zwischen 6 Uhr GZ (**G**esetzliche **Z**eit) und 22 Uhr GZ (16 Stunden) in den Monaten April bis Oktober und die Warnzeiten der Wintersaison zwischen 7 Uhr GZ und 20 Uhr GZ (13 Stunden) in den Monaten November bis März. Für den Westteil der Warnregion werden die Messstationen Steckborn, Sipplingen, Gailingen, Espasingen und Konstanz zugrunde gelegt. Die Station Konstanz ist auch Referenzstation für die Mitte des Bodensees, zusätzlich stehen hier die Stationen Güttingen und Friedrichshafen zur Verfügung. Die Windverhältnisse der östlichen Warnregion werden durch Altenrhein, Lindau und Bregenz repräsentiert.

Die Verifikation unterscheidet zwischen Starkwindwarnung und Sturmwarnung. Sie wird auf die einzelnen Stunden bezogen, hierbei werden Sturmwarnungen als erfolgreich gewertet bei Böen ≥34 kn (8 Beaufort), Starkwindwarnungen bei Böen ≥ 25 kn (6 Beaufort) Die Warnungen sollen bis zu einer Stunde vor der ersten beobachteten Böe bzw. dürfen bis zu einer Stunde nach der letzten Böe in Kraft sein. Überschreitungen dieses Zeitraums werden als Warnungen ohne Böen negativ belegt. Ebenso werden zu spät ausgegebene Warnungen in der jeweils ersten Stunde als Fälle nicht gewarnter Böen negativ gewertet. Jede Stunde mit Warnüberwachung wird einer der vier Klassen a bis d zugeordnet:

(a) Stunden ohne Windböe und ohne Warnung (Trivialfall, N_a),

	West	Mitte	Ost
Starkwindböen 2008	423 Stunden = 7,8 % (12,4 %)	385 Stunden = 7,1 % (10,2 %)	327 Stunden = 6,1 % (8,9 %)
Sturmböen 2008	101 Stunden= 1,8 % (3,5 %)	93 Stunden = 1,7 % (2,7 %)	117 Stunden = 2,2 % (2,1 %)

Tab. 4-7: Häufigkeit der Sturm- bzw. Starkwindstunden in den verschiedenen Seeteilen.

(b) Stunden ohne Windböe und mit Warnung (falsche Alarme, N_b),
(c) Stunden mit Windböe und ohne Warnung (Warnung verpasst, N_c),
(d) Stunden mit Windböe und mit Warnung (gerecht fertigte Warnung, N_d).

Zweifelsfrei sind die Fälle (a) und (d) als erfolgreich zu werten, als misslungen zählen die Fälle (b) und (c).

Die Kontingenztabelle 4-8 gibt einen Überblick über die Belegung der einzelnen Klassen und ist die Basis für die Ableitung diverser statistischer Maßzahlen:

Trefferrate TR: Die Trefferrate relativiert die Stunden der gewarnten Böen zur gesamten Zahl der Stunden mit Böen. Die Trefferrate schwankt zwischen 0 und 1. Der Idealwert ist 1.

$$TR = \frac{N_d}{N_d + N_c} \quad (1)$$

Rate falscher Alarme FA: Die Rate falscher Alarme relativiert die gewarnten Stunden ohne eine Böe zur Gesamtzahl der gewarnten Stunden. Sie schwankt zwischen 0 und 1. Der Idealwert ist 0.

$$FA = \frac{N_b}{N_d + N_b} \quad (2)$$

Ziel ist es, die Trefferrate möglichst hoch und die Falschalarmrate möglichst niedrig zu halten. Bei gegebener Prognosegüte kann die Steigerung der Trefferrate nur über eine Erhöhung der Falschalarmrate erreicht werden (kräftigeres Überwarnen), andererseits kann unter diesen Umständen die Falschalarmrate nur unter Inkaufnahme einer gleichzeitigen Verringerung der Trefferrate abgesenkt werden. Es muss mit dem Nutzer gemeinsam eine optimierte Balance zwischen Trefferrate und Falschalarmrate gefunden werden. Dies geschieht auf den jährlichen Sitzungen der „Internationalen Arbeitsgruppe Sturmwarndienst Bodensee“, in der nicht nur die nationalen Wetterdienste der Bodenseeanrainerstaaten, sondern auch hoheitliche Nutzer - wie zum Beispiel die Seepolizeien - vertreten sind, die Güte und Akzeptanz der Warnungen hautnah mitbekommen. Dass in den letzten Jahren bei zunächst steigenden und dann konstant hohen Trefferraten um 90 % die Falschalarmrate laufend von rund 60 % auf etwa 20 % gesenkt werden konnte zeigt die deutliche Steigerung der Prognosequalität (Abbildung 4-4).

2.4 Ausblick

Die am Warndienst für den Bodensee beteiligten nationalen Wetterdienste sind sich einig: Die in den letzten Jahren hohe Qualität der Windwarnungen auch in Zukunft stabil zu halten, bedarf großer gemeinsamer Anstrengungen. Hilfreich ist dabei, dass in Zürich und Stuttgart die Aufbereitung und Visualisierung der Mess- und Prognosedaten für den Meteorologen in der gleichen Weise mit Hilfe des meteorologischen Arbeitsplatzsystems NinJo geschieht. Höher aufgelöste numerische Wettervorhersagemodelle sowie verstärkter Einsatz der Ensembletechnologie und verfeinerte Fernerkundungsdaten sollen den Meteorologen zukünftig helfen, die Wetterentwicklung am Bodensee noch genauer vorherzusagen. Zusammen mit der regionalklimatologischen Erfahrung der in den Wetterdiensten von Zürich und Stuttgart tätigen Prognostikern wird sich dies auch weiterhin positiv auf die Qualität der Windwarnungen auswirken.

Stunden	ohne Warnung	mit Warnung
ohne Böe	N_a	N_b
mit Böe	N_c	N_d

Tab. 4-8: Kontingenztabelle für Warnungen.

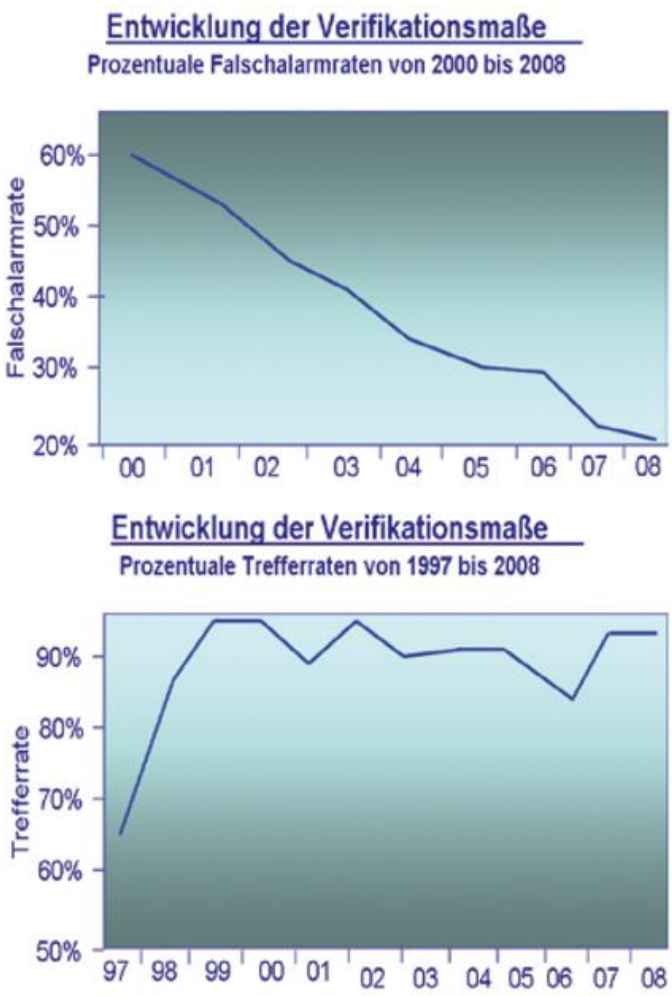


Abb. 4-4: Entwicklung von Trefferrate und Falschalarmrate in den letzten Jahren (gemittelt über alle Seeteile sowie Starkwind- und Sturmwarnungen).

Ein verantwortungsbewusster Seebenutzer sollte sich allerdings bei der Beurteilung des Wetters niemals nur auf fremde Hilfen verlassen. Es liegt in der Eigenverantwortung aller, die sich am oder auf dem See bewegen, das Wettergeschehen permanent zu beobachten und bei drohender Gefahr, zum Beispiel bei einem aufziehenden Gewitter, den See zu verlassen. Diese Verantwortung können die Wetterdienste den Seebenutzern nicht abnehmen.

3 Verifikation der Basiswarnungen

3.1 Eigenheiten der Verifikation von Warnungen

Warnungen sind spezielle Vorhersagen über mögliche bedeutsame Schäden, die aber noch vermindert werden könnten bzw. die Schadenbeseitigung ein schnelles und effektives Handeln erfordert. Hierbei muss ein recht unwahrscheinliches Ereignis mit nicht perfekten Messverfahren und Prognosewerkzeugen mit möglichst hoher Wahrscheinlichkeit vor dem Eintreffen erkannt werden, ohne jedoch ständig „Gefahr!“ zu rufen. Dabei sollte auch im Falle mäßigen Zweifels lieber gewarnt werden, da die Konsequenzen eines verpassten Ereignisses sehr viel schlimmer sind als die Konsequenzen eines falschen Alarms. Für Entscheidungen, bei denen der Schaden infolge eines verpassten Ereignisses weitaus höher ist als die Kosten einer Reaktion auf einen falschen Alarm, kann man also eine Tendenz zum Überwarnen erwarten, wie es im folgenden bestätigt wird.

In diesem Kapitel werden Beispiele für den Vergleich von Beobachtungen mit Warnungen („Verifikation“) der Basiswarnungen vor Gewitter (ja/nein, ohne Stärke), das heißt einem der schwierigsten und wichtigsten Warnereignisse, dargestellt. Dabei stellen sich Fragen wie z.B.: wie häufig tritt ein Gewitter auf, wie häufig wird ein Gewitter verpasst, das eigentlich vorhergesagt werden sollte oder wie wahrscheinlich ist ein falscher Alarm, das heißt ein Gewitter wird prognostiziert, welches aber nicht auftritt?

Die detaillierte Verifikation von Basisvorhersagen und –warnungen zum Zwecke der Information der Nutzer und zur Verbesserung der Vorhersagen ist seit Jahrzehnten selbstverständlicher Teil des Wettervorhersageprozesses im DWD und wird regelmäßig dokumentiert.

3.2 Wie wird geprüft? – Ereignisorientierte, landkreisgenaue Verifikation

Die Gewitterwarnungen für die etwa 400 Landkreise in Deutschland werden mit den flächendeckenden Messungen von Blitzortungssystemen stündlich verglichen. Dabei wird angenommen, dass ein Gewitter in einem Landkreis aufgetreten ist, wenn mindestens eine Blitzmessung eine systemabhängige Feldstärke überschritten hat.

Um für die Endnutzer einer Basiswarnung eine Aussage über die Qualität der Warnungen machen zu können, sollte die Verifikation für warnwürdige Ereignisse erfolgen, das heißt für in der Regel mehrstündige, zeitlich homogenisierte Intervalle. Dieser Art der Verifikation liegt die Annahme zugrunde, dass die Nutzer eine Warnung als ein homogenes Ereignis wahrnehmen, auf das sie zu reagieren haben, während die zeitlichen Details des beobachteten Ereignisses nicht wesentlich für die Auswirkungen sind.

Für unsere Hauptnutzer (Feuerwehren, Katastrophenschutz) ist die Handlungsebene meist der Landkreis, weshalb für die hier dargestellte nutzerorientierte Verifikation auch mit dieser räumlichen Auflösung verglichen wird und nicht auf gröberen Skalen, wie es z.B. für die Medien ausreichend wäre. Zu bestimmen ist nun die Anzahl korrekter Warnungen („Treffer“), falscher Alarme, verpasster Ereignisse und korrekter Nichtwarnungen.

Natürlicherweise kann man den Zeitraum einer Warnung aus Nutzersicht als ein „zu bewertendes Ereignis“ bezeichnen. Erreicht in diesem Zeitraum eine Beobachtung den Schwellenwert der Warnung, das heißt gibt es eine warnwürdige Beobachtung, so liegt ein „Treffer“ vor. Gibt es keine warnwürdige Beobachtung, so stellt die Warnung einen „falschen Alarm“ dar.

Für die Abgrenzung von „zu bewertenden Ereignissen“ in unbewarnten Zeiträumen, das heißt für „verpasste Ereignisse“, wählen wir drei Stunden als Zeitraum, in welchem weitere Blitzbeobachtungen nicht als zusätzliches Ereignis gewertet werden. Tritt der erste Blitz in der Stunde unmittelbar vor Warnungsbeginn auf, so war er vermutlich Auslöser dieser Warnung. Deshalb wird er mit der Warnung zusammen als ein „zu bewertendes Ereignis“ betrachtet und dieses Ereignis als verpasst, weil verspätet gewarnt, gezählt. Trat der erste Blitz jedoch in der ersten Stunde der Warnung auf, so kann man die Warnung entweder als verspätet zählen, da die Nutzer eine gewisse Vorbereitungszeit benötigen, oder als „noch nützlich“. Letzteres gilt zum einen in großen Landkreisen, in denen die ersten Blitze zunächst in einer Ecke auftreten und das andere Ende des Landkreises vielleicht erst ein bis zwei Stunden später erreicht wird. Zum anderen hat so eine Nachwarnung z. B. für die Feuerwehren auch deshalb einen Informationswert, weil sie von offizieller Stelle eine Aussage „da passiert jetzt was“ erhalten, bevor sie durch eine hochschnellende Zahl von eingehenden Anrufen alarmiert werden. Auswertungen basierend auf beiden Sichtweisen können Information sowohl für die Nutzer als auch für die Optimierung des Warnprozesses liefern.

Schließlich kann man die Bewertung noch weiter unterteilen, z.B. nach Treffern, die aber innerhalb einer deutlich zu langen Warnung erfolgten (mindestens drei aufeinander folgende Stunden ohne Blitzmessung) oder nach verpassten Ereignissen, die aber berechtigt nachgewarnt wurden, das heißt bei denen im Laufe der Nachwarnung noch warnwürdige Ereignisse auftraten.

3.3 Stand und Entwicklung der Gewitterwarnungsverifikation

Aufgrund der von Sommer zu Sommer unterschiedlichen Zahl von beobachteten Gewitterereignissen werden alle folgenden Absolutzahlen auf 100 beobachtete Ereignisse bezogen. Für die Verifikation von Gewittern ergab sich (Abb. 4-5), dass im Sommer 2003 83 % der beobachteten Ereignisse rechtzeitig vorhergesagt wurden (TR = 83 %, siehe Kapitel 2.3), während dies 2009 in 70 % der Fälle gelang. Weiter unten wird allerdings dargestellt, dass die hohe Trefferrate in 2003 häufig mit sehr langen Warnungen erreicht wurde, bei denen zunächst viele Stunden keine

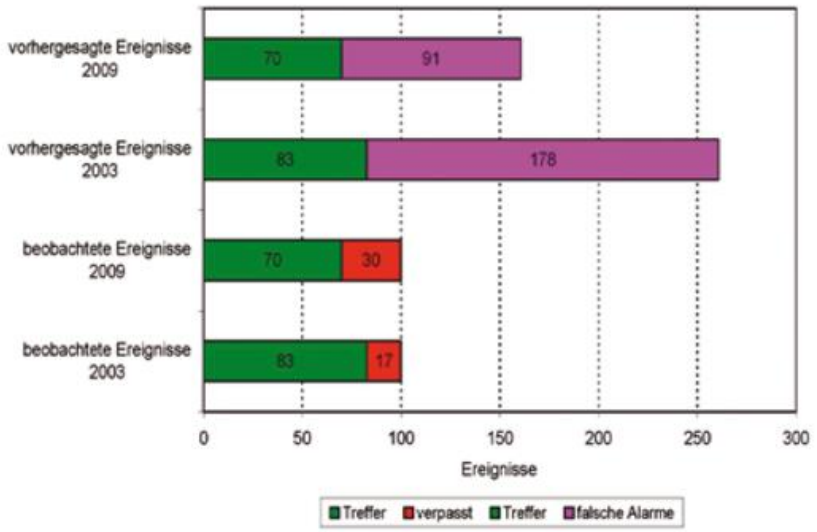


Abb. 4-5: Anzahl von Gewitterereignissen, die getroffen oder verpasst wurden bzw. sich als falscher Alarm herausstellten, bezogen auf 100 beobachtete Ereignisse. Obere Balken: Aufteilung der vorhergesagten Ereignisse in Treffer und falsche Alarme. Untere Balken: Aufteilung der beobachteten Ereignisse in getroffene und verpasste Ereignisse. Vergleich der Sommer 2003 und 2009.

Gewitter auftraten, was den Nutzen solch einer Warnung einschränkt. Andererseits wurden im Sommer 2003 bezogen auf 100 beobachtete Ereignisse 261 Ereignisse vorhergesagt (das heißt 2,6 mal so häufig wie nötig), von denen sich 178 als komplett falscher Alarm herausstellten (und 83 als Treffer, siehe oben). Im Jahr 2009 erwiesen sich hingegen von 161 vorhergesagten Ereignissen nur 91 als falscher Alarm, das heißt die Anzahl der falschen Alarme konnte halbiert werden gegenüber 2003. Die Rate falscher Alarme (FA, siehe Kapitel 2.3) sank somit von 68 % auf 56 %.

Aus der folgenden Abbildung (Abb. 4-6) können Details der Eigenschaften der „Treffer" und der „verpassten Ereignisse" entnommen werden, das heißt eine weitere Aufteilung der „beobachteten Ereignisse" in Abb. 4-5. Besonders auffällig ist für 2003 der hohe Anteil von Warnungen (73 von 83), die zwar ein eingetretenes Gewitterereignis umfassten, aber gleichzeitig viel zu lang waren („Treffer und viel zu lang"), so dass ein Nutzer verwirrt sein konnte über die andauernde Alarmierung, ohne dass etwas passierte. In 2009 war diese Zahl hingegen nur ein Fünftel so groß und die Zahl der wirklich perfekten Warnungen (rechtzeitig herausgegeben und von gerechtfertigter Andauer, „reine Treffer") mit 55 von 100 beobachteten Ereignissen fünf mal so hoch wie in 2003.

Zur Interpretation dieser Resultate kann noch die Beobachtung hinzugezogen werden, dass in 2003 viele Gewitterwarnungen schon morgens bzw. mittags herausgegeben wurden, das heißt etliche Stunden vor dem Höhepunkt der Gewittertätigkeit am späten Nachmittag. Seit etwa 2005 erfolgen die Warnungen jedoch zeitlich und auch räumlich noch präziser. Allerdings ist dadurch der Vergleich der Qualität der Warnungen von 2003 und 2009 problematisch. Dies zeigt sich vor allem für die Definition der „verpassten Ereignisse", bei der eine wirklich zeitlich präzise Landkreiswarnung per definitionem eine höheres Risiko hat, ein Ereignis zu verpassen, als eine zeitlich ausgedehnte Warnung. Zum Beispiel wird man mit der Aussage „heute Nachmittag Gewitter in Südhessen" ein geringeres Risiko eingehen, ein Gewitter zu verpassen, als mit der jedoch für einen konkreten Nutzer deutlich brauchbareren Information „Gewitter von 16 bis 19 Uhr im Stadtkreis Frankfurt".

Der Anteil der komplett verpassten Ereignisse hat leicht abgenommen von 10 % auf 6 %. Zugenommen hat jedoch der Anteil der Ereignisse, die zunächst verpasst und dann aber durch eine gerechtfertigte Warnung gefolgt wurden, das heißt Warnungen die etwas zu spät herausgegeben wurden, aber immerhin noch für einen Teil eines Landkreises von Wert gewesen sein können, insbesondere bei großen Landkreisen („verpasst und Treffer"). Diese Zunahme folgt aus dem größeren Risiko einer zeitlich präziseren Warnung, ein Ereignis zu verpassen, wie oben beschriebenen. Allerdings treten auch diese Ereignisse häufig nicht komplett unbemerkt auf, da auf das Gewitterrisiko meist schon in den regionalen Vorwarninformationen (siehe Kapitel 1.3) hingewiesen wird.

Definiert man aus Nutzersicht eine noch gröbere Einteilung der Warnungsqualität in „gute" (perfekt und noch nützlich) und „schlechte" Warnungen (verpasste Ereignisse und falsche Alarme), so erkennt man in Abb. 4-7, dass

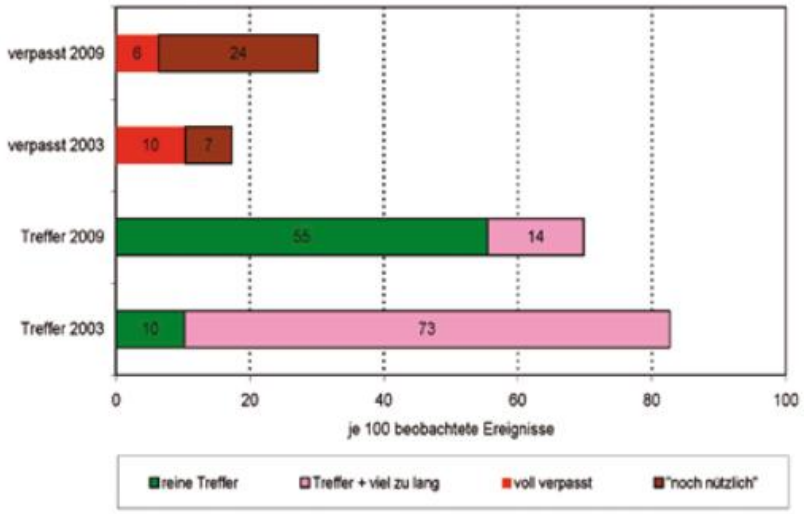


Abb. 4-6: Anzahl von Ereignissen, die getroffen oder verpasst wurden, bezogen auf 100 beobachtete Ereignisse. Obere Balken: Aufteilung der verpassten Ereignisse in komplett verpasste Ereignisse und solche Ereignisse, bei denen auf eine verpasste Beobachtung eine gerechtfertigte Nachwarnung folgt („noch nützlich"). Untere Balken: Aufteilung der korrekt detektierten Ereignisse in „reine" Treffer und solche Treffer, die im Rahmen einer deutlich zu langen Warnung (mindestens 3 Stunden hintereinander keine Blitzbeobachtungen) erfolgten. Vergleich der Sommer 2003 und 2009.

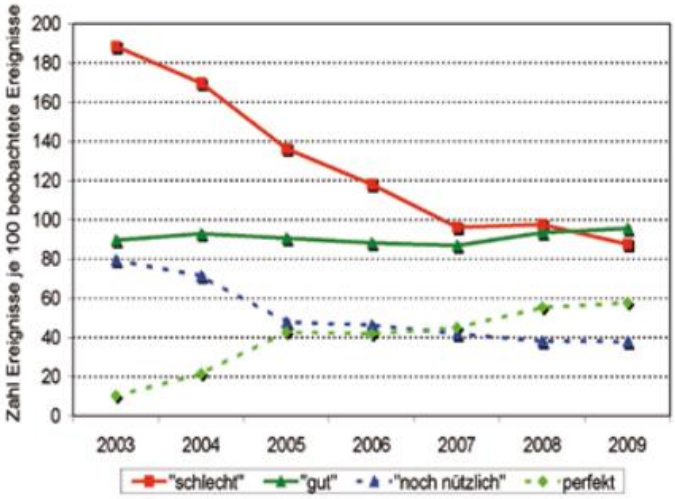


Abb. 4-7: Anzahl von „perfekten" Warnungen (reine Treffer), „schlechten" Warnungen (ganz verpasst bzw. reiner falscher Alarm) und „noch nützlichen" Warnungen (zunächst verpasst, dann aber gerechtfertigt nachgewarnt sowie Treffer, die aber innerhalb einer deutlich zu langen Warnung erzielt wurden) bezogen auf 100 beobachtete Ereignisse.

der Anteil der guten Warnungen über die letzten sieben Sommer nahezu konstant war. Jedoch wurde der Anteil der „schlechten" Warnungen stetig reduziert auf knapp die Hälfte seines Anfangswertes, so dass das Verhältnis aus „gut" und „schlecht" nun „fifty-fifty" ist.

Nur etwa 10 % der Gewitterereignisse wurden ganz verpasst. Dabei stieg der Anteil der „perfekten" Warnungen (das heißt rechtzeitig und ohne zeitliches Überwarnen) an und liegt mittlerweile bei knapp 60 %. Jede zweite Gewitterwarnung war im Sommer 2009 „gut", während dies zu Beginn der Landkreiswarntätigkeit nur auf ein Drittel zutraf.

3.4 Fazit

Die Basiswarnungen haben sich von großräumigen und lang andauernden Warnungen zu räumlich und zeitlich detaillierten, landkreisbasierten Warnungen entwickelt, wodurch die Nutzer auch eine erhebliche Reduzierung der falschen Alarme erfahren haben.

Anhand dieser nutzerorientierten Gewitterwarnungsverifikation lässt sich feststellen: Es gab und gibt nur wenig (10 %) Gewitterereignisse, die nicht von einer Basiswarnung erfasst wurden. Selbst in diesen Fällen wurde zuvor im regionalen Vorwarnbericht meist auf die Möglichkeit von Gewittern hingewiesen. Der Anteil der Ereignisse, die rechtzeitig bewarnt wurden durch eine Warnung vernünftiger Länge, nahm stetig zu und liegt nun bei 60 %. Das Überwarnen konnte stark verringert werden, so dass nur noch jede zweite Warnung einen falschen Alarm darstellt.

In Zukunft müssen noch bessere Frühindikatoren für das Einsetzen der Gewittertätigkeit ermittelt werden (Zunahme der tiefen Konvektion sichtbar in Radarbildern und insbesondere in Satellitenbildern; noch schnellere Reaktion auf erste Blitzbeobachtungen; besseres „Handling" der Warnherausgabe beziehungsweise Aufhebung). Dabei sollte andererseits die räumliche Differenzierung weiter verbessert werden, um die Falschalarmrate nicht ansteigen zu lassen. Einige dieser Tätigkeiten sollten durch die Generierung automatischer Warnstatusvorschläge verbessert werden können („AutoWARN", siehe Beitrag 11). Eine bessere räumliche Detaillierung gelingt jetzt schon für die „Seenwarnungen" (siehe Kapitel 2), für die jedoch bei deutlich kleinerem Warngebiet ein höherer Arbeitsaufwand anfällt im Vergleich zu den Landkreiswarnungen.

Literatur

APPT, J., 2003: Analysis of Basin-Scale Internal Waves in Upper Lake Constance, *Mitteilungen des Instituts für Wasserbau* **123**, Universität Stuttgart, Stuttgart.

APPT, J., STUMPP, S., 2003: Die Bodensee-Messkampagne 2001, IWS/CWR Lake Constance measurement program 2001, *Mitteilungen des Instituts für Wasserbau* **111**, Universität Stuttgart, Stuttgart.

JOLLIFFE, I., STEPHENSON, D., 2003: Environmental Forecast Verification: A Practioner's Guide in Atmospheric Science. *John Wiley and Sons*, Chichester, UK, 254 pp.

MÜHLEISEN, R., 1977: Starkwinde auf dem Bodensee. *Meteorologische Rundschau* **30**, 15-22.

STANSKI, H.R., WILSON, L.J., BURROWS, W.R., 1989: Survey of common verification methods in meteorology. *World Meteorological Organization*, World Weather Watch, Techn. Rep. **8**, 114 pp.

VETTER, M., SCHICKEDANZ, U., et. al., 2008: Sturmwarndienst Bodensee, Verifikationsbericht 2007, Internes Arbeitspapier DWD, Regionalzentrale Stuttgart, Filderstadt.

WAGNER, S., 2004: Räumlich statistische Untersuchung der Windverhältnisse auf dem Bodensee auf der Grundlage an Land gemessener Winde und des Windes in der freien Atmosphäre. Diplomarbeit (Umweltschutztechnik) am *Institut für Wasserbau*, Universität Stuttgart.

WWRP/WGNE, 2009: Joint Working Group on Forecast Verification Research: Forecast Verification – Issues, Methods and FAQ, http://cawcr.gov.au/projects/verification.

W. SEIFERT

5 Seewettervorhersage

Marine Weather Forecast

Zusammenfassung
Bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts begannen in Deutschland, und fast zeitgleich international, systematische Messungen, Auswertungen und Warnvorhersagen maritim-meteorologischer Parameter. Das war der Beginn des Seewetterdienstes, der zunächst durch die **I**nternationale **Me**teorologische **O**rganisation (IMO) und danach durch deren Nachfolgerin, der WMO, einheitliche Regelungen erfuhr und immer weiter neuen Anforderungen angepasst wird. Als Teil der Vorhersagetätigkeit des Deutschen Wetterdienstes leitet sich der Seewetterdienst unmittelbar aus dem DWD-Gesetz ab und ist durch Rahmen- und Verwaltungsvereinbarungen mit öffentlichen Nutzern in seinen Aufgaben definiert. Vor allem die Wind-, Seegangs- und Wettervorhersage für die deutschen Zuständigkeits- und Anrainer-Seegebiete sind daher bedeutsam. Darüber hinaus werden auch spezielle Beratungen und Vorhersagen für öffentliche Nutzer, insbesondere für die Sturmflutwarndienste des Bundes und der Bundesländer, erstellt. Dazu gehen die Modellkette des DWD, das EZMW-Modell und andere operationell verfügbare Modelle als Basis ein. Zur Risiko-Abschätzung im Vorwege von Sturmflutlagen kommen immer mehr probabilistische Verfahren zur Anwendung. Dies gilt auch für Wind- und Driftvorhersagen für das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie zur Bewertung der Eisbedeckung im Winter. Schließlich werden maritim-meteorologische Vorhersageverfahren auch im Bordwetterdienst in der Arktis und Antarktis eingesetzt.

Abstract
At the end of the 19th century in Germany as well as in other countries maritime measuring methods and forecasts started. The new maritime forecast service was regulated by the International Meteorological Organization, after the world war by the World Meteorological Organization. In Germany the maritime forecast service is regularized by federal law and by special administrative regulations. Especially governmental user as the Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie and the surge forecast services of the federal states in Germany are highly interested in excellent wind- and weather forecasts. For risk management of surge-forcasts and forecast of icecovering more and more probabilistic forecasts are required as the eps-solutions of the ECMWF. At least a special maritime forecast duty is the advisory service on board of the German research vessels, especially POLARSTERN in the Arctic and Antarctic and METEOR.

1 Einleitung

International begründete der Seewetterdienst den Beginn synoptischer Tätigkeiten in Europa. Mit Einrichtung von Sturmwarnstellen an den deutschen Küsten ab Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelte sich rasch ein organisierter maritim-meteorologischer Dienst. In Deutschland war die Deutsche Seewarte eine solche Institution, die erst nach dem Zweiten Weltkrieg mit der Neugründung des Deutschen Wetterdienstes und des Deutschen Hydrographischen Institutes in deren Aufgaben aufging. In anderen Ländern geschah die Entwicklung ganz ähnlich. Wie für den Flugwetterdienst wurden auch für den maritimen Vorhersagedienst international fachlich verbindliche Grundlagen durch die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) geschaffen. Daher sind die Produktketten und Verfahrensweisen der verschiedenen nationalen Seewetterdienste vergleichbar.

Der Seewetterdienst im Deutschen Wetterdienst überwacht maritim-meteorologisch die Teilgebiete der Nord- und Ostsee und warnt vor Starkwind, Sturm und Orkan. Seewetterberichte werden regelmäßig alle drei Stunden erneuert; Warnungen werden bei Bedarf häufiger herausgegeben und über verschiedene Kommunikationssysteme verbreitet. Die Sprachen sind Deutsch und Englisch.

Neben der Erstellung von Wetterberichten und Warnungen ist die Beratung für spezielle maritime Nutzer, vor allem aber behördliche Nutzer und Hilfsorganisationen von besonderer Bedeutung. Die tidenabhängigen Schifffahrtsstraßen der Mündungsgebiete von Elbe, Weser und Ems werden vom BSH (**B**undesamt für **S**eeschifffahrt und **H**ydrographie) mit ständig aktualisierten Wasserstandsvorhersagen betreut. Dazu sind treff-

sichere Windvorhersagen nötig, die mit zunehmender Windgeschwindigkeit (wegen der quadratischen Wirkung des Windrucks) immer sensibler in die Vorhersage eingehen. Im Winter wird der Eisdienst des BSH über die mittlere zu erwartende bodennahe Strömung über der Ostsee beraten, was - wie auch bei der Unterstützung der Wasserstandsvorhersage - ensemblegestützt durchgeführt wird.

Ein interessanter Bereich maritimer Vorhersagen sind solche zur unmittelbaren Beratung von Schiffsführung und Wissenschaft auf Forschungsschiffen. Vor allem in den Polargebieten wird eine umfangreiche Wind-, Seegangs- und Eisberatung erwartet, die durch die Bordwetterwarten mit gut ausgebildeten Meteorologen geleistet wird.

2 Grundlagen seewetterdienstlicher Tätigkeiten

Wesentliche internationale Grundlagen sind die Regularien der WMO, darunter insbesondere das Manual on Marine Meteorological Services, Volume I und II (WMO 2001). Hiermit hat die WMO die Durchführung der maritimen Dienstleistungen von Warnungen, Seewetterberichten und Vorhersageparametern sowie die Kommunikationswege geregelt. Dies steht in Übereinstimmung mit der UN-Konvention zur Sicherheit von Leben auf See (SOLAS, **S**afety **o**f **L**ifes **a**t **S**ea) und mit den IMO-Richtlinien (IMO = International Maritime Organization). Die Bundesrepublik trägt diesen Verpflichtungen über das DWD-Gesetz Rechnung, wo gemäß § 4, Absatz 1, Ziffer 2 die meteorologische Sicherung der Luft- und Seefahrt sowie nach Ziffer 3 die Herausgabe von amtlichen Warnungen festgeschrieben ist. Weitere darauf aufbauende oder flankierende Grundlagen finden sich unter anderem in einer Zielvereinbarung zwischen BMVBS (**B**undes**m**inisterium für **V**erkehr, **B**au und Stadtentwicklung) und DWD, in einer Rahmenvereinbarung zwischen dem DWD und dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie sowie in Verwaltungsvereinbarungen mit den norddeutschen Küstenländern Schleswig-Holstein, Hamburg, Bremen und Niedersachsen.

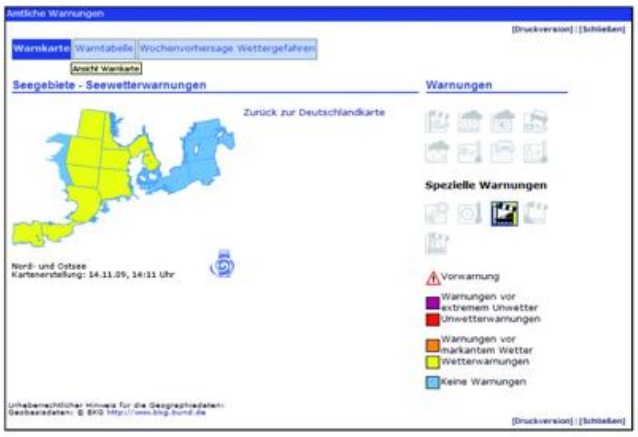


Abb. 5-2: Warndarstellung im Internet.

Neben graphischen Produkten werden besonders die Struktur der Berichte, ihre Formatierung und einzelne Schwellenwerte der Parameter für Warnungen geregelt, deren Gebietsaufteilung für Nord- und Ostsee in Abb. 5-1 dargestellt ist. Außerdem ist die NAVTEX-Vereinbarung (NAVTEX = **Nav**igational **tex**t messages) im Rahmen des globalen maritimen Sicherheitssystems relevant. Am NAVTEX-Dienst, einem internationalen automatischen Wetter- und Warnfunkdienst für seegehende Schiffe, nimmt Deutschland durch den DWD seit August 2006 teil. Weltweit gibt es über 120 NAVTEX-Sender, davon fast 50 im Bereich Europa und im Mittelmeerraum. Der Deutsche Wetterdienst verbreitet Warnungen über Kurzwelle des Wetterdienstsenders Pinnberg und über die internationale Mittelwellenfrequenz für NAVTEX sowie über Küstenfunkstellen und über das Internet (Abb. 5-2).

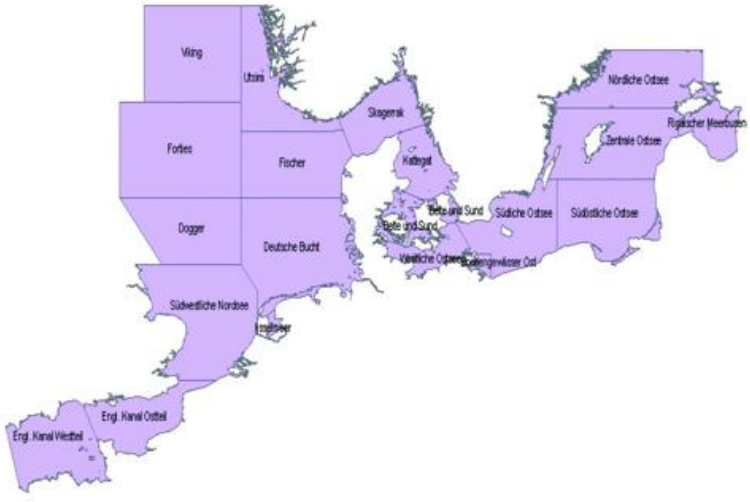


Abb. 5-1: Durch GMDSS vorgegebene Teilgebiete der Nord- und Ostsee.

3 Der Seewetterdienst im DWD

3.1 Produkte und Abläufe

Die seewetterdienstlichen Produkte des DWD sind in den „**V**orschriften **u**nd **B**etriebsunterlagen“ (VuB 18) beschrieben und leiten sich aus der Prozessbeschreibung „Basisvorhersagen“, Teilprozess „Maritime Vorhersage, ab.

Weitere Produkte richten sich nach dem Sendeprogramm des Wetterdienstsenders Pinneberg, nach den Vorprodukten auf der Basis der direkten Modellvorhersage, denen weitgehend eine manuell erarbeitete Wetterlage vorangestellt wird, und den Anforderungen und Sendezeiten von Küstenfunkstellen und Rundfunk-Anstalten.

Die Arbeitsabläufe vom Seemeteorologen und vom Fachdienst sind weitgehend dem Zeittakt von 6 oder 12 Stunden zugeordnet. Die Produktionsstruktur wird definiert durch eine Reihe von Nord- und Ostseeberichten, Küstenwetterberichte, Mittelfristberichte und Off-Shore-Berichte. Beratungen für Behörden, Hilfsorganisationen und Bundesschiffe ergänzen die ständigen Aufgaben. Eingebettet in den Ablauf sind regelmäßige (NAVTEX) und fallbezogenen Warnungen für die zuständigen Seegebiete.

3.2 Verfahren bei der Produktion maritimer Vorhersageprodukte

Grundsätzlich sind die Verfahren der Vorhersageerstellung eine Kombination von synoptischen Methoden und Nutzung numerischer Vorhersageprodukte. Das analysierte Bodendruckfeld mit Fronten im Ausschnitt von der US-Ostküste bis in das östliche Mitteleuropa und von Grönland bis in die Subtropen ist nach wie vor eine wichtige Grundlage der maritimen Vorhersagearbeit. Danach schließt sich der Vergleich verschiedener numerischer Analysen an und die Bewertung von numerischen Vorhersagen zum Analysetermin mit dem aktuellen Zustand. Zur Vorhersage der Wind- und Seegangsfelder sowie der anderen maritim-meteorologischen Parameter wie Sicht, Eisverdriftung, Vereisung und ihrer Veränderungen werden numerische Vorhersagen mit synoptischen Methoden im Kürzestfristbereich verknüpft. Daraus ergeben sich dann die Grundlagen für Warnungen.

Bis in die späten 70-er Jahre wurden die Wind- und Seegangsvorhersagen nahezu ausschließlich nach synoptisch-empirischen Verfahren erstellt. Ein wesentlicher Parameter zur Windvorhersage war hierbei die dreistündige Bodendrucktendenz. Ihre zeitliche Veränderung (praktisch die zweite zeitliche Ableitung des Bodendrucks) und die räumliche Veränderung (die Verlagerung von Drucktendenzfeldern) liefert als Antrieb für die kürzestfristige Windentwicklung ausreichend gute Ergebnisse. Die Seegangsvorhersagen wurden dazumal auf der Basis der von der WMO empfohlenen Verfahren erstellt. Mit den numerischen Atmosphären- und und Seegangsvorhersagemodellen können nun wesentlich treffsichere Vorhersagen über 24 Stunden, ausreichend gut sogar bis 96 Stunden erstellt werden.

NORD-UND OSTSEE : LSM-NORD-UND_OSTSEE

DEUTSCHE BUCHT					
Sa 14/15-Sa 14/18	Wind	:	S 7 (42%)	S 8 (26%)	S 6 (24%)
	See	:	SW 4m(24%)	SW 3m(16%)	S 2m(12%)
Sa 14/21-So 15/00	Wind	:	SW 8 (28%)	SW 7 (25%)	S 7 (18%)
	See	:	SW 5m(36%)	SW 4m(29%)	SW 3m(16%)
So 15/03-So 15/06	Wind	:	SW 5 (43%)	SW 6 (32%)	SW 7 (9%)
	See	:	SW 2m(38%)	SW 3m(22%)	SW 1m(19%)
So 15/09-So 15/12	Wind	:	S 5 (48%)	S 6 (19%)	SW 5 (13%)
	See	:	S 1m(47%)	SW 1m(27%)	S 2m(14%)
So 15/15-So 15/18	Wind	:	S 6 (38%)	SW 5 (10%)	S 5 (10%)
	See	:	S 2m(27%)	SW 1m(19%)	SW 2m(19%)
So 15/21-Mo 16/00	Wind	:	SW 5 (35%)	SW 4 (29%)	SW 3 (14%)
	See	:	SW 1m(53%)	SW 2m(28%)	
HUMBER					
Sa 14/15-Sa 14/18	Wind	:	S 8 (56%)	SW 8 (39%)	SW 7 (3%)
	See	:	S 4m(30%)	S 5m(24%)	SW 5m(20%)
Sa 14/21-So 15/00	Wind	:	SW 7 (38%)	SW 8 (24%)	SW 6 (19%)
	See	:	SW 3m(38%)	SW 4m(26%)	SW 2m(18%)
So 15/03-So 15/06	Wind	:	SW 5 (39%)	SW 6 (25%)	S 4 (17%)
	See	:	SW 1m(31%)	SW 2m(27%)	S 1m(26%)
So 15/09-So 15/12	Wind	:	S 4 (41%)	SW 4 (28%)	S 5 (15%)
	See	:	S 1m(64%)	SW 1m(31%)	
So 15/15-So 15/18	Wind	:	SW 4 (54%)	SW 5 (37%)	SW 3 (4%)
	See	:	SW 1m(81%)	S 1m(11%)	
So 15/21-Mo 16/00	Wind	:	SW 5 (40%)	SW 4 (32%)	S 4 (21%)
	See	:	SW 1m(75%)	S 1m(21%)	

Tab. 5-1: Häufigkeitsverteilung von Wind und Seegang.

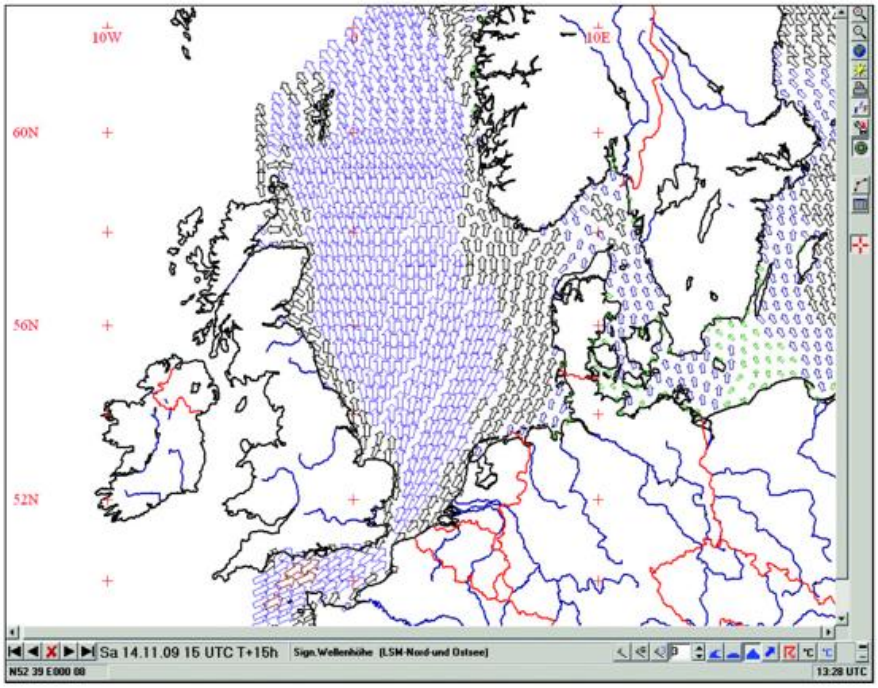


Abb. 5-3: Seegangsvorhersage.

Im Seewetterdienst wird grundsätzlich eine Visualisierung von Wind und Seegang, tropischen Wirbelstürmen, Eisberggrenzen und Meeresströmungen benötigt. Das wurde in der Vergangenheit durch manuelle Eintragungs- und Arbeitskarten gehandhabt, was entsprechenden Zeitaufwand und Verzögerungen mit sich brachte.

Erst mit Einführung des Meteorologischen Applikations- und Präsentationssystem (MAP) sowie durch dessen Nachfolgesystem NinJo können solche Parameter IT-gestützt und realtime dargestellt werden. Zusätzlich kommen auch andere Visualisierungen zur Anwendung wie Abb. 5-3 als Beispiel einer Seegangsvorhersage zeigt. Damit werden derzeit die maritimen Parameter vielfältig genutzt und unter anderem in einer Häufigkeitsverteilung dargestellt (Tab. 5-1). Die Tabelle listet für

gewünschte Seegebiete (hier am Beispiel der Deutschen Bucht) die Häufigkeitsverteilung von Wind- und Seegangsvektoren aller Gitterpunkte in diesem Seegebiet auf. Die drei häufigsten Vektoren werden angegeben.

3.3 Nutzung und Grenzen numerischer Vorhersagen

Mit leistungsstärkeren numerischen Modellen nutzt der Seewetterdienst wichtige Vorhersageinstrumente, welche die Güte dieser Dienstleistung wesentlich erhöht haben. Für den Nutzer ist natürlich eine geringe Fehlerquote ein wichtiger Güteparameter; allerdings ist die Schadenswirkung bei geringen Windgeschwindigkeiten wesentlich geringer als bei hohen Windgeschwindigkeiten. Es kommt also darauf an, gerade im oberen Bereich von Sturm oder bei Orkan zeitlich und räumlich treffsicher zu sein - also in Extremfällen. Hier gelangt auch die Seewettervorhersage an die Grenze deterministischer Vorhersagen. Die meteorologische Vorhersage muss mittels probabilistischer Verfahren in ihrer Varianz bewertet und auch verstanden werden.

Als Beispiel solchen Ansatzes wird in Abb. 5-4 eine Ensemble Darstellung mit dem COSMO-DE (LEPS) einer Sturmlage für Böen größer Beaufort 7 gezeigt, ergänzt durch eine PEPS-Darstellung („Poor Mans Ensemble") verschiedener Modelle in Abb. 5-5 für die gleiche Wetterlage. Auch die Seegangsvorhersage wird seit vielen Jahren längst modellgestützt erzeugt. Das Seegangsmodell wird vom atmosphärischen Modell angetrieben und steht damit in hoher Abhängigkeit von der Güte des Atmosphärenmodells. Bei Abweichungen von der Windvorhersage eines Modells zugunsten einer anderen Lösung ist auch die modellgestützte Seegangsvorhersage zu überarbeiten. Die Seegangsvorhersage für ein Prognosegebiet (Seegebiet) ist daher stets zu überprüfen und den prognostizierten Windverhältnissen dort einerseits sowie den stromauf vorhergesagten Verhältnissen andererseits anzupassen. Das kann in Einzelfällen zu einer umfangreichen Überarbeitung führen und erfolgt auf der Grundlage der vorher erwähnten Verfahren (siehe auch, WMO 1998).

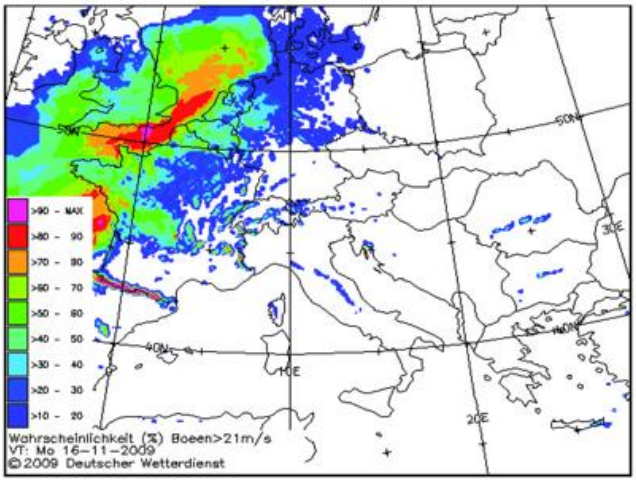


Abb. 5-4: PEPS-Darstellung für Böen > Beaufort 7.

3.4 Spezielle Vorhersagen und Beratungen

Neben der Basisproduktion und dem Warndienst nimmt der Seewetterdienst spezielle Vorhersageaufgaben wahr. Dazu gehören:

- Beratung des BSH über die Windverhältnisse über der Nordsee und Ostsee für die Wasserstandsvorhersage und Sturmflutwarnungen,
- Beratung des Eisdienstes,
- Beratung bei Fragen von Ausbreitungsberechnungen im Oberflächenwasser von Nord- und Ostsee (Havariefälle, Schiffskollisionen, Ölausbreitung),
- Monitoring weltweiter Hurrikan- und Taifunbulletins,
- Maritime Beratung und Vorhersagen auf besondere Anfrage für Off-Shore-Arbeiten,
- Unterstützung des Seeschifffahrtsreferates bei weltweiter Schiffsroutenberatung.

Die Parameter Sicht, Schiffsvereisung und Meereisentwicklung werden von den numerischen Vorhersagemodellen nur unzureichend oder gar nicht prognostiziert. Die Sichtvorhersage ist stark nowcasting-orientiert und Verfahren zur Abschätzung des Feuchtetransportes in der Grenzschicht (Warmwassernebel, Kaltwassernebel) werden vor allem qualitativ verwendet, da bei höherer Feuchte bereits kleine Feuchtedifferenzen entscheidend für Nebelbildung sein können. Diese Differenzen sind kaum quantitativ korrekt vorherzusagen. Die Gefahr winterlicher Schiffsvereisung ist in der südlichen Nordsee selten. Über der nördlichen Nordsee und über der Ostsee kommt sie jedoch häufiger vor.

Es wird ein qualitatives Vorhersageverfahren (MERTINS 1968) verwendet, das im nördlichen Nordatlantik auf vielen Fischereischutzreisen und Forschungsschiffseinsätzen entwickelt und erprobt wurde. Es ermöglicht aus den Parametern Wassertemperatur, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Anströmungswinkel eine grobe Abschätzung der Vereisungsgefahr.

Die Beschreibung und Vorhersage der Meereisentwicklung ist weitgehend auf Informationen der internationalen

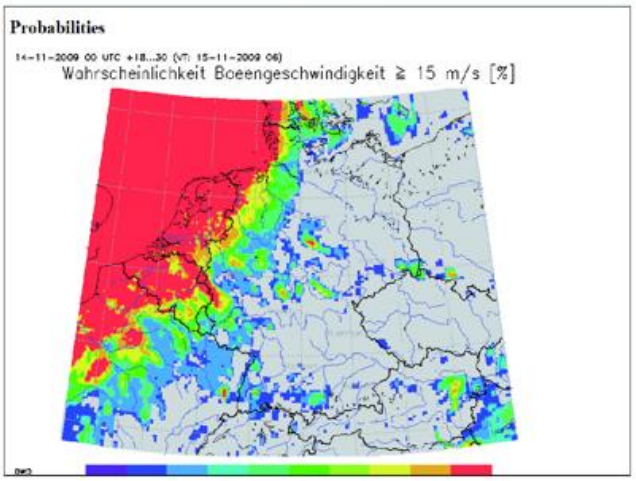


Abb. 5-5: LEPS-Darstellung für Böen > Beaufort 7.

Eisdienste gestützt. Diese werden regelmäßig beachtet und fließen in die Vorhersage ein. Die Eisbedeckung hat einen erheblichen Einfluss auf die Seegangsentwicklung. Da die stark variable Eisbedeckung nicht real-time in den Seegangsvorhersagen enthalten ist, müssen vor allem bei Windrichtungen zum Eis hin die Seegangshöhen korrigiert werden.

Neben den aktuellen Eisbeobachtungen enthalten die Eisberichte Einschätzungen der Eisentwicklung in Nord- und Ostsee bis zu einer Woche im Voraus. Die dazu erforderlichen meteorologischen Eingangsparameter werden täglich vom Seewetter-Vorhersagedienst bereitgestellt. Diese Vorhersagen werden im Winterhalbjahr (nach Beginn der Eissaison) täglich schriftlich an das BSH übermittelt. Darüber hinaus erfolgt eine individuelle Beratung am Arbeitsplatz des Seemeteorologen.

3.5 Zusammenarbeit im Küstenschutz mit den anderen Behörden

Das BSH wird sechs Mal täglich routinemäßig über die Windentwicklung in der Deutschen Bucht sowie in der westlichen und in der südlichen Ostsee beraten. Die Beratung findet mündlich am Arbeitsplatz des Seemeteorologen statt. Für Zeitintervalle um die Tidentermine müssen zum Teil zeit- und gebietsgewichtete Vorhersagen erstellt werden. Die Vorhersage ist dann ein vektorielles, zeitliches und räumliches Mittel.

Fallbezogen - bei extremem Niedrigwasser oder bei Sturmflutereignissen - findet die Beratung häufiger statt.

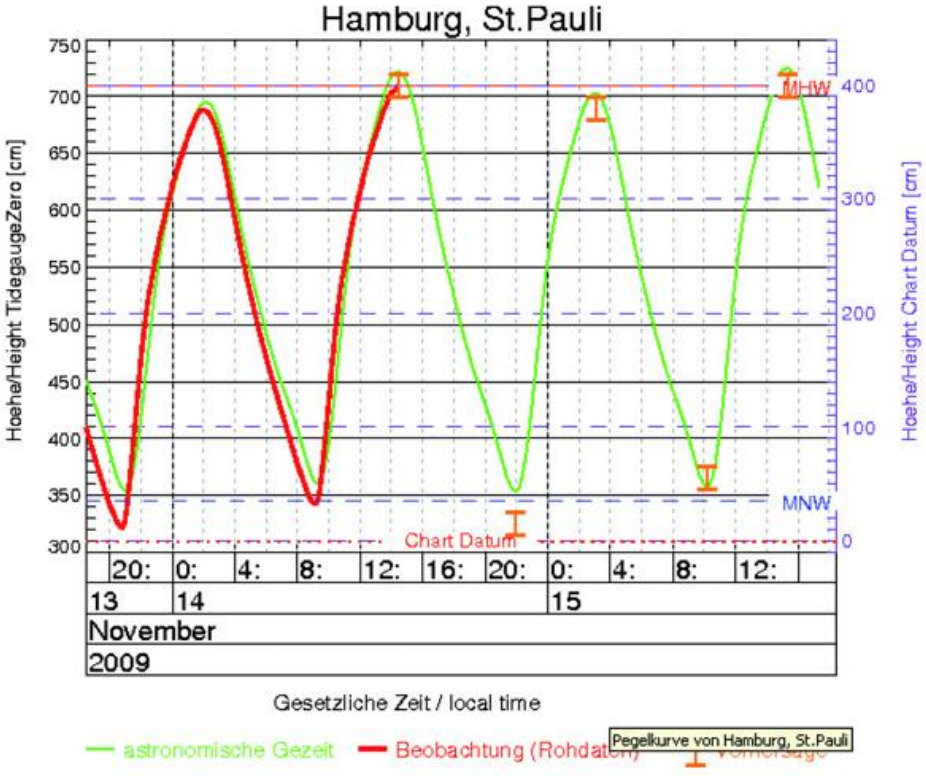


Abb. 5-6: Wasserstandsvorhersage des BSH.

Bei Erwartung einer schweren Sturmflut (> 3,5 m über **m**ittlerem **H**ochwasser - mHW) wird nach jedem Beobachtungstermin, also mindestens stündlich, die Vorhersage abgeglichen. Das Ergebnis der Wasserstandsvorhersage ist im Internet unter der BSH-Adresse zu sehen (Abb. 5-6). Der Beratungsweg zu anderen Institutionen (unter anderem **N**iedersächsischer **L**andesbetrieb für **W**asserwirtschaft, **K**üsten- und Naturschutz (NLWK); Umweltministerium Schleswig-Holstein; **Wa**sserstands**di**enst der Hansestadt Hamburg, WADI) findet fernmündlich, per Fax oder/und durch Email statt. Die Ansprüche dieser Institutionen sind mit denen des BSH vergleichbar. Der Beratungsbedarf steigt erheblich bei stauwirksamen Windfeldern und ansteigender Windgeschwindigkeit, da die Stauwirkung wegen der Energieübertragung quadratisch ansteigt.

Bei großräumigen Verschmutzungen des Oberflächenwassers in der Deutschen Bucht oder in der westlichen und südlichen Ostsee werden durch das BSH Ausbreitungs- und Driftberechnungen vorgenommen. In diesen Fällen finden ebenfalls Beratungen der Wind- und Seegangsverhältnisse in diesen Seegebieten durch den Seewetterdienst statt. Die Beratung des Meteorologen geht entscheidend ein – in der Bewertung verschiedener Modellberechnungen und in der Entscheidung für die „optimale“ Vorhersage als Teil eines Ensembles. Solche Beratungen erhalten auch die Katastrophenabwehrkräfte der Küstenländer, wie es im Fall des brennenden Schiffes „Pallas“ vor Amrum geschah und sich bei weiteren Havarien wiederholte.

4 Besondere maritim-meteorologische Beratungen

Angehörige des Seewetterdienstes werden an Bord der Forschungsschiffe METEOR und POLARSTERN eingesetzt. Auf dem FS Meteor kann weitgehend auf die globalen Atmosphären- und Seegangsmodelle des DWD und des EZMW als Beratungsgrundlage zurückgegriffen werden. Auf dem FS Polarstern sind spezielle Seegangs- und Eisberatungen mit Fahrtoptimierungsberechnungen aufgrund von Drift und Seegangsentwicklungen sowie Flugwettervorhersagen zu erstellen. Der Bedarf an maritim- und flugmeteorologischer Beratung ist sehr hoch. Er reicht von der Einsatzoptimierung von Schiffsoperationen bis hin zur Schiffs- und Flugsicherheit. Hier müssen neben Wind, Seegang, Sicht und Wetter auch Kontrast, Meereisentwicklung und Schiffsvereisung vorhergesagt werden. Diese

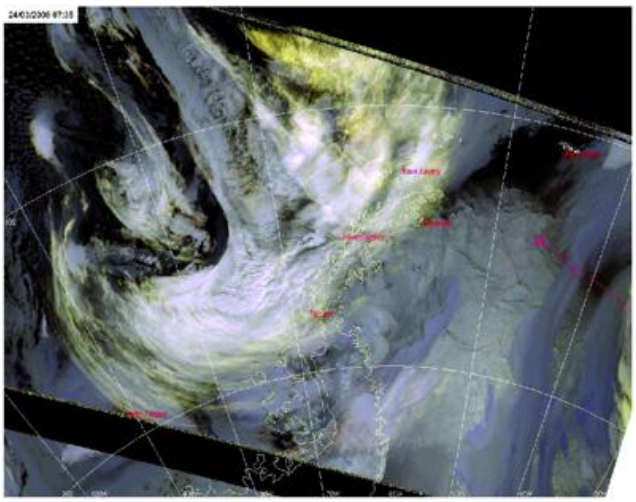


Abb. 5-7: Satellitenbild Antarktische Halbinsel und Weddell-See vom 24.03.2008.

Vorhersagen basieren zwar auf den atmosphärischen Strömungsmodellen, werden aber mit synoptisch-empirischen Methoden überarbeitet und erstellt. Die seemeteorologische Erfahrung wird durch diese Expeditionsanforderungen gestärkt und kommt der Vorhersage im Seewetterdienst später zu Gute. Als Beispiel einer Beratungsgrundlage in der Antarktis ist in Abb. 5-7 ein Satellitenbild der Antarktischen Halbinsel und der Weddell-See vom 24. März 2008 abgebildet sowie in Abb. 5-8 die dazu gehörende Bodendruckanalyse. Die Angehörigen der Bordwetterwarte nutzen ihre eigenen Analysen zur Ergänzung und zur Überwachung der Modellanalysen sowie als Vorhersagebasis im Kürzestfrist-Bereich.

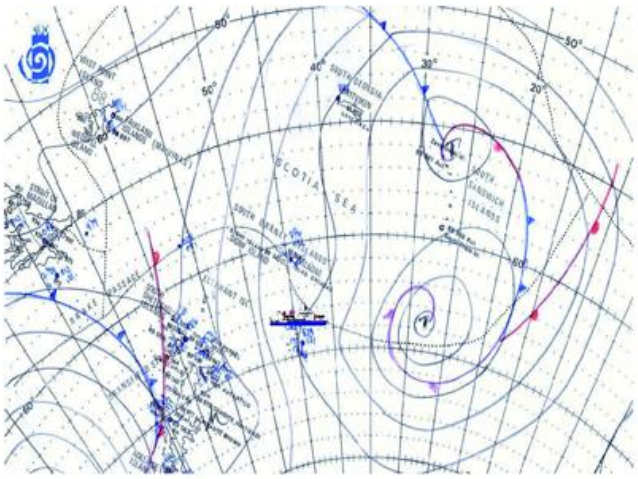


Abb. 5-8: Bodendruckanalyse der Bordwetterwarte POLARSTERN vom gleichen Tag (24.03.2008).

Literatur

WMO, 2001: Manual on Marine Meteorological Services, Vol. I und II, WMO-No. **471**. *WMO*, Genf.

WMO, 1998: Guide to Wave Analysis and Forecasting. *WMO*, WMO-Nr.702, http://www.wmo.int/pages/prog/amp/mmop/documents/WMO%20No%20702/WMO702.pdf.

IMO, 1974: International Convention vention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). Internet: http://www.imo.org/Conventions/contents.asp?topic_id=257&doc_id=647.

DWD, 2009: Betriebshandbuch Seewetterdienst, VuB-See. Vorschriften und Betriebsunterlagen **18**, *Deutscher Wetterdienst*, Offenbach.

MERTINS, H.O., 1968: Verfahren zur Bewertung von Schiffsvereisung, *Wetterlotse*.

promet, Jahrg. 35, Nr. 1-3, 45-49
© Deutscher Wetterdienst 2010

T. KRATZSCH

6 Objektivierung und Automation des Vorhersage- und Warndienstes

Objectiv methods and automatization in the forecasting and warning process

Zusammenfassung

Mit der Verbesserung der Modellprognosen, immer neuen Verfahren zur Bewertung und Kombination von Beobachtungsverfahren und Modellvorhersagen liegen in einem Vorhersage- und Warnprozess inzwischen viele, nur teilweise voneinander unabhängige Informationen vor. Im folgenden Beitrag soll die Optimierung dieser Informationen für sogenannte Punkt-Termin-Prognosen im DWD beschrieben werden. Dies erfolgt durch die Kombination von vollautomatischem Postprocessing, das heißt objektiver Kombination mehrerer Vorhersagemethoden, manueller Eingriffsmöglichkeit durch den Meteorologen und anschließender vollautomatischer Produktgenerierung. Es wird erläutert, dass die neuen Verfahren die manuellen Tätigkeiten des Meteorologen nicht ersetzen, sondern nur deren Kombination und höhere Effizienz (Mensch-Maschine-Mix) zur Steigerung der Vorhersagegüte führt. Das gilt sowohl für den klassischen Vorhersageprozess als auch für den Warnprozess im DWD.

Abstract

The increasing number and skill of numerical model forecasts as well as new post processing methods combining observations, error characteristics and predictions leads to an increasing number of available forecasts. The pool of forecast information is used for different requirements in the forecasting and warning process, those forecasts are not independent from each other. This article describes the optimization of the forecast process for Point-Time-Prognoses (PTPs). That is a combination of three steps: an automatical, objective preprocessing, an interactive quality control and modification tool for the forecasters and finally an automatical production process. The result is not a full automatization of the forecasting process, but an optimal combination of man and machine, and the strategie for both, the forecasting and the warning process.

1 Einleitung

Seit vielen Jahren werden Kunden des Wettervorhersagedienstes mit Daten beliefert, die das Wetter in dem vom Kunden gewünschten Zeitraum beschreiben. Dafür wurde in den 90er Jahren ein Satz meteorologischer Parameter definiert (siehe Tab. 7-1, Beitrag 7 in diesem Heft).

Da der Kunde im allgemeinen seine Vorhersagen für einen oder mehrere konkrete Orte (geographische Länge - geographische Breite - Höhe über NN) anfordert, ist eine optimierte Interpretation der Ergebnisse von Wettervorhersagemodellen notwendig, die sogenannte **P**unkt-**T**ermin-**P**rognose (PTP). Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Modellgitter nicht den konkret geforderten Ort als Gitterpunkt enthält. Damit ist die Nutzung des nächstgelegenen oder der umliegenden Gitterpunkte sowie eine Interpolation der Modellhöhe auf die Höhe des gewünschten Ortes unbedingt notwendig. Schnell haben sich Besonderheiten für Bergstationen, Inseln und küstennahe Stationen ergeben, auf die an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen werden soll (PEYINGHAUS 1996). Neben der einfachen, direkten Nutzung des Modelloutputs (DMO, **D**irect **M**odel **O**utput) wurden in den 90er Jahren ein Verfahren zur Korrektur systematischer Fehler des DMO entwickelt: die Kalman-Filterung (KALMAN 1960). Durch einen Vergleich des vorhergesagten Satzes von Wetterparametern mit den tatsächlich vor Ort beobachteten Werten wurden Vorhersagefehler korrigiert. Für Orte, an denen keine Beobachtung vorlag, erfolgte eine Interpolation der Vorhersagefehler auf benachbarte Orte durch Wichtungen.

Ein noch weiter spezialisiertes Verfahren zur Ableitung von Punkt-Termin-Prognosen nutzt einen mehrjährigen Vergleich von Vorhersagen und Beobachtungen für denselben Ort zur Optimierung der Prognosen. Ein statistischer Vergleich von Beobachtungen und Modellvariablen, welche die Variabilität bzw. die Varianz der vor Ort beobachteten Werte am besten beschreibt, stellt neben der Optimierung deterministischer Punkt-Termin-Prognosen auch eine Möglichkeit zum Einstieg in probabilistische Vorhersagen dar. Das Verfahren „**M**odel **O**utput **S**tatistics“ (MOS) optimiert im Allgemeinen den mittleren Fehler (minimiert rmse) einer längeren Zeitreihe von Punkt-Termin-Prognosen (Entwicklungskollektiv), lässt jedoch durch die Betrachtung eines größeren Kollektivs auch andere Optimierungsmöglichkeiten zu (GLAHN 1972, KNÜPFFER 1996, HAALMAN 2003). Außerdem sind die Wahrscheinlichkeitsprognosen durch Vergleich mit realen Beobachtungen für das Entwicklungskollektiv kalibriert. Durch weitere Annahmen der räumlichen Korrelation wurden weiterhin auf MOS-Basis Guidance-Produkte (Wahrscheinlichkeiten) für das Überschreiten von Warnschellen je Landkreis (dem typischen Zuständigkeitsbereich im Katastrophenschutz) entwickelt. Somit stellt MOS auch eine wesentliche Grundlage für ein automatisiertes Warnverfahren dar.

Inzwischen hat sich die Zahl der im DWD bereitgestellten Punktterminprognosen auf etwa 2000 Orte in Deutschland und 4000 weltweit ausgeweitet. Anwendung finden solche Punkt-Termin-Prognosen vor allem bei punktweisen Internet-Darstellungen (www.dwd.de - Wetter und

Warnungen), bei verschiedenen Internet-Anbietern im sog. Postleitzahlenwetter bis hin zur weltweiten Bereitstellung von Beobachtungen und Prognosen bei www.wwis.dwd.de. Kunden des DWD erhalten diese Daten zur weiteren Verwendung in diversen eigenen Anschlussprogrammen (zum Beispiel Energieversorger).

2 Automatisches, objektives Verfahren OOG

Die von den Kunden geforderten Wetterparameter wurden - wie zuvor dargestellt - nach und nach auf Basis verschiedener Modelle und Verfahren des DWD entwickelt. Mit der Bereitstellung dieser Verfahren standen somit mehr als eine Methode zur Interpretation der Modelle auf einen Ort des Interesses hin zur Verfügung. Was lag also näher, als diese verschiedenen Verfahren automatisch miteinander optimal zu kombinieren?

Genau diesen Ansatz verfolgt die **objektive Optimierung**, welche den im Vorhersagedienst tätigen Meteorologen als Guidance (OOG, siehe Beitrag 7 „Objektive Optimierung“) bereitgestellt wird. Neben der objektiven Mischung werden von der OOG auch die Anforderungen von stündlichen Prognosen für insgesamt sieben Vorhersagetage erfüllt, da die zugrunde liegenden Modelle nicht durchweg stündliche Ergebnisse liefern und somit Interpolationen von sechs- und dreistündig vorliegenden Prognosen notwendig sind. Während die PTPs nur nach jedem neu vorliegenden Modellauf berechnet werden (typischerweise zwei Mal täglich), wird zusätzlich ein Algorithmus benötigt, der auf aktuelle Änderungen des Wetterverlaufs reagiert und diese in die bereitgestellten Punkt-Termin-Prognosen für die ersten Vorhersagestunden einarbeitet. Auch diesen Bedarf deckt die OOG ab.

Damit steht für die operationelle Kundenversorgung **eine** optimierte Datenart zur Verfügung, mit der alle Kunden versorgt werden können. Im DWD sind das neben dem breiten Spektrum diverser Kunden auch die Darstellungen der Vorhersagen im Internet-Auftritt, und die Datenart wird – vom Meteorologen überwacht – als Basis für die Straßenwetterprognosen SWIS benutzt.

3 Bedarf für eine manuelle Überwachung

Der in Beitrag 7 vorgestellte Optimierungsprozess stellt sicher in den überwiegenden Vorhersagefällen und für den größten Teil des Vorhersagezeitraums eine optimale Punkt-Termin-Prognose, stündlich für bis zu sieben Tagen dar. Jedoch hat die Praxis immer wieder gezeigt, dass es gute Gründe für eine Überwachungs- und Eingriffsmöglichkeit durch den Meteorologen gibt. Für eine explizite Überwachung jedes einzelnen Kundenproduktes besteht nicht ausreichend Zeit, dies wäre auch sehr ineffektiv. Die der Kundenversorgung zugrunde liegende Datenbasis (wie erläutert also die OOG) lässt sich jedoch sehr wohl effektiv überwachen.

Die Gründe für diese Überwachung der automatischen Kombination sind einerseits technische Aspekte, andererseits bekannte Schwächen der verwendeten Postprocessing-Verfahren und spezielle Wetterlagen, in denen eine sonst gute Standardkombination erkennbar nicht optimal ist.

3.1 Technische Aspekte

Die Konfiguration der OOG erwartet zu typischen Zeitpunkten die Zulieferung den Eingang neuer und korrekter Daten, z.B. auf Basis neuer Modelläufe oder eingehender Beobachtungen. Sind diese nicht rechtzeitig vorhanden, bleibt der OOG-Prozess aufgrund technischer Probleme stehen. Sind die Beobachtungsdaten fehlerhaft, sind auch die OOG-Daten fehlerbehaftet. Diese für den Menschen im Allgemeinen recht einfach zu erkennenden Fälle müssen durch den Meteorologen abgefangen werden, indem er Daten korrigiert oder eine andere Datenart für die Kundenversorgung auswählt als die offensichtlich fehlerhafte OOG.

3.2 Verfahrensbedingte Aspekte

Erkannte Schwächen eines vollautomatischen Verfahrens benötigen des Öfteren Wochen oder Monate, bevor sie in einer geänderten (ope-rationell überprüften) Konfiguration behoben sind. So hat das MOS-Verfahren für Böen eine mehrere Jahre andauernde Schwäche eines systematischen Overforecastings gezeigt (GÖBER 2008). Bis die Ursache gefunden und eine Neuentwicklung fertig war, konnten die Meteorologen monatelang einen „Benefit“ gegenüber den automatischen Vorhersage(vorschläge)n erzielen. Ebenso können Modellentwicklungen systematische Schwächen eliminieren, die dann MOS solange, bis eine ausreichend lange Reihe für eine Neuentwicklung vorliegt, zusätzlich, d.h. in die falsche Richtung „korrigiert“. Schließlich kann der Meteorologe zusätzliche brauchbare „Guidances“ in den Vorhersage- und Entscheidungsprozess integrieren, bevor sie in den automatisierten Kombinationsprozess integriert worden sind.

3.3 Wetterlagenabhängige Aspekte

Es gibt bei allem Fortschritt der Modell- und Verfahrensentwicklung weiterhin Wetterlagen und Parameter, die dem gut geschulten Meteorologen als Schwachpunkte der Verfahren bekannt sind, die aber in einem vollautomatischen Prozess unverändert an den Kunden gehen würden. So zum Beispiel, wenn der zeitliche Ablauf und die Intensität eines Wetterereignisses von der nationalen Modellkette nicht richtig simuliert wurde, aber auch z.B. Nebel, Bedeckungsgrad und Temperaturen bei Inversionslagen, Niederschlagsart Schnee, Schneeregen, Regen, gefrierender Regen und ähnliches. Außerdem sind die objektiven Kombinationen an längeren Zeitintervallen trainiert, aber nicht auf einzelne Wetterlagen hin optimiert worden. Diese Unzulänglichkeiten in den automatisierten Vorhersagen können sich auf einzelne Parameter, einzelne Orte, ganze Gebiete und bestimmte Vorhersagezeiträume beziehen.

Eine wetterlagenabhängige Konfiguration der OOG ist bisher nicht vorgesehen. Und solange es (z.B. hochaufgelöste) Modelle und Verfahren gibt, die nicht automatisch im OOG-Prozess berücksichtigt werden, z.B. weil sie nur wetterlagenabhängig positiven Einfluss nehmen, und eingehende fehlerhafte Beobachtungsdaten nicht komplett eliminiert werden können, ist eine Eingriffsmöglichkeit vorzusehen.

4 Manuelle Überarbeitung MMO

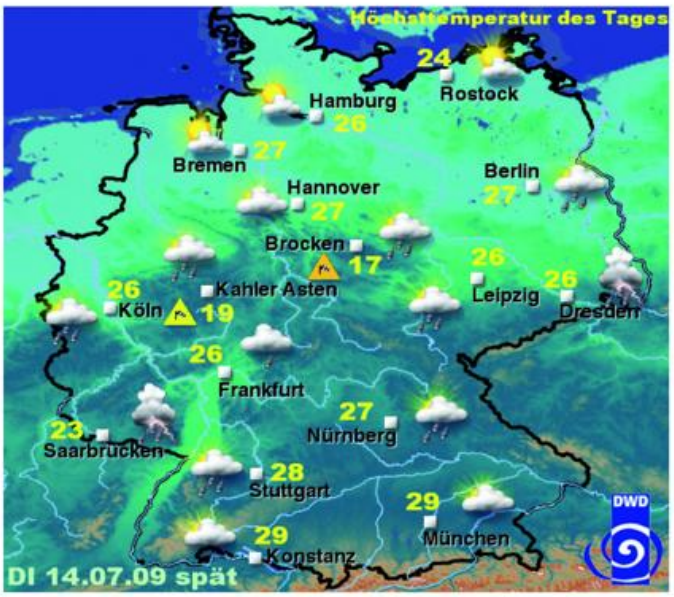
Um diese Unzulänglichkeiten auszugleichen, wird ein Vorhersagetool benötigt, das dem Meteorologen eine performante Eingriffsmöglichkeit in den Vorhersageprozess ermöglicht. Dieses NinJo-Tool und die darauf basierende Datenart wird im DWD MMO (**M**anuell **M**odifizierter **O**utput) genannt. Durch Visualisierung der Daten in der Datenbasis (DMO, MOS, OOG) mit geographischem Hintergrund einschließlich zeitlichem Verlauf wird eine effektive Kontrolle und wenn nötig Überarbeitung der Datenbasis ermöglicht. An dieser Stelle kann der Meteorologe sein Wissen einbringen, die Daten punkt-, gebiets- und parameterweise verändern und anschließend die Daten abspeichern.

Die Kundenversorgung auf MMO-Basis ist somit vom Meteorologen überwacht, kontrolliert und freigegeben. Diese Daten werden derzeit operationell für die Straßenwettervorhersagen (SWIS) im DWD eingesetzt. Man verliert damit allerdings den Vorteil des OOG-Datensatzes, ständig an die vorliegenden Beobachtungen angepasst zu sein.

5 Gesteuerte Kombination der Datenarten (OMG, Objektiv-optimierte und modifizierteGuidance)

Ein zusätzliches, in Entwicklung befindliches System, genannt OMG, soll die **manuelle** Überwachungsfunktion mit den Vorteilen einer **objektiven**, ständig aktualisierten Guidance kombinieren. Darin kann der Meteorologe seine gezielten Überarbeitungen (MMO-Aktionen) eine zeitlang schützen, bevor sie vom automatischen OOG-Prozess überschrieben werden. Somit kann er für einen bestimmten Zeitraum sicherstellen, dass seine Interventionen auch in die nachfolgende Produktgenerierung eingebunden werden. Die Datenart OMG soll so eine **manuell überwachte, objektiv kombinierte und ständig verfügbare** Datenart zur Kundenversorgung sein und für viele, möglichst alle Vorhersageprodukte Verwendung finden, nicht nur im Geschäftsbereich Wettervorhersage. Ein erster Ansatz in diese Richtung ist die Nutzung der MMO-Daten für die Erstellung von Hitzewarnungen im Geschäftsbereich Klima und Umwelt. Die agrarmeteorologische Beratung nutzt MOS- und OOG-Daten ebenfalls.

Mit dem deutschlandweiten Datensatz OMG stehen bald auch in sich konsistente Tabellen-, Graphik- und Textinformationen u.a. für das Internet zur Verfügung (siehe Abb. 6-1). Die Tabellen- und Graphikerstellung erfolgt erneut vollautomatisch, event- oder zeitgesteuert.



Vorhersage von Höchsttemperatur und Wetter für Dienstag 14.07.2009

Hamburg	26	heiter	
Rostock	24	heiter	
Bremen	27	heiter	
Hannover	27	bewölkt	
Berlin	27	Regenschauer	
Brocken	17	kräftiger Regenschauer	Windböen
Kahler Asten	19	kräftiger Regenschauer	
Leipzig	26	Regenschauer	
Dresden	26	Gewitter	
Köln	26	Regenschauer	
Frankfurt	26	leichter Regen	
Saarbrücken	23	Gewitter	
Nürnberg	27	Regenschauer	
Stuttgart	28	Regenschauer	
München	29	bewölkt	
Konstanz	29	bewölkt	

Vorhersage für Deutschland für Dienstag, 14.07.2009

Am Dienstag kommt es in einem Streifen, der etwa vom Saarland bis nach Brandenburg und Sachsen reicht, bei wechselnder bis starker Bewölkung zu schauerartigen Regenfällen und Gewittern, die örtlich auch kräftig ausfallen können. Im Norden und Westen Deutschlands sowie in Alpennähe scheint zeitweise die Sonne, mitunter ist es aber auch wolkig und nur ganz vereinzelt entwickeln sich Schauer. Die Luft erwärmt sich im Norden und Westen auf 24 bis 28 Grad, sonst auf 26 bis 30 Grad mit den höchsten Werten im Südosten Bayerns. Abgesehen von Gewitterböen weht der Wind meist nur schwach aus unterschiedlichen Richtungen.

Abb. 6-1: Graphik, Tabelle und Text für Deutschland, wie sie im Internet-Auftritt des DWD zu finden sind.

Die Überwachung und ständige Verfügbarkeit einer kompletten Datenbasis (1 bis 168 Stunden Vorhersagezeit) bietet außerdem noch weitere Vorteile: Die Datenbasis kann als Grundlage für Anschlussmodelle diver-

ser Arten benutzt werden. Für die Kundenversorgung müssen nicht mehr mehrere „Formulare“ vorgehalten werden, die als Ausfallsicherung eine andere Datenart nutzen. Auf Basis des stündlichen Datensatzes sind freie Zusammenfassungen für unterschiedliche Tagesabschnitte möglich, was vor allem beim Wetterverlauf (morgens, mittags, abends; Vormittag-Nachmittag) für den aktuellen und ersten Folgetag häufig nachgefragt wird. Mit dem insgesamt erkennbaren Fortschritt der Wettervorhersagen, der Präzisierung in Raum und Zeit, sind derartige Anforderungen auch zunehmend sinnvoll und effektiv erfüllbar.

Produkte tabellarischer und graphischer Art können automatisch generiert werden, die Bindung an die deutsche Sprache ist somit nicht mehr notwendig. Allerdings ist bis heute kein Textverfahren bekannt, das den Wetterverlauf in einem größeren Gebiet und längeren Zeitraum vernünftig darstellen kann. Solange der Bedarf für Textvorhersagen seitens der Kunden existiert, wird diese Art manueller Texterstellung eine wesentliche Aufgabe der Meteorologen oder Berater bleiben.

Ein noch nicht ausreichend gelöstes Problem ist schließlich die Information für den Meteorologen, wann so ein Tag, so eine Wettersituation mit signifikantem Eingriffsbedarf ist. Es werden objektive Hinweise benötigt, wann MMO notwendig ist, z.B. wenn die Modellergebnisse stark divergieren. Diese Fälle kann der Meteorologe nur bei technischen Problemen leicht erkennen. Auch aus diesem Grund zeigen Verifikationen auch nur geringen positiven Einfluss durch den Eingriff des Meteorologen. Bei der Wahl von zu bearbeitenden Parametern, Zeiten und Gebieten kann er sich außerdem kaum so exakt festlegen, dass positive Einflüsse auf der einen Seite nicht von negativen an anderen Orten und Zeitpunkten wieder aufgewogen werden.

MMO ist in unterschiedlichen Umsetzungen auch Vorhersagepraxis “state of the art“ bei anderen nationalen Wetterdiensten, z.B. bei der ZAMG („Meta-Prognose“, BECK et al. 2009), bei Meteo France und auch bei privaten Dienstleistern wie der MeteoGroup.

6 Weitere Entwicklungen

Für den Einstieg in die regelmäßige Erstellung und Kundenbelieferung mit probabilistischen Vorhersagen sind die Verfahren OOG und MMO derzeit noch nicht geeignet. Dafür sind noch Weiterentwicklungen notwendig. Eine automatische Kombination von probabilistischen Vorhersagen kann als Grundlage diverse MOS-Prediktoren, aber auch den Output von Ensemble-Systemen nutzen. Diese - schon lange in der Mittelfrist bekannte - Technik findet zunehmend Eingang in der Kurzfrist, ja sogar im Nowcasting. Jedoch scheint es kaum möglich, die Vielzahl von Parametern dann noch von einem Meteorologen oder Berater überwachen oder sogar ändern zu lassen.

7 Ähnliche Aspekte im Warnprozess: AutoMon und AutoWARN

Für den Warnprozess ist das Problem, den Bedarf zum Eingreifen zu erkennen und den Meteorologen zu alarmieren, schon weitgehend durch das System AutoMON (siehe Beitrag 12) gelöst. AutoMON überwacht einerseits bestehende Warnungen relativ zu eingehenden Beobachtungen, andererseits liefert es Hinweise zur Überschreitung warnrelevanter Schwellenwerte in den numerischen Modellen und Postprocessingverfahren. Somit stellt AutoMON die Basis für den automatisierten Warnprozess dar, in dem erkannte Schwellenwertüberschreitungen durch zeitliche und räumliche Homogenisierung in Warnvorschläge umgewandelt und dem Meteorologen auf der NinJo-Workstation zur Bearbeitung angeboten werden, siehe Beitrag 12 (AutoWARN).

Die Grundidee von AutoWARN ist ganz analog zu OMG, siehe Abb 6-1: Auch hier werden diverse Verfahren zur Vorhersage warnwürdiger Ereignisse zusammengefasst, ausgewertet und als Warnstatus für unterschiedlich große Gebiete und Höhenstufen generiert. Die Homogenisierung sorgt dafür, dass der Meteorologe nicht jeden Blitz oder jede Sturmböe separat angeboten bekommt, sondern zusammenhängende Wetterereignisse als ein Event betrachten kann. AutoWARN setzt dabei auf mehreren probabilistischen Guidances auf, die schwellenwertabhängig als „Ja“-Ereignisse deklariert werden. Außerdem nutzt es einen Großteil der vorhandenen Beobachtungs- und Fernerkundungssysteme.

Mithilfe eines Editors (des sogenannten ASE, **A**utoWARN-**S**tatus-**E**ditor) wird der Meteorologe in die Lage versetzt, die automatischen Warnstatusvorschläge zu visualisieren, im Kontext mit anderen Beobachtungen und Vorhersagen zu beurteilen und die Warnstatusvorschläge (nicht Warnungen!) zu editieren, zu bestätigen, höher zu stufen, herabzustufen oder zu verwerfen. Ein daran anschließendes Verfahren kümmert sich um die Erstellung der Kundenprodukte: Warninformationen mit vollständigen standardisierten Texten, SMS-Warnungen, Warnungstabellen und Graphiken. Ein großer Vorteil gegenüber der bisherigen Praxis besteht darin, dass in diesem Erstellungsprozess geeignete Zusammenfassungen (unterschiedliche Höhenlagen oder unterschiedliche Warnereignisse für einen Landkreis, mehrere Landkreise zusammen oder freie Gebiete, die nicht an Landkreisgrenzen gebunden sind) generiert werden können. Dieses ist bislang nur durch simple Kombination von bestehenden bzw. herausgegebenen Landkreiswarnungen möglich. Der Meteorologe soll sich nur noch um das Wetter kümmern und dieses in Warnstatii umsetzen, nicht mehr um Textformulierungen, Sonderwünsche verschiedener Kunden, Rechtschreibung und Grammatik. Allerdings lässt sich ein Verlauf innerhalb eines bewarnten Zeitraums nun nicht mehr darstellen, wie etwa „von Westen aufkommend“, „nachmittags nachlassend“ oder „zwischenzeitlich auch mal schwere Sturmböen“.

In Entwicklung befindet sich ein Verfahren, das auch probabilistische Warninformationen für die Nutzer aufbe-

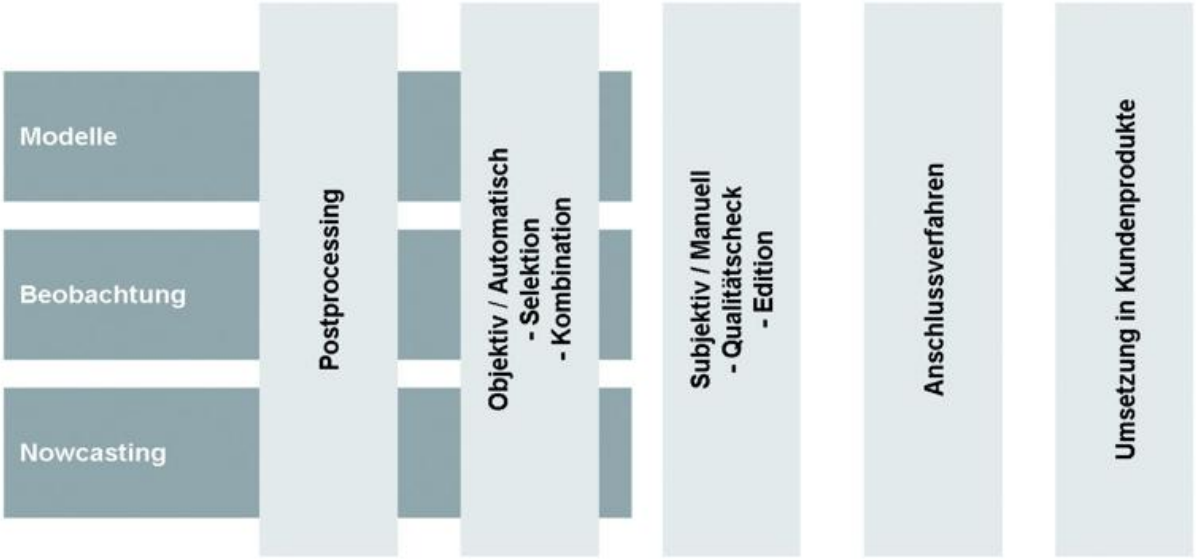


Abb. 6-2: Prinzipskizze der automatisierten Kombination von Modellen, Nowcasting-Verfahren und Beobachtungsdaten mit anschließender Überwachung und manueller Eingriffsmöglichkeit. Daran schließen sich gegebenenfalls weitere Prognoseverfahren sowie die operationelle Kundenversorgung an.

reitet. Die Schulung und Einbindung der Nutzer bei der Produktentwicklung ist Voraussetzung für den Erfolg dieser Strategie. Denn gerade im Bereich des Katastrophenschutzes erwartet man bisher die Unterstützung durch den DWD vor allem durch präzise Warnungen, auf denen konkrete Handlungsanweisungen fußen.

8 Fazit

Die Optimierung des Vorhersageprozesses und des Warnprozesses geht somit ganz ähnliche Wege:
verschiedene bereitgestellte Modelle und Postprocessingverfahren sowie aktuelle Messwerte und Nowcasting- verfahren werden nach objektiven Regeln miteinander vollautomatisch kombiniert
das Ergebnis dieses Kombinationsprozesses wird den Meteorologen auf der NinJo-Workstation zur Ansicht angeboten, verbunden mit effektiven Bearbeitungs-möglichkeiten die Erzeugung von Kundenprodukten erfolgt weitgehend ohne das Zutun des Meteorologen, nahezu automatisch, mit den oben genannten Vorteilen und Nachteilen. Während der Meteorologe früher einen erheblichen Zeitaufwand für die Formulierung aufwendete sowie die kundenspezifischen Wünsche in einzelnen Produkten realisieren musste, soll er sich zukünftig ausschließlich um die Meteorologie kümmern.

Mit verbesserten numerischen Modellen, effizienten Methoden in der Verfahrensentwicklung, ansprechenden Visualisierungen sowie schnellen und benutzerfreundlichen Kontroll- und Eingriffsmöglichkeiten lässt sich der Vorhersagedienst modernisieren und effektiver gestalten (Prozessoptimierung). Automatismen und gut geschulte Meteorologen und Berater können die Qualität der Vorhersagen weiter verbessern, wenn sie Hand in Hand arbeiten. Auf den ganztägigen Einsatz meteorologischen Wissens im operationellen Vorhersageprozess kann jedoch nicht verzichtet werden. Schließlich benutzt man ja auch ein vom Autopiloten gesteuertes Flugzeug. Aber wer von uns würde einsteigen, wenn er sieht, dass vorn kein Pilot mehr sitzt?

Literatur

BECK, A., KANN, A., HAIDEN, T., 2009: Erstellung von optimierten (Punkt)prognosen – META Prognose. Persönliche Mitteilung.

KALMAN, R. E., 1960: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transaction ASME Journal of Basic Engineering* **82**, 35-45.

GLAHN, H. R. und LOWRY, D. A., 1972: The use of Model Output Statistics (MOS) in Objective Weather Forecasting. *Journal of Applied Meteorology* **11**, 1203-1211.

GÖBER, M., 2008: Verifikationsberichte des Geschäftsbereichs Wettervorhersage, DWD, Offenbach.

HAALMAN, D., 2003: MOS-MIX: Integrated statistical interpretation of multiple numerical models, Sixth European Conference on Application of Meteorology, ECAM 2003, Rome, Italy.

KNÜPFFER, K., 1996: Methodical and predictability aspects of MOS systems, 13th Conference on Probability and Statistics in Atmospheric Sciences, 190-197, San Francisco, Ca., USA.

PEYINGHAUS, W., 1996: Die Punkt-Termin-Prognosen des DWD auf der Basis hochauflösender Gitterpunktmodelle. *Promet* **25**, 9-12.

promet, Jahrg. 35, Nr. 1-3, 50-56
© Deutscher Wetterdienst 2010

7 Objektive Optimierung - Automation von Punkt-Termin-Prognosen

Objective Optimization - Automation of Site Specific Forecasts

M. ROHN

Zusammenfassung

Automatische Produktion erfolgt im DWD in großem Maße auf der Grundlage von Punktprognosen von Bodenwetterelementen. Die verfügbaren Modelle und darauf aufbauende Postprocessingverfahren liefern zusammen mit Nowcasting und Beobachtungen eine Datenvielfalt, die ein automatisches Verfahren zur Integration der verschiedenen Informationen notwendig macht. Es wird das System „Objektive Optimierung" vorgestellt, das auf der Grundlage eines nachvollziehbaren und robusten Regelwerks eine automatische Kombination unterschiedlicher Modelldaten sowie eine kontinuierliche Anpassung an aktuelle Nowcastingprodukte und Beobachtungen leistet.

Abstract

At DWD automatic production is to a large extend based on site specific forecasts of surface weather elements. The amount of available numerical models together with corresponding postprocessing algorithms provide a huge variety of data which together with nowcasting products and observations requires an automatic merging of all available information sources. A system "Objective Optimization" is presented which performs an automatic combination of different model results together with a continuous relaxation towards current nowcasting and observational data using a set of robust and objective rules.

1 Einleitung

Ein zentrales Produkt operationeller Wettervorhersage sind Prognosen von Bodenwetterelementen, die an ausgewählten Stationen aus den Ergebnisdaten numerischer Modelle abgeleitet werden. Neben der Informationsvielfalt aus dem Postprocessing verschiedener numerischer Modelle treffen kontinuierlich vielfältige Nowcasting-Produkte sowie Beobachtungsdaten ein, die nach Modellinitialisierung nicht in der numerischen Analyse berücksichtigt wurden und somit neue Information bereitstellen. Eine Übersicht der verfügbaren Datenquellen, die zur Ableitung einer lokalen Guidance herangezogen werden können, gibt Abb. 7-1. Mit dieser Problematik sehen sich auch andere Wetterdienste konfrontiert und haben Systeme entwickelt, um insbesondere die kontinuierliche Anpassung reiner Modellinformation an die aktuelle Wetterentwicklung zu leisten. Zwei Beispiele sind das kanadische System SCRIBE (LANDRY et al. 2003), das punktbasiert eine Zusammenschau verschiedenster Datenquellen leistet, und die interessante österreichische Entwicklung INCA (HAIDEN et al. 2007), die sich mit Algorithmen nahe an der numerischen Modellierung auf die kontinuierliche Anpassung der Gitterfelder an die aktuelle Wetterent-

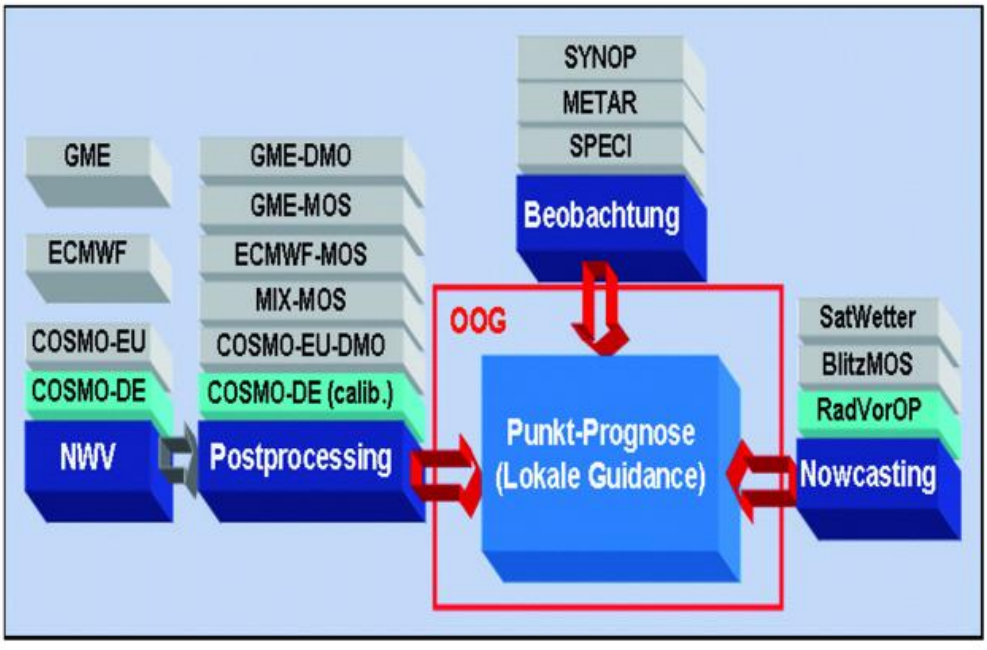


Abb. 7-1: Übersicht der verfügbaren Eingangsdaten zur Ableitung einer stationsbezogenen Guidance.

wicklung ausschließlich im Nowcasting konzentriert. Eine Entwicklung des australischen Wetterdienst konzentriert sich auf eine optimale Kombination ortsspezifischer Prognosen aus der unveränderten Modellinformation (DMO) und des statistischen Postprocessing (MOS) mit dem Ziel eine Guidance bereitzustellen, die sich bei Modelländerungen automatisch an die systematischen Fehler anpasst.

Die Situation im DWD zeichnet sich aus zum einen durch die Entwicklung und Pflege eigener Modelle für alle Skalen von global bis zu hochauflösend lokal, sowie sehr vielfältiger und leistungsfähiger Postprocessing-Verfahren, die durch Ableitung von Punktprognosen eine vielfältige automatische Produktion unterstützen. Im DWD wurde deshalb ein System gewünscht, das mit Hilfe objektiver Regeln die vorhandene Vielfalt von Daten in einem Datensatz zusammenführt. Dieses System wird als „Objektive Optimierung", die resultierende ortsbezogene Prognose als „objektiv optimierte Guidance" oder auch „OOG" bezeichnet.

2 Systembeschreibung

Wir beginnen die Vorstellung dieses Systems mit der Beschreibung des Ergebnisdatensatzes, der durch verschiedenste Anwendungen klar definiert ist. Es werden kurz unterschiedliche Datensätze beschrieben, die als Eingangsdaten in die Optimierung eingehen. Anschließend werden die Verarbeitungsschritte kurz umrissen, die eingesetzt werden um die verschiedenen Informationen in einer Aussage zusammenzuführen. Das System ist vollständig Java-basiert und komplett in die technische Software-Architektur von NinJo (Beitrag 8) integriert um eine Vereinheitlichung der im operationellen Vorhersagedienst verwendeten Werkzeuge zu unterstützen.

2.1 Ergebnisdaten

Das Guidanceprodukt beschreibt im wesentlichen das Bodenwetter durch 23 Wetterelemente, die in Tab. 7-1 zusammengestellt sind. Diese Information wird zur Zeit weltweit für etwa 4400 Orte bereitgestellt, wovon etwa 2000 innerhalb Deutschlands liegen. Diese Orte werden zunächst durch Beobachtungsstationen definiert. Daneben existiert auch eine große Anzahl sogenannter Interpolationsstationen, für die keine direkte Beobachtungsinformationen vorliegen. Der Zeitbereich der Guidance umfasst sieben Tage in Übereinstimmung mit dem Prognosehorizont des Globalmodells des DWD. Dabei werden die Zeitreihen in einstündiger Auflösung für den gesamten Prognosezeitraum bereitgestellt. Diese Zeitauflösung spiegelt natürlich insbesondere im Mittelfristbereich ab eines Prognosezeitschrittes von 72 Stunden nicht die tatsächliche Prognosegüte wider, wird aber von Kunden, insbesondere Energieversorgern, zum Betrieb eigener spezifischer Verfahren aus technischen Gründen gefordert.

2.2 Eingangsdaten

Die verwendeten Daten lassen sich in 3 Kategorien unterteilen: Modell, Nowcasting und Beobachtung. Alle Datensätze werden kurz beschrieben und Bezüge zu anderen Beiträgen in diesem Heft aufgezeigt. Eine Übersicht befindet sich in Tab. 7-2.

2.2.1 Modelldaten

Im Zusammenhang mit automatisierter Produktion wird die Modellinformation traditionell als Punktprognose zur Verfügung gestellt. Die Objektive Optimierung greift nun auf drei zentrale Datensätze zurück: „DMO GME" beschreibt dabei den sogenannten Direct Model Output des DWD-Globalmodells. Dies entspricht im wesentlichen dem Modellergebnis an einem ausgewählten Git-

Kurzname	Beschreibung
T2m	Temperatur in 2 m Höhe
Td2m	Taupunkt in 2 m Höhe
Tmax	Maximumtemperatur der letzten 12 Stunden in 2 m Höhe
Tmin	Minimumtemperatur der letzten 12 Stunden in 2 m Höhe
TB	Bodentemperatur
DD10m	Windrichtung in 10 m Höhe
FF10m	Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe
FX3h	Maximale Windgeschwindigkeit der letzten 3 Stunden
RR1	Gesamtniederschlagsmenge der letzten Stunde
RS1	Schneeanteil am Gesamtniederschlagsmenge der letzten Stunde
ww	Signifikantes Wetter innerhalb der letzten Stunde
W	Wetterverlauf der letzten 6 Stunden
Ntotal	Gesamtbedeckungsgrad
Neffektiv	Effektiver Bedeckungsgrad
Nl	Bedeckungsgrad niedriger Wolken
Nm	Bedeckungsgrad mittlerer Wolken
Nh	Bedeckungsgrad hoher Wolken
PPPP	Bodendruck reduziert auf Meeresniveau
QSW1	Kurzwellige Strahlungsbilanz der letzten Stunde
QLW1	Langwellige Strahlungsbilanz der letzten Stunde
QGL1	Globale Strahlungsbilanz der letzten Stunde
H	Ceiling
VV	Horizontale Sichtweite

Tab. 7-1: Liste der Wetterelemente, die durch die OOG bereitgestellt werden.

	Datentyp	Name	Beschreibung
1. Modell	Punktprognose	DMO GME	Direct Model Output des DWD-Globalmodells
		DMO COSMO-EU	Direct Model Output des DWD-Lokalmodells im Europaausschnitt
		MOS MIX	Kombination von Model Output Statistics des DWD-Globalmodell GME und Globalmodell des EZMW
	Gitterdaten	COSMO-DE	Horizontal geglättete Felder des hochauflösenden Modells COSMO-DE im Deutschlandausschnitt
2. Nowcasting		Satellitenwetter	Horizontale Analyse von Beobachtungsinformation auf der Grundlage von geostationärer Satelliteninformation (MSG) als Hintergrundinformation
		Blitz-MOS	Wahrscheinlichkeitsprognose für Blitzereignisse auf der Basis von Modelldaten und Blitzbeobachtung
		RADVOR-OP	Quantitative Niederschlagsanalyse- und prognose mit Radardaten
3. Beobachtung		SYNOP	Synoptische Beobachtung des Bodenwetters
		METAR, SPECI	Beobachtung der Wettererscheinungen an Flughäfen

Tab. 7-2: Liste der verwendeten Eingangsdaten.

terpunkt. Für ausgewählte Elemente werden Korrekturen vorgenommen um die Orografie zu berücksichtigen. Dieser Ansatz wird ebenfalls verwendet, um die Modellergebnisse des hochauflösenden Lokalmodells COSMO-EU als „DMO COSMO-EU" bereitzustellen. „MOS MIX" beschreibt die Anwendung von Model Output Statistics auf das DWD-Globalmodell GME und das Globalmodell des EZMW einschließlich einer abschließenden Kombination beider Datensätze. Dieses Vorgehen wird im Beitrag 9 ausführlich behandelt. Eine aktuelle Erweiterung der hier beschriebenen „Objektiven Optimierung" befasst sich mit der Integration des neuen DWD-Regionalmodells COSMO-DE, das im Beitrag 11 vorgestellt wird. Bei diesem Modell wurde nun erstmals auf die Produktion von Punktprognosen verzichtet, unter anderem, da eine operationelle Verwendung von Punktdaten, die alle drei Stunden durch eine neue Modellinitialisierung neu generiert werden, praktisch nicht zu behandeln ist. Hier erscheint eine unmittelbare Weiterverarbeitung in der „Objektiven Optimierung" sinnvoll.

2.2.2 Nowcasting-Daten

Zusätzlich zur Modellinformation bzw. Daten aus postprozessierter Modellinformation werden Nowcastingprodukte mit einbezogen. Ein wesentliches Produkt stellt dabei das sogenannte „Satelliten-Wetter" dar. Es handelt sich um eine zweidimensionale Analyse des Wetterzustands auf der Grundlage von stündlicher Satelliteninformation und zeitgleichen konventionellen Beobachtungen. Dabei wird durch eine Clusteranalyse der Satellitenbildinformation und der Beobachtungsdaten versucht das lokal beobachtete Wetter auf Gebiete mit ähnlicher Satellitenbildinformation auszubreiten (ROSENOW et al. 2002). Zusätzlich wird mit einem Vektorfeld, das aus einer beobachteten Bildsequenz abgeleitet wird und die Wolkenbewegung wiedergibt, eine Prognose im Nowcastingbereich (t + 2 Stunden) durch zeitlichen Extrapolation der Analyse generiert. Ein weiteres Produkt „Blitz-MOS" stellt analysierte und prognostizierte Wahrscheinlichkeitsfelder für Blitzereignisse unterschiedlicher Intensität in Gebieten der Größe 9 x 9 km zur Verfügung. Es handelt sich hierbei um einen MOS-Ansatz mit Modellinformation und Blitzbeobachtung als sogenannte Prediktoren (Beitrag 9). Schließlich befasst sich eine jüngste Erweiterung des hier vorgestellten Systems mit der Integration der quantitativen Niederschlagsanalyse und -prognose RADVOR-OP (siehe Beitrag 10).

2.2.3 Beobachtungen

An allen Stationen, die mit Beobachtungen zusammenfallen, wird zudem die tatsächliche gemessene Information berücksichtigt. Dies umfasst die synoptische Beobachtungen des Bodenwetters (SYNOP) sowie die Beobachtungen an Flughäfen (METAR und SPECI).

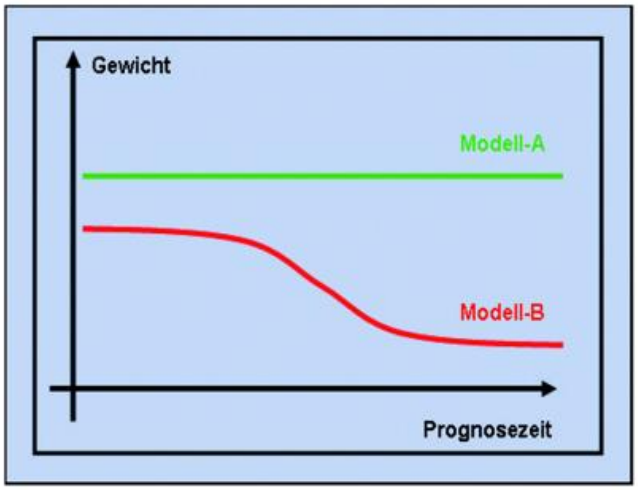


Abb. 7-2: Illustration der Modellkombination durch den exemplarischen Verlauf zweier Gewichtsfunktionen.

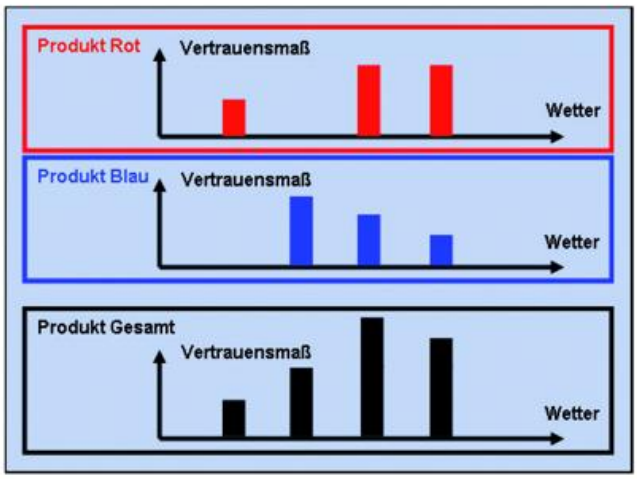


Abb. 7-3: Aggregation von Wahrscheinlichkeitsinformation durch „Linear Opinion Pooling" als Ansatz zur Kombination probabilistischer Nowcastingprodukte.

2.3 Verarbeitungsschritte

Die Verarbeitung unterscheidet prinzipiell zwischen den soeben beschriebenen Datentypen Modell-, Nowcasting-, und Beobachtungsinformation. Entsprechend werden im folgenden die Algorithmen kurz beschrieben, die jeweils zur Behandlung eines Datentyps verwendet werden.

2.3.1 Modellkombination

Die Kombination unterschiedlicher Modelle wird durch ein einfaches gewichtetes Mittel abgebildet. Dabei werden für jedes Modell aufgelöst nach meteorologischem Element Gewichtsfunktionen zugewiesen, die den Einfluss jeder Information in der resultierenden Modellkombination über den gesamten Prognosezeitraum bestimmen. Der zeitliche Verlauf dieser Gewichte wird mit einer sogenannten Stufenfunktionen parametrisiert. So kann mit wenigen Parametern der Gewichtsverlauf über die gesamte Prognosezeit von 168 Stunden kontrolliert werden, wobei der absolute Einfluss definiert wird aber auch das Einsetzen oder Abklingen eines Modells sowie die Steilheit in diesem Übergangsbereich flexibel bestimmt werden können. Das Ergebnis der Modellkombination $y^{OOG}(t)$ ergibt sich somit aus dem gewichteten Mittel der individuellen Prognosen aller Modelle $y^m(t)$, wobei m ein Modell aus den am betrachteten Ort verfügbaren Modellen kennzeichnet.

$$y^{OOG}(t) = \frac{\sum_{Modelle} w_m(t) y^m(t)}{\sum_{Modelle} w_m(t)} \qquad (1)$$

Jedem Modell werden nun separat für jedes Element Gewichtsfunktionen $w_m(t)$ zugeordnet, deren zeitlicher Verlauf flexibel durch wenige Parameter kontrolliert werden kann:

$$w_m(t) = w_m^0 \left(1 + \tanh\left[S_m\left(t - t_m^0\right)\right]\right) \qquad (2)$$

Dies ist in Abb. 7-2 illustriert. Die Modellkombination kann auch als „Poor Man Ensemble" aus den verfügbaren Modelldaten angesehen werden, das eine individuelle Gewichtung einzelner Modelle erlaubt.

2.3.2 Adaption und Integration von Nowcastingdaten

Im Gegensatz zur reinen Modellinformation stellen Nowcastingprodukte typischerweise eine recht heterogene Datenquelle dar. Zunächst liegen verschiedene Produkte als zweidimensionale Felder vor, die typischerweise durch recht unterschiedliche technische Datenformate beschrieben werden. Zusätzlich sind geografischer Ausschnitt als auch die verwendete Projektion unterschiedlich. Neben diesen technischen Problemen ist auch die meteorologische Information bisweilen recht spezifisch formuliert, die zunächst in ein meteorologisches Element wie etwa „Signifikantes Wetter" entsprechend der SYNOP-Konvention übersetzt werden muss. Insbesondere zeichnen sich zwei der hier verwendeten Nowcasting-Produkte dadurch aus, dass sie prinzipiell keine rein deterministische Information liefern, sondern vielmehr Klassen möglicher Wetterereignisse bzw. eine Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Wetterklassen.

Aus diesem Grund umfasst das System ein Modul „Adaption", das die Aufgabe übernimmt, an den gewünschten Stationspunkten die verschiedenen Produkte zu interpretieren und eine integrierte Nowcasting-Information zur weiteren Verarbeitung innerhalb der „Objektiven Optimierung" bereitzustellen. Dabei stellt die Kombination der Wahrscheinlichkeitsaussagen verschiedener Produkte eine interessante Herausforderung dar, die kurz erläutert werden soll: Stellen wir uns verschiedene Produkte als Meinungen vor, die es jedem Produkt erlauben verschiedene Szenarien mit unterschiedlichem Vertrauen zu prognostizieren, so lässt sich durch Aggregation dieser Vertrauensmaße eine Gesamtschau erstellen, in der sich verschiedene Produkte bei verschiedenen Szenarien gegenseitig unterstützen aber auch widersprechen können. Dies entspricht im wesentlichen der Gleichung (1) zur Beschreibung der Modellkombination mit dem Unterschied, dass nun nicht die meteorologische Information selbst, sondern die den verschiedenen Prognosen zugeordneten Vertrauensmaße durch ein gewichtetes Mittel aggregiert werden. So ist es prinzipiell möglich, dass die kombinierte Aussage ein Szenario bevorzugt, das in den Einzelprodukten nicht durch ein maximales Vertrauensmaß hervorgehoben wurde, sondern ein Ergebnis dieser „Meinungsbildung" ist. Dieses Verhalten soll durch Abb. 7-3 veranschaulicht werden. Dieses in der Literatur als „Linear Opinion Pool" bezeichnete Vorgehen stammt aus dem Bereich der Risikoanalyse, wo versucht wird prinzipiell unscharfe Expertenmeinungen in einer Aussage zusammenzuführen. Eine übersichtliche Darstellung geben CLEMEN und WINKLER (1999). Nachdem durch die „Adaption" eine integrierte Information aus Nowcastingprodukten an Stationspunkten extrahiert wurde, wird diese in Analogie zur Modellkombination mit flexibler Gewichtung in die Guidance eingebracht.

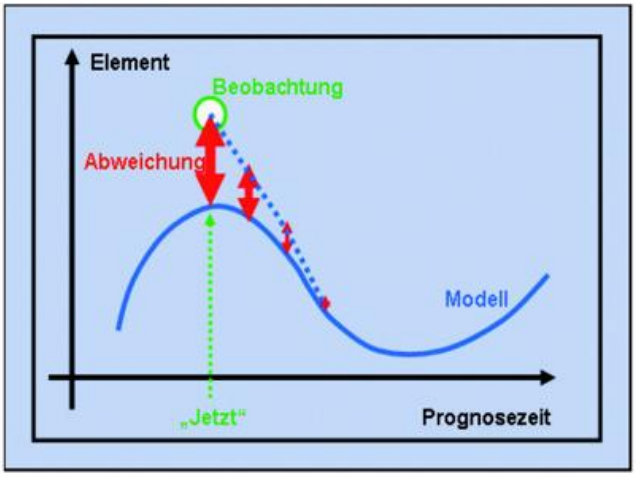


Abb. 7-4: Zeitliche Extrapolation der Beobachtungskorrektur.

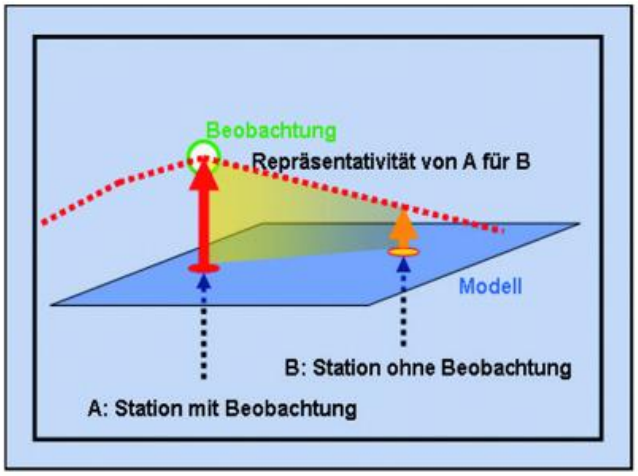


Abb. 7-5: Räumliche Interpolation benachbarter Beobachtungsinformation an Stationen ohne eigene Beobachtungsdaten.

2.3.3 Beobachtungskorrektur

Nach Kombination der Modelle und Integration von Nowcastingdaten erfolgt eine kontinuierliche Anpassung an aktuelle Beobachtungen. Die Anforderung lautet dabei eine Prognose bereitzustellen, die stets von der aktuell verfügbaren Beobachtung ausgeht, also mit dem „Blick aus dem Fenster" im Einklang steht, und anschließend konsistent in die reine Modellinformation übergeht. Dazu wird zunächst an Beobachtungsstationen die aktuelle Abweichung zwischen Modell und Messwert ermittelt. Zum Beobachtungszeitpunkt wird das Ergebnis auf den Messwert gezwungen und nachfolgende Prognoseschritte werden mit zeitlich abklingendem Einfluss mit diesem Inkrement korrigiert. Der zeitliche Verlauf wird durch Strukturfunktionen kontrolliert, die getrennt für jedes meteorologische Element durch wenige Parameter definiert werden können. Bezeichnen wir mit $y^{OBS}(t_0)$ die Beobachtung und das Ergebnis nach Modellkombination und Nowcasting-Adaption mit $y(t_0)$, so ergibt sich der aktuelle Modellfehler als:

$$\Delta y\ (t_0) = y^{OBS}(t_0) - y\ (t_0) \tag{3}$$

Die Beobachtungskorrektur wird nun ab Beobachtungszeitpunkt auch auf nachfolgende Zeitschritte extrapoliert, wobei mittels einer Strukturfunktion $a\ (t\text{-}t_0)$ ein zeitlich abklingender Einfluß definiert wird.

$$y^{OOG}(t) = y\ (t) + a\ (t - t_0) \cdot \Delta y\ (t_0) \tag{4}$$

Eine typische Wahl ist ein exponentieller Abfall oder eine Gauß-Funktion, deren Varianz praktisch den zeitlichen Einfluss definiert und typischerweise wenige Stunden beträgt.

$$a\ (t\text{-}\ t_0) = a^* \cdot \exp\left[-\left(\frac{t\ -t_0}{T^*} \right)^R \right] \tag{5}$$

Diese zeitliche Extrapolation der Beobachtungskorrektur und damit die kontinuierliche Anpassung an den aktuellen Wetterverlauf wird in Abb. 7-4 dargestellt. Da nun insbesondere innerhalb Deutschlands die Schar der Punkte, an denen Prognosen bereitgestellt werden, sehr dicht ist und viele Orte ohne eigene Beobachtungen enthält, wird die Beobachtungsinformation auf Orte ohne eigene Messungen interpoliert. Dabei werden maximal 5 benachbarte Beobachtungskorrekturen $\Delta y_n(t_0)$ gemittelt, wobei einer einzelnen benachbarten Beobachtungskorrekturen am Ort n ein Gewicht r_n zugeordnet wird, das die Repräsentativität der Beobachtungsstation n für den betrachteten Interpolationspunkt parametrisiert. Dieses Gewicht oder auch Repräsentativitätsmaß r_n verhält sich reziprok zur geografischen Entfernung und Höhenunterschied beider Punkte und wird zusätzlich durch Unterschiede im Oberflächentyp (Land, Küste, See, Berg) vermindert. Dieses Vorgehen wurde von der sogenannten MOS-Interpolation (siehe auch Beitrag 9) übernommen und wird in Abb. 7-5 für eine Station veranschaulicht.

$$y^{OOG}(t) = y\ (t) + a \cdot \frac{\sum_{benachbarteOBS} r_n \cdot \Delta y_n(t)}{\sum_{benachbarteOBS} r_n} \tag{6}$$

2.3.4 Konsistenz-Check

Im Anschluss an die gesamte Verarbeitungskette von Modellkombination, Nowcasting-Adaption und Beobachtungskorrektur durchläuft der Datensatz einen Konsistenzcheck, der Konflikte zwischen unterschiedlichen meteorologischen Elemente bereinigen soll. Letztendlich sind diese Inkonsistenzen auch nur eine Manifestation der Ungenauigkeit der Prognose. Es ist erforderlich insbesondere grobe Widersprüche zu beheben um an dieser Schnittstelle zur Anwendung die Akzeptanz meteorologischer Prognosedaten nicht zu gefährden. Es wurde ein Werkzeug bereitgestellt, das auf der Grundlage der Definition von logischen Bedingungen („Validation") und optionaler Verknüpfung mit Korrekturfunktionen („Aktion") eine flexible Konfiguration vielfältiger Konsistenzchecks ermöglicht.

Dieses Regelwerk wird mit entsprechender Konfiguration ebenfalls verwendet um grobe Fehler in Beobachtungsdaten zu filtern und betroffene Messungen von der Beobachtungskorrektur auszuschließen. Die Konfiguration überprüft in diesem Fall für jedes Wetterelement lediglich einen meteorologisch sinnvollen Wertebereich und markiert eine Beobachtung im Falle der Verletzung der Bedingung als undefiniert. Dies stellt nur eine sehr grobe Beobachtungsprüfung dar und es sind leicht Fälle denkbar, die dadurch nicht erkannt werden können. Allerdings liegt in dem hier diskutierten Zusammenhang der Schwerpunkt darauf extreme Ereignisse nicht durch konservative Qualitätschecks zu unterdrücken.

2.4 Konfiguration

Das beschriebene System besitzt eine große Anzahl von Freiheitsgraden, die sich in den Parametern zur Definition der Stufenfunktionen zur Kombination der Modell- und Nowcastingdaten, der Kontrolle der Kombination verschiedener Nowcastingprodukte im beschriebenen „Linear Opinion Pooling“, sowie der Strukturfunktion zur Extrapolation der Beobachtungskorrektur ausdrücken. Folglich stellt sich die Frage nach der Wahl dieser Parameter. Hier ist festzuhalten, dass zunächst Vorinformation über die Güte einzelner Datensätze existiert. Die wohl umfangreichste Informationsquelle ist der Bericht der operationellen Verifikation von Prognosen des DWD, der vierteljährlich eine detaillierte Analyse der im DWD existierenden Prognosedatensätze bietet. Eine Wahl der Gewichte, die sich reziprok zu den Fehlervarianzen der einzelnen Modelle verhält, ist bereits eine gute Ausgangsbasis zur Konfiguration der Modellkombination (BOUTTIER und COURTIER 1999).

Darüber hinaus gibt es auch statistische Lernverfahren, die zur Bestimmung von Modellgewichten herangezogen werden können. Ein aktuell im Bereich der Ensembleprognose viel diskutierter Ansatz ist das sogenannte „Bayesian Model Average“ (BMA) (RAFTERY et al. 2003). Im Verlauf der Entwicklung der „Objektiven Optimierung“ wurde dieser Ansatz prototypisch untersucht um für einige ausgewählte Wetterelemente Gewichte zur Kombination der Datentypen „MOS MIX“ und „DMO COSMO-EU“ zu bestimmen. Dies führt für einfach zu behandelnde Elemente wie etwa der Temperatur zu einer Gewichtung von 80 % „MOS MIX“ und 20% „DMO COSMO-EU“. Das Attribut „einfach zu behandeln“ bezieht sich hier auf die Annahme einer Gauß'schen Fehlerverteilung, die dem BMA-Ansatz innewohnt und für die Temperatur angemessen erscheint. Für andere Elemente muss die Annahme der Fehlerverteilung gegebenenfalls modifiziert werden, was zum Beispiel für Niederschlag das Lernverfahren komplizierter gestalten würde. Interessant ist aber auch hier, dass das Ergebnis des Lernalgorithmus BMA recht gut mit Gewichten übereinstimmt, die man bereits aus einer einfachen Berücksichtigung mittlerer Modellfehler aus der genannten operationellen Verifikation ableiten kann. Sind nun Gewichte für einige Elemente festgelegt, ist man bereits auch gezwungen die Gewichte anderer Wetterelemente daran zu orientieren um die bereits besprochenen Inkonsistenzen zwischen meteorologischen Elementen zu vermeiden.

Neben einer so gewonnenen Basiskonfiguration ergaben sich während der subjektiven Evaluierung der resultierenden Guidance „OOG“ Forderungen, die neben der Vermeidung von Inkonsistenzen durch Erwartungen aus der Perspektive der Anwendung stammen. Zum Beispiel wird die Information zu Signifikantes Wetter „ww“ des „MOS MIX“-Datensatzes mit einem dreistündigen Bezugsraum als am wertvollsten im Hinblick auf eine implizite Warnung betrachtet, so daß die „OOG“ hier zu 100 % folgt. Dies erfordert unmittelbar eine starke Gewichtung der Niederschlagsinformation aus dem gleichen Datensatz „MOS MIX“. Insgesamt ergibt sich die Konfiguration aus einer objektiven Betrachtung existierender Fehlerinformation der einzelnen Inputdaten und durch eine längere und kontinuierliche Evaluierung empirisch gewonnenen Empfehlungen.

3 Fazit und Ausblick

Die grundlegende Basis des Vorhersagedienstes bildet stets das numerische Prognosesystem bestehend aus bestmöglicher Bestimmung des Ist-Zustandes der Atmosphäre (Analyse) und nachfolgender Integration der numerischen Modellgleichungen (Prognose). Das beschriebene System dient prinzipiell einer ortsbezogenen Integration verschiedenster Informationsquellen für Bodenwetterelemente. Der Zweck ist somit nicht ausschließlich eine „bessere“ Prognose im Sinne einer weiteren Fehlerminimierung, sondern auch der Versuch mit Hilfe eines objektiven und robusten Regelwerks die Vielfalt der verfügbaren Informationsquellen für eine operationelle und automatische Produktion zugänglich zu machen und die dazu notwendigen Investitionen in Modellentwicklung, Postprocessing und Nowcasting-Methoden mit Fernerkundungsdaten möglichst umfassend auszunutzen. Die dabei aufgezeigten Defizite müssen stets als Ausgangspunkt dienen, Details des numerische Prognosesystem zu optimieren, da eine nachhaltige Verbesserung der Prognosegüte langfristig nur durch eine kontinuierliche Verbesserung von numerischer Analyse und Prognose erreicht werden kann.

Zusätzlich sind auch bei der hier vorgestellten Problematik vielfältige interessante Weiterentwicklungen denkbar: Generell wäre eine Online-Verifikation hilfreich um kontinuierlich auf Grundlage der aktuellen Fehlercharakteristik der Eingangsdaten dynamisch die Strukturfunktionen (2.3.1) anzupassen. Ein weiterer konsequenter Schritt wäre hin zu einer wetterlagenabhängigen Anpassung der Strukturfunktionen insbesondere bei der Anpassung an aktuelle Beobachtungen (2.3.3) in konvektiven gegenüber stabilen Wetterlagen. Eine weitere wichtige Erweiterung wäre die Integration von probabilistischen Informationen aus dem statistischen Postprocessing (MOS) und Ensemble-Systemen. Dabei bietet der existierende Ansatz des Opinion-Pooling bei der Integration von Nowcasting-Daten (Abschnitt 2.3.3) bereits eine konkrete Lösungsmöglichkeit zur

Kombination von Wahrscheinlichkeitsinformationen aus verschiedenen Prognosedatensätzen.

Das System wird in der beschriebenen Form seit Juni 2009 für die operationelle Kundenversorgung auf der Grundlage von Punktprognosen verwendet.

Danksagung

An der Realisierung des vorgestellten Systems haben verschiedene Projektmitarbeiter im Rahmen des Innovationsprogramms des DWD mitgewirkt. Dank gilt Tim vor der Brück, Reinhard Hagenbrock, Wolfgang Raatz, Christine Träger-Chatterjee, Petra Weilmünster und Lucas Wenke.

Literatur

BOUTTIER, F., COURTIER, P., 1999: Data assimilation concepts and methods. Meteorological Training Course Lecture Series, ECMWF.

CLEMEN, R.T., WINKLER, R. L., 1999: Combining Probability Distribution from Experts in Risk Analysis. Risk Analysis **19**, 2, 187-203.

HAIDEN, T., KANN, A., STADLBACHER, K., STEINHEIMER, M., WITTMANN, C., 2007: Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) - System overview. ZAMG report, 49 pp.

LANDRY, C., QUELLET, M., PARENT, R., VERRET, R., 2003: Assimilation of observation data into SCRIBE. 19th International Conference on Interactive Information Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, AMS Annual Meeting, 9–13 February 2003.

RAFTERY, A.E., BALABDOUI, F., GNEITING, T., POLAKOWSKY, M., 2003: Using Bayesian Model Averaging to Calibrate Forecast Ensembles. Technical Report **440**, Department of Statistics University of Washington, 28 pp.

ROSENOW, W., GÜLDNER, J., SPÄNKUCH, D., 2002: The „Satellite Weather" of the German Weather Service - An assimilation procedure with a spectral component. Proceedings: The 2001 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' Conference, EUMETSAT, Darmstadt, Germany, **EUM P 33**, 541–545.

WOODCOCK, F., ENGEL, C., 2005: Operational Consensus Forecasts. Weather and Forecasting **20**, 101-111.

promet, Jahrg. 35, N. 1-3, 57-69
© Deutscher Wetterdienst 2010

D. HEIZENREDER, S. HAUCKE

8 Das meteorologische Visualisierungs- und Produktionssystem „NinJo“

The meteorological visualization and production system „NinJo“

Zusammenfassung
In der modernen Wettervorhersage wächst das täglich zu verarbeitende Datenvolumen stetig. Die Weiterentwicklung der numerischen Wettervorhersagen und der entsprechenden Anschlussverfahren, die zunehmende Nutzung zeitlich und räumlich hoch aufgelöster Satelliten- und Radardaten sowie die Entwicklung neuer Nowcasting- und Unterstützungsverfahren dienen dazu, die Qualität der Vorhersagen, Beratungen und Warnungen immer weiter zu verbessern. Die dabei entstehende Datenfülle kann nur noch mit leistungsfähigen Softwaresystemen zeitgerecht ausgewertet und in den Wettervorhersage- und Warndienst integriert werden kann. Der DWD hat deshalb in den vergangenen Jahren zusammen mit internationalen Kooperationspartnern das meteorologische Visualisierungs- und Produktionssystem „NinJo“ entwickelt. NinJo ist inzwischen unverzichtbares Arbeitsmittel im Wettervorhersage- und Warndienst des DWD und aller Partner des internationalen NinJo-Konsortiums. Der vorliegende Artikel beschreibt die Funktionen und die Architektur des Systems und nennt entsprechende Anwendungsbeispiele.

Abstract
The data volume used in modern weather forecasting processes has been growing over the last decades. Not only the numerical weather prediction systems and the appropriate postprecessing routines but also the high density satellite- and radar data and the growing number of supporting nowcasting and forecasting tools provide an increased volume of data which can only be handled successfully within the weather forecasting process using powerful software systems for visualizing and interpretation of those data. DWD and the international partners have developed the meteorological visualization and production system “NinJo” to be prepared for the future needs. This article gives an overview about the functionality and the architecture of the NinJo system and demonstrates the usage of NinJo with selected examples.

1 Einleitung

Wesentliche Kernaufgaben des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sind die Wetterüberwachung, die Ausgabe von Wetterwarnungen und die Erstellung von Wettervorhersagen im Nowcasting, Kurz- und Mittelfristbereich für die Allgemeinheit und den Katastrophenschutz.

Zur erfolgreichen Erledigung dieser Kernaufgaben werden im DWD zahlreiche Mess- und Beobachtungssysteme betrieben und leistungsfähige numerische Wettervorhersagemodelle sowie entsprechende Postprocessing-, Visualisierungs- und Unterstützungsverfahren entwickelt und eingesetzt.

In der Praxis eines modernen operationellen Wettervorhersage- und Warndienstes steht nach wie vor die regelmäßige Zusammenschau (Synopsis) aller vorliegenden numerischen Vorhersagen sowie aller verfügbaren Mess-, Beobachtungs- und Prognosedaten im Mittelpunkt. Der Umfang der dabei zu verarbeitenden Daten ist in den letzten Jahrzehnten dramatisch gewachsen. Längst genügt es nicht mehr, synoptische Beobachtungsmeldungen mit der Hand auszuwerten, um den aktuellen Wetterzustand zu analysieren, diagnostisch zu bewerten oder gar entsprechende Vorhersagen zu erstellen. Die Entwicklung der numerischen Wettervorhersagen und der entsprechenden Anschlussverfahren, die zunehmende Nutzung zeitlich und räumlich hoch aufgelöster Satelliten- und Radardaten sowie die Entwicklung neuer Nowcasting- und Unterstützungsverfahren haben zu einer deutlichen Verbesserung der Qualität der Vorhersagen in den letzten Jahrzehnten geführt. Dabei ist jedoch auch eine enorme Datenfülle entstanden. Der tägliche Datenumsatz am meteorologischen Arbeitsplatz im operationellen Vorhersage- und Warndienst des DWD lag 2008 bei 125 GByte pro Tag und wird bis 2015 auf bis zu 500 GByte pro Tag steigen.

Diese Datenmenge kann nur dann wirksam und erfolgreich im Wettervorhersageprozess verwendet werden, wenn sie aufgabenbezogen und zeitnah ausgewertet und in den Produktionsprozess integriert wird. Deshalb werden inzwischen leistungsfähige Systeme zur Teilautoma-

tisierung der Wettervorhersage und zur Visualisierung, Überwachung, Analyse, Diagnose und Auswertung der Daten sowie zur Produktionsunterstützung entwickelt und eingesetzt.

Der DWD hat in den vergangenen Jahren im Rahmen eines internationalen Konsortiums die meteorologische Workstation „NinJo“ entwickelt. Die Entwicklung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Geoinformationsdienst der Bundeswehr und den Wetterdiensten aus Dänemark, der Schweiz und Kanada (KOPPERT 2002). Grundlage für die Entwicklungsarbeiten waren die zuvor zusammengestellten Anforderungen der Nutzer aus dem Wettervorhersage- und Warndienst des DWD und des Geo-Informationsdienstes der Bundeswehr (HEIZENREDER 2000). NinJo wurde im DWD 2007 erfolgreich operationell eingeführt und löste das zuvor über viele Jahre eingesetzte System MAP (KUSCH 1994) ab.

2 NinJo-Grundfunktionen

2.1 Visualisierung meteorologischer Daten und Produkte

Die Hauptfunktion der meteorologischen Workstation NinJo ist die prozessbezogene, zeitnahe Visualisierung und Auswertung aller vorhandenen meteorologischen Daten in einem definierten geografischen Ausschnitt für einen festgelegten Zeitraum. Damit liefert NinJo eine wesentliche Unterstützung für die Analyse und Diagnose aller verfügbaren Daten im Wettervorhersageprozess. Neben den synoptischen und aerologischen Beobachtungsdaten werden mit NinJo regelmäßig numerische Modellvorhersagen, Daten der statistisch-meteorologischen Anschlussverfahren, aktuelle Radar-, Konrad-, Satelliten- und Blitzortungsdaten sowie meteorologische Produkte (z.B. Warnungen, Frontenvorhersagen) visualisiert und ausgewertet. (Abb. 8-1, Abb. 8.2)

Grundsätzlich wurde der NinJo-Client als flexibles Baukastensystem konzipiert. Die grafische Darstellung der verschiedenen Datenarten erfolgt in einem Darstellungsfenster in jeweils eigenen Layern, die je nach Aufgabenstellung vom Nutzer sinnvoll zusammengestellt werden können. Für jedes Layer können eigene Darstellungsattribute vorab konfiguriert und „on the fly“ eingestellt werden (Darstellungsform, Farbtabellen, Datenreduktion usw.). Die Flexibilität dieses Baukastenprinzips zeigt sich vor allem in folgenden Eigenschaften:

- Alle verfügbaren Datenarten können vom Nutzer je nach Aufgabenstellung frei kombiniert und ggf. zu oder abgeschaltet werden.
- Die grafischen Attribute der dargestellten Daten können vielseitig konfiguriert werden (Farbtabellen, dargestellte Datenbereiche, usw.).
- Die Reihenfolge der Darstellung der verwendete Layer übereinander kann frei verändert werden.
- Die darzustellenden Daten können priorisiert werden, um sicherzustellen dass zumindest die wichtigsten Informationen für die jeweilige Aufgabenstellung zur Anzeige kommen.
- Die Transparenz der verwendeten Layer kann frei eingestellt werden.

Für die Konfiguration der grafischen Darstellung der meteorologischen Daten in NinJo werden vielfältige Visualisierungsmöglichkeiten angeboten, mit denen nahezu für jede Aufgabenstellung eine aussagekräftige Darstellungsform erstellt werden kann.

Die Aufgabe einer modernen meteorologischen Workstation ist nicht nur die grafische Darstellung von verfügbaren Daten mit Zooming- und Panning-Funktionalität. Vielmehr kommt es darauf an, den Arbeitsprozess im Vorhersage- und Warndienst optimal zu unterstützen und dabei meteorologisch intelligente Darstellungen zu gewährleisten, die es dem Nutzer erlauben, in kürzester Zeit einen Überblick über die untersuchte Datenvielfalt zu erhalten und gleichzeitig alle wichtigen Informationen zu erfassen.

NinJo wurde deshalb nicht nur als einfaches Darstellungsprogramm für vorproduzierte Bilddateien konzipiert sondern ermöglicht es die originalen Daten aufgabenbezogen meteorologisch darzustellen und auszuwerten. Je nach Darstellungsausschnitt bzw. Zoom-

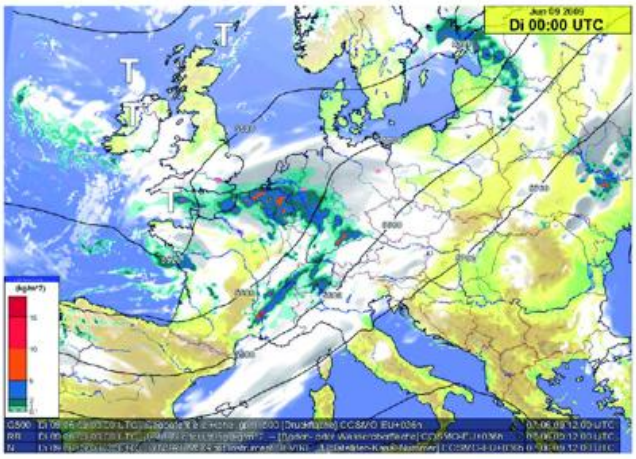


Abb. 8-1: Visualisierung von Modellvorhersagen des COSMO-EU mit NinJo.

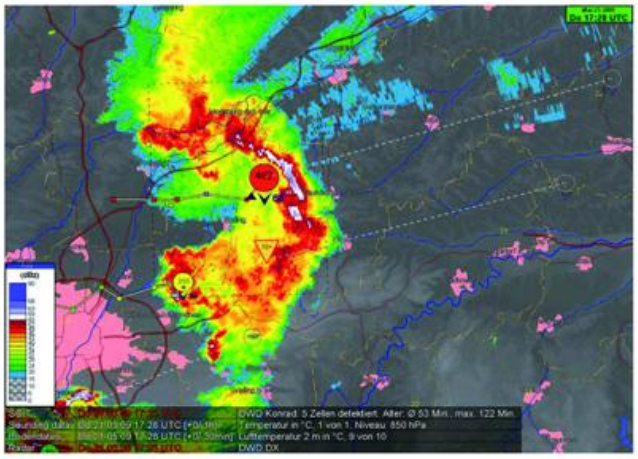


Abb. 8-2: Visualisierung von Radar- und Konrad-Daten in NinJo am Beispiel einer Squall-Line.

Faktor wird der optimale Detaillierungsgrad dargestellt, ohne signifikante Informationen zu verlieren. Jederzeit kann die höchstmögliche Auflösung der zugrunde liegenden Daten genutzt werden. Spezielle Tools erlauben die fachliche Untersuchung und Priorisierung aller Originaldaten. Für synoptische Beobachtungsdaten werden dazu z.B. gesonderte Darstellungsfilter eingesetzt, die es ermöglichen, dass selbst dann die signifikanten Beobachtungsmeldungen dargestellt werden, wenn für eine darzustellende, eng begrenzte geografische Region mehrere Meldungen vorliegen.

Die Auswertung der Daten erfolgt in NinJo zunehmend automatisiert in vorgeschalteten sogenannten „Science-Prozessen“. Eingehende Daten werden dabei bereits auf den Daten-Servern fachlich ausgewertet. Die Ergebnisse dieser automatisierten Auswertungen führen zu einer Informationsverdichtung, so dass bei entsprechender Konfiguration nur noch die zusammengefassten, wesentlichen Informationen visualisiert werden müssen.

Zu den Science-Prozessen zählen z. B. AutoMon, AutoWarn, die **O**bjektive **O**ptimierte **G**uidance (OOG), die Erkennung von Mesozyklonen auf Basis der Volumendaten des Radarverbundes des DWD oder das Verfahren AutoSWIS. Einige dieser Verfahren werden im vorliegenden Heft beschrieben.

2.2 Erstellung meteorologischer Produkte

Der DWD versorgt vor allem seine Schlüsselkunden und die Öffentlichkeit mit einer Vielzahl von meteorologischen Produkten. Dabei werden in der Regel grafische Darstellungen von numerischen Wettervorhersagen sowie anderen meteorologischen Daten und Produkten interaktiv oder automatisiert bearbeitet, erstellt bzw. mit zusätzlichen fachlichen Informationen angereichert und an die jeweiligen Kundengruppen abgegeben.

Zur Unterstützung der interaktiven grafischen Produkterstellung verfügt NinJo über Tools zur Erstellung von gebietsbezogenen Wetterwarnungen und über einen inte-

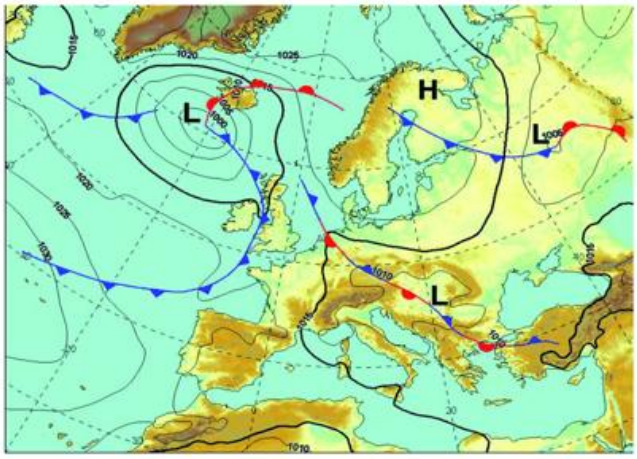


Abb. 8-3: Grafisches Produkt, erstellt mit dem Interaktiven Grafischen Editor (IGE).

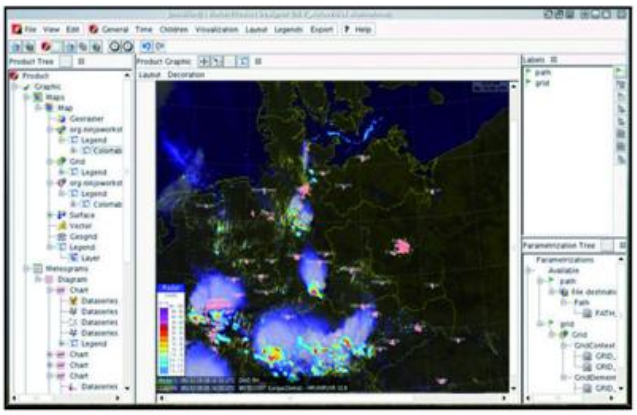


Abb. 8-4: NinJo-Batch-Designer

grierten **I**nteraktiven **G**rafischen **E**ditor (IGE). Mit dem IGE-Framework und dem dazugehörigen MetObject-Layer können die Bearbeiter meteorologische Objekte intuitiv grafisch erzeugen, bearbeiten, positionieren (Fronten, SigWx-Gebiete, Turbulenzgebiete, usw.) und damit eine interaktive Erzeugung grafischer Produkte einfach bewerkstelligen (z. B. Significant Weather Charts, Surface Forecast Charts Abb. 8-3). Durch einfaches Hinzuschalten aller übrigen NinJo-Layer lassen sich dabei alle verfügbaren Informationen in den Prozess der Entscheidungsfindung und Produkterstellung integrieren (z. B. numerische Wettervorhersagen, Satelliten- und Radardaten, Konrad-Daten, synoptische und aerologische Beobachtungsdaten).

Die Komponente NinJo-Batch (Abb. 8-4) ermöglicht die automatisierte und zeitlich gesteuerte Produkterstellung aller in NinJo grafisch darstellbaren meteorologischen Daten und Produkte wie z. B. Modellvorhersagen, Satelliten- und Radarbilder, Meteogramme, Cross-Section-Produkte, Vorhersagekarten. Sie wurde unter Nutzung der existierenden NinJo-Client-Software entwickelt.

Ausgangspunkt für die Batch-Produktion sind beliebige Favoriten, die jeder Nutzer mit NinJo einfach erstellen kann. Diese NinJo-Favoriten können mit dem NinJo-Batch-Designer geladen und für die regelmäßige Produkterzeugung weiter gestaltet werden. Die fertigen Batch-Favoriten bilden dann die Grundlage für die automatisierte und zeitlich gesteuerte Visualisierung im NinJo-Batch-Client. Der NinJo-Batch-Client arbeitet technisch gesehen wie ein normaler NinJo-Client jedoch mit Datei- statt Bildschirmausgabe.

Mit dem NinJo-Batch-Designer können die gewünschten Produkte nach den Vorstellungen der Nutzer übersichtlich gestaltet werden. So wird z. B. festgelegt, wie die Produktlegende aussehen soll und welche Parameter des ursprünglich verwendeten NinJo-Favoriten während der Batch-Produktion später von außen über einen Scriptaufruf verändert werden können. Auf diese Wiese kann ein einmal vorbereiteter Favorit durch simple Script-Parameter vielfach verwendet werden, z. B. für verschiedene Modelle, Modellläufe oder Modellparameter.

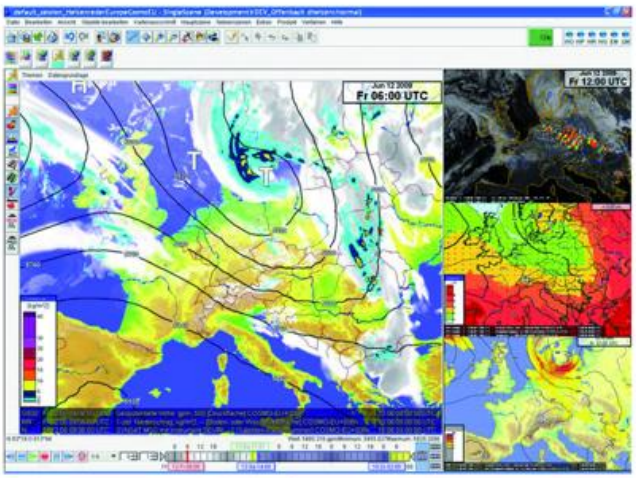


Abb. 8-5: Raum-, Zeitskalen für meteorologische Prozesse.

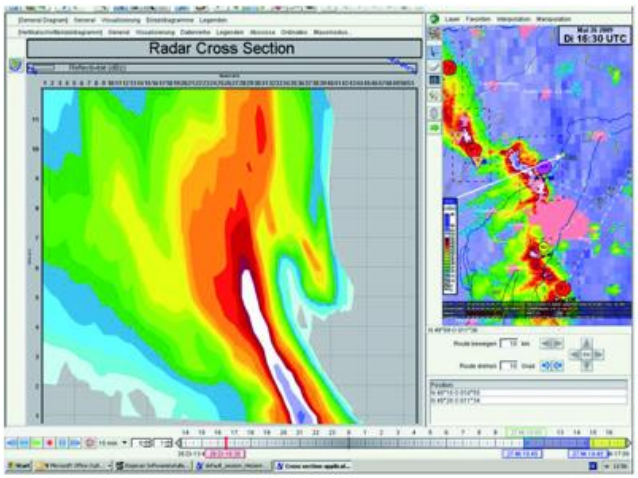


Abb. 8-6: Radar-Cross-Section durch eine markante „squall line“ nördlich von München.

Folgende zusätzliche Gestaltungsmöglichkeiten werden vom NinJo-Batch-Designer für die Erstellung und Bearbeitung von Batch-Favoriten angeboten:

- Dokumentation von Metadaten (Produktname, Autor,Kundendaten, usw.),
- Legendengestaltung (Inhalt der Beschriftung, Zeitangaben, Layout, Position),
- Overlaygestaltung (Logo, freier Text),
- Wiederverwendbarkeit des Produktes für andere Zeit und Modellparameter,
- Produktvorschau (Darstellung des Favoriten, Legendeninhalte, Produktlayout),
- Exportoptionen (Dateiausgabeformat, Dateiausgabeort).

Mit den Komponenten EPM und AutoWarn unterstützt NinJo die Erstellung und das Überwachen von Wetterwarnungen. Details zu diesen Systemen werden unter anderem im vorliegenden Prometheft in weiterführenden Beiträgen geliefert (Reichert, vorliegende Promet-Ausgabe).

2.3 Konfiguration des NinJo-Systems

Um dem Nutzer möglichst viele Einsatzmöglichkeiten zu gewährleisten wurde NinJo in allen Bereichen flexibel konfigurierbar konzipiert. Nicht nur die Form der Darstellung der verschiedenen meteorologischen Daten und Produkte in den jeweiligen Layern kann konfiguriert werden. Die Nutzer können auch das Aussehen und Verhalten der grafischen Benutzeroberfläche an den jeweiligen Arbeitsprozess anpassen.

Die Konfiguration des Systems ist in vielen Bereichen einfach über die Programmoberfläche möglich (BANSE 2009). Z.B. kann man sich einen gewünschten geografischen Ausschnitt mit entsprechenden geografischen Hintergrunddarstellungen in gewünschter Farbkombination auswählen und dazu die erforderlichen meteorologischen Daten mit den entsprechenden Farbtabellen zusammenstellen und visualisieren, um auf diese Weise einen Favoriten für die spätere regelmäßige Nutzung zu gestalten.

Weiterführende Konfigurationsmöglichkeiten, die über die Einstellmöglichkeiten der Programmoberfläche hinausgehen, werden über XML-Konfigurationsdateien angeboten. Die gesamte Vielfalt der möglichen Konfigurationseinstellungen ist in den softwaretechnisch definierten Strukturen der XML-Dateien der einzelnen NinJo-Komponenten festgelegt. Entsprechende Dokumentationen dazu werden online zur Verfügung gestellt.

3 NinJo-Anwendungsbeispiele

Die Anwendungsmöglichkeiten von NinJo sind sehr vielfältig und gehen über die Nutzung im Wettervorhersage- und Warndienst hinaus. Stellvertretend sollen hier nur einige wenige Beispiele gezeigt werden.

3.1 Eine Standardkonfiguration des NinJo-Hauptfensters

Abb. 8-5 zeigt eine Standardkonfiguration des NinJo-Hauptfensters für den operationellen Vorhersage und Warndienst, die das Hauptfenster in eine Hauptszene und drei Nebenszenen einteilt. Im Hauptfenster werden numerische Vorhersagen der Bewölkung und des Niederschlages zusammen mit dem vorhergesagten Geopotentialfeld 500 hPa visualisiert. Zur Darstellung der prognostizierten Bewölkung wird ein synthetisches Satellitenbild verwendet (REICHERT 2004).

Die rechte obere Nebenszene zeigt zur Analyse der aktuellen Wettersituation die aktuellen synoptischen Beobachtungsdaten zusammen mit den aktuellen Satelliten-, Radar- und Konrad-Daten. Die Darstellung aktualisiert sich alle 60 Sekunden im sogenannten „Autoupdate-Modus“ und kann jederzeit zur Hauptszene geladen werden.

In den übrigen Nebenszenen sind ausgewählte numerische Vorhersagen für den eingestellten Zieltermin dargestellt, z.B. die Vorhersagen der Temperatur in 850 hPa zusammen mit dem Windfeld in 850 hPa (mittlere Nebenszene) und die Vorhersage des Bodendruckes zusammen mit den erwarteten maximalen Windböen oberhalb Windstärke 7 Bft in 10 Metern über Grund (untere Nebenszene).

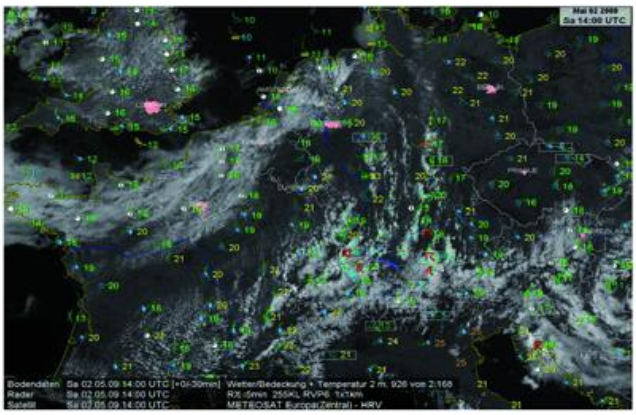


Abb. 8-7 (a): Visualisierung konvektiver Zellen über Süddeutschland (synoptische Skala).

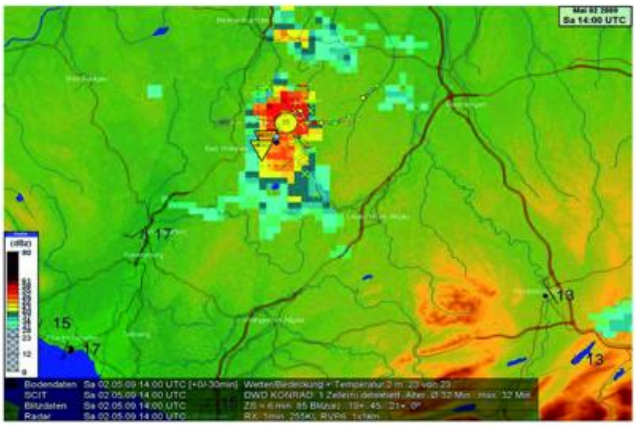


Abb. 8-7 (b): Visualisierung konvektiver Zellen über Süddeutschland, Konrad-Zelle Nr. 35, Verlagerung mit 19 km/h nach Westen, „Mesocyclone Detection“ östlich von Bad Waldsee.

Mit dieser Einstellung ist es einfach möglich, einen Überblick über die aktuelle Wetterlage und die numerischen Vorhersagen für die kommenden Stunden und Tage zu erhalten. Insbesondere die Überwachung von warnrelevanten Parametern, wie das Auftreten von beobachteten oder vorhergesagten Orkanböen oder die Entwicklung von schweren Gewittern kann so übersichtlich erfolgen. Dabei ist jederzeit ein Wechsel der Nebenszenen zur Hauptszene möglich, wobei in jeder Szene weitere Parameter untersucht werden können. Durch die einfach zu bedienende Zeitsteuerung sind unterschiedliche Analyse- und Prognosetermine einstellbar. Haupt- und Nebenszenen können zudem zeitlich synchronisiert werden, so dass sich ein Wechsel der Displayzeit auf alle dafür eingestellten Szenen gleichzeitig auswirkt.

Je nach Aufgabenstellung kommen im DWD eine Vielzahl von Standardkonfigurationen des NinJo Hauptfensters zum Einsatz (aufgabenbezogene „Sessions“). So sind z.B. die Konfigurationseinstellungen in der Flugmeteorologie oder im Seewetterdienst den dortigen Aufgabenstellungen eng angepasst. Der Nutzer des NinJo-Systems kann über das Auswahlmenü zwischen verschiedenen Sessions wechseln.

3.2 Sommerliches Nowcasting

Für das sommerliche Nowcasting werden häufig Auswertungen der aktuellen Radardaten des Radarverbundes im DWD (SCHREIBER, 2001) in Zusammenhang mit den durch das Konrad-System identifizierten Starkregen- bzw. Gewitterzellen (LANG 2001) verwendet. Mit Hilfe des Cross-Section-Layers in NinJo können zusätzlich die vertikalen Strukturen der betreffenden Gewitterzellen analysiert und unmittelbar im operationellen Vorhersage- und Warndienst verfolgt werden. Dabei werden durch die Nutzung der detaillierten Darstellungsmöglichkeiten von NinJo meteorologische Phänomene sichtbar, die bislang noch nicht im operationellen Vorhersagedienst berücksichtigt werden konnten. Abb. 8-6 zeigt den Querschnitt durch eine markante „squall line“, die am 26.05.2009 nördlich von München nach Nordosten zog. Dabei wird sehr deutlich die „**B**ounded **W**eak **E**cho **R**egion“ (BWER) in etwa 5 km Höhe sichtbar. Die hagelanzeigenden Reflektivitäten oberhalb 55 dBz reichen bis 6 km hinauf.

Für die Analyse von Mesozyklonen und den damit verbundenen rotierenden Gewitterwolken (Superzellen) ist eine detaillierte Auswertung der Dopplerwinddaten des Radarverbundes des DWD erforderlich. Im Bereich von Superzellen findet man häufig auffällige Windscherungen in den Dopplerwinddaten („gate to gate shear“), die auf eine signifikante Rotation der Zellen um eine vertikale Achse hinweisen (ZRNIC 1985). Die notwendige detaillierte Auswertung der entsprechenden Radar-Volumendaten aller 16 Radarstandorte des DWD kann nur automatisiert zum Erfolg führen. Deshalb wurde im DWD im Rahmen des Projektes AutoWarn ein Algorithmus zur Erkennung von rotierenden konvektiven Zellen entwickelt und als „science process“ auf den NinJo-Servern implementiert. Das Verfahren wertet die Volumendaten aller Radarstandorte unmittelbar nach Verfügbarkeit aus und liefert die erkannten Zellen in Form eines international standardisierten XML-Formates. Im SCIT-Layer (**S**torm **C**ell **I**dentification and Tracking) können die Daten zusätzlich zu den Konrad-Zellen und allen anderen verfügbaren Datenarten dargestellt werden. (Abb. 8-7(a), Abb. 8-7(b))

3.3 Visualisierung von numerischen Modellvorhersagen

Der Orkan „Kyrill“ richtete am 18. und 19. Januar 2007 schwere Schäden in Deutschland an. Er gehörte zu den stärksten Orkanen seit Lothar. Abb. 8-8 (a) zeigt eine Visualisierung der vom Globalen Modell des DWD prognostizierten maximalen Windböen für den Vorhersa-

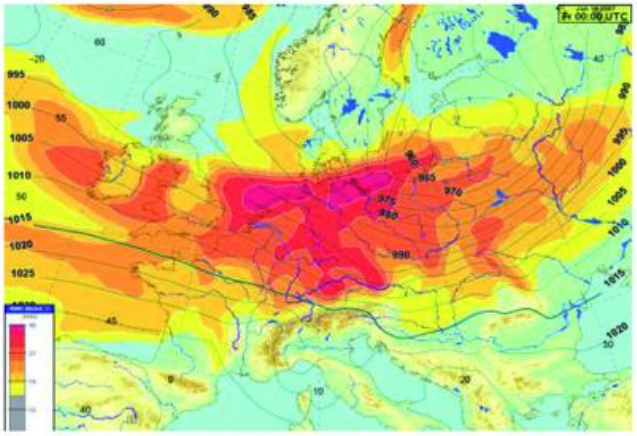


Abb. 8-8 (a): Raum-, Zeitskalen für meteorologische Prozesse.

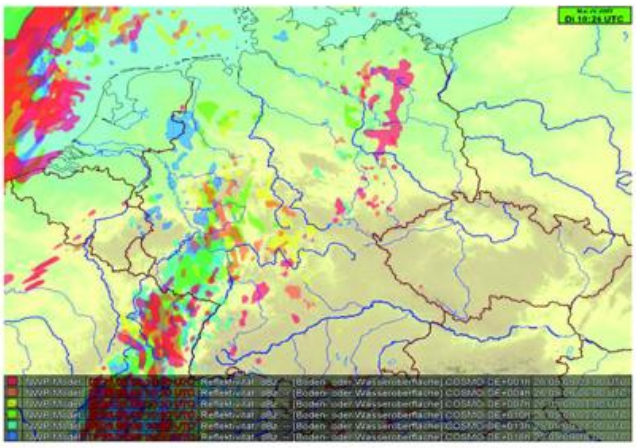


Abb. 8-8(b): „Lagged average forecast ensemble“ der prognostizierten Radarreflektivität > 37 dBz.

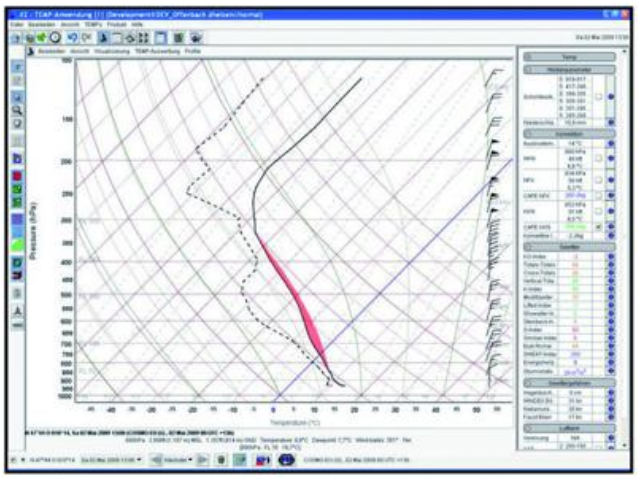


Abb. 8-9: Temp-Diagramm.

getermin 19.01.2007, 00 UTC. Auf Grund der sehr guten numerischen Vorhersagen wurden für den Orkan rechtzeitig entsprechende Unwetterwarnungen ausgegeben. Dennoch forderte der Orkan 47 Todesopfer und führte zu erheblichen Sachschäden in weiten Teilen Europas.

Mit der Entwicklung des COSMO-DE verfolgt der DWD das Ziel die konvektiven Prozesse in der Atmosphäre noch besser als bisher zu erfassen und vorherzusagen. Die Konvektion wird im COSMO-DE explizit simuliert und nicht mehr parametrisiert. Auf Grund der Grenzen der Vorhersagbarkeit konvektiver Phänomene, insbesondere im Entstehungsprozess der Konvektion, sind einzelne Modellvorhersagen des COSMO-DE natürlich nicht aussagekräftig genug, um das Auftreten von heftigen konvektiven Ereignissen landkreisgenau zu prognostizieren. Auch in der Skala konvektiver Prozesse sind deshalb Ensemblevorhersagen erforderlich. Mit NinJo können die Ergebnisse von verschiedenen Modellvorhersagen bei entsprechender Konfiguration aussagekräftig dargestellt werden, siehe Abb. 8-8 (b).

3.4 Diagramme im NinJo-System

Mit dem Diagramm-Framework sind unterschiedliche Typen von Diagrammen darstellbar. Neben den Cross-Sections werden vor allem aerologische Diagramme und Meteogramme häufig benutzt (Abb. 8-9, Abb. 8-10).

Mit den aerologischen Diagrammen erhält der Nutzer einen umfassenden Überblick über die beobachteten bzw. vorhergesagten Werte von Temperatur, Wind und Taupunkt in der freien Atmosphäre. Für die Darstellung werden eine Vielzahl abgeleiteter Parameter berechnet, wie z.B. CAPE, Precipitable Water etc.

Ein besonderer Meteogrammtyp ist das Multi-Model-Meteogramm. Mit ihm wird der zeitliche Verlauf der konfigurierten meteorologischen Parameter für den Vorhersagezeitraum dargestellt. Jedoch nicht nur von einem Modell sondern von allen Modellen, die in der Konfiguration berücksichtigt und auf den NinJo-Servern in den akzeptierten Datenformaten zur Verfügung gestellt wurden. Auf diese Weise können nicht nur die Prognosen sondern auch Modellunterschiede bzw. die Vorhersagbarkeit der jeweiligen Wettersituation beurteilt werden.

4 Software-Architektur

Um die vielfältigen Nutzeranforderungen umzusetzen, wurde für NinJo eine moderne und flexible Softwarearchitektur entwickelt. Die Auswahl einer objektorientierten Programmiersprache erwies sich dabei als der richtige Ansatz. Grundlage für die Softwarearchitektur waren der strikt objektorientierte Entwurf, das Ausnutzen vorhandener sowie das Entwickeln eigener Entwurfsmuster.

Java ist eine geeignete Programmiersprache dafür und bot die beste Basis für die Schaffung von Grundbausteinen des Systems, die Frameworks genannt werden.Diese Frameworks bauen in mehreren Architekturschichten aufeinander auf und bieten die Grundlage für die Entwicklung verschiedener NinJo-Anwendungen.

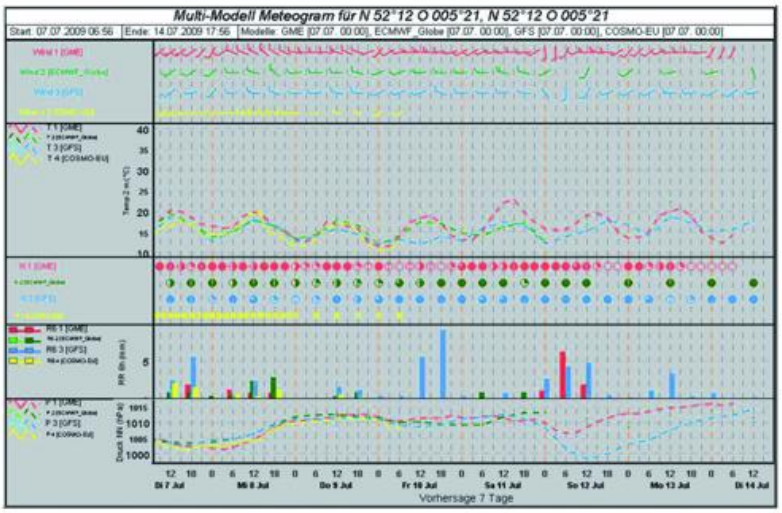


Abb. 8-10: Multimodelldiagramm.

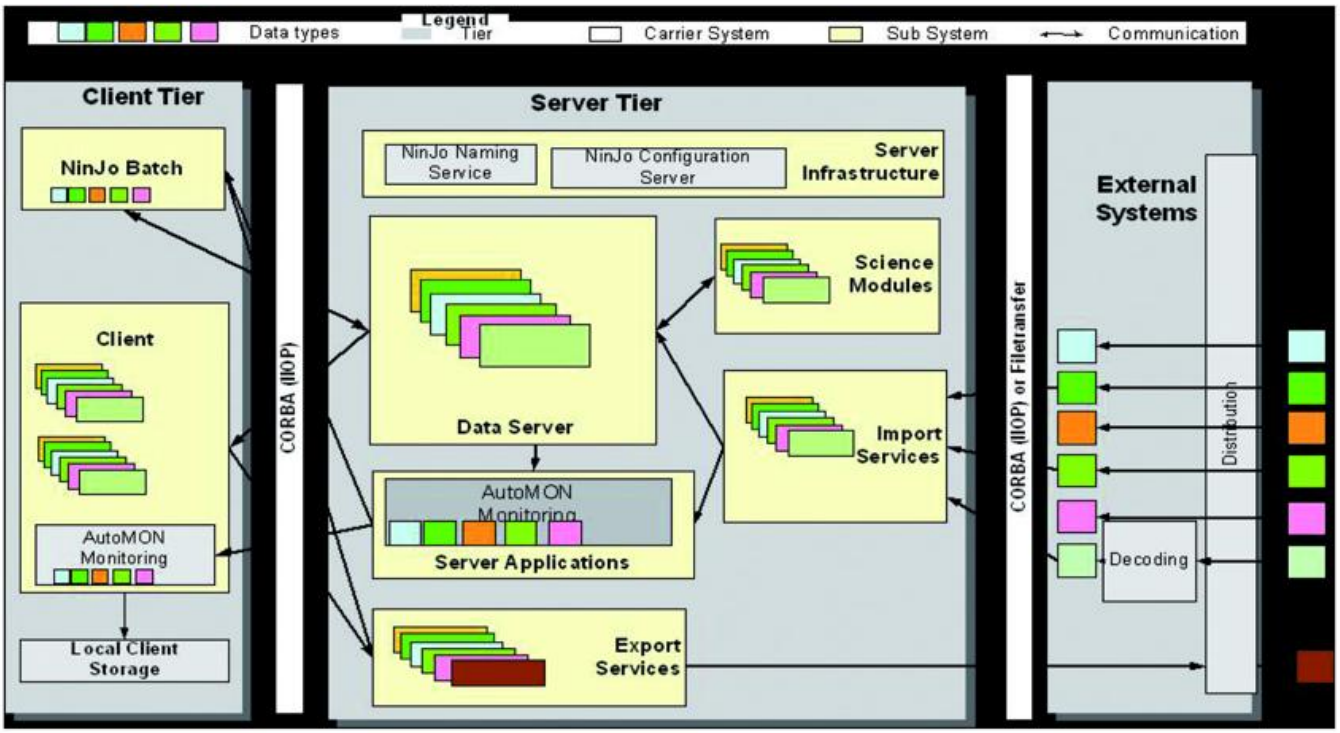


Abb. 8-11: Komponentensicht und Datenfluss.

NinJo eigene Entwurfsmuster stellen eine standardisierte Art der Programmierung sicher, so dass Wartung und Weiterentwicklung aller Komponenten durch verschiedene Entwickler möglich ist, auch wenn diese tausende Kilometer voneinander entfernt arbeiten.

NinJo ist nicht einfach eine meteorologische Workstation. Aus technischer Sicht ist es ein Baukastensystem. Es kann als einfacher Satellitenbildbetrachter oder als Produktionssystem für hoch spezialisierte interaktive oder automatisch erzeugte Produkte benutzt werden. In welcher Form es dem Nutzer entgegentritt, entscheidet dieser selber, und zwar mit Hilfe der ausgefeilten Konfigurationsmöglichkeiten.

4.1 Übersicht

Vereinfacht gesehen folgt NinJo dem klassischen Client-Server-Ansatz mit den typischen drei Schichten: Client, Server und Middleware (Abb. 8-11). Die verschiedenen server- und clientseitigen Komponenten sind an bestimmte meteorologische Datentypen gebunden. So gibt es beispielsweise einen Datenimport-Prozess für Satellitenbilder, einen Datenserver für die Speicherung und Bereitstellung der Satellitenbilder sowie im Client einen Satellitenlayer, der die Bilder auf der Karte darstellen kann.

Analog gibt es server- und clientseitige Komponenten, die z.B. für Radardaten oder die Daten der synoptischen Beobachtungsstationen (z.B. synoptische Beobachtungen) zuständig sind. In der Abbildung symbolisiert eine Farbe jeweils einen bestimmten Datentyp.

Die strikte Trennung der Zuständigkeiten (separation of concerns) ist eine der grundlegenden Regeln des objektorientierten Entwurfs. Das Festlegen dieser Zuständigkeiten in den richtigen Klassen, Frameworks, Architekturschichten und Komponenten macht die Entwicklung der „richtigen“ Architektur zur Herausforderung. Zusätzlich gibt es übergreifende Services und Komponenten, die unter anderem die Verständigung zwischen getrennten Systemen oder Komponenten sicherstellen oder aber dafür zuständig sind, aus den einzelnen Teilen das Gesamtsystem zusammenzusetzen. Beispielsweise sorgt in NinJo ein Eventservice in Zusammenarbeit mit einem Monitoringservice (Automon) dafür, dass der Nutzer am Client gewarnt wird, wenn Daten eintreffen, deren Werte bestimmte Schwellenwerte überschreiten.

Science-Module sind normalerweise auf einer Server-Hardware installiert, verhalten sich aber softwaretechnisch grundsätzlich wie Clients, indem sie Daten der Server lesen und dann auswerten beziehungsweise wissenschaftliche Berechnungen anstellen. Die NinJo-Science-Komponenten legen schließlich die neu berechneten Daten auf den Datenservern ab.

4.2 Client-Architektur – ein Baukastensystem aus PAC-Framework und Konfiguration

Als Haupt-Kommunikationsgrundlage zwischen den Serverkomponenten, den Clients und verschiedenen Services in NinJo dient CORBA. Darüber abstrahieren das NinJo-Kommunikations-Framework und das sogenannte „Access-Layer“ die technischen Details für den Anwendungsentwickler in NinJo und kümmern sich um das Auffinden der passenden Datenquelle sowie um Failover, Wiederanlauf bei Verbindungsausfall etc. Weitere Frameworks haben jeweils ihre speziellen Aufgaben: VisLib (Fachliche

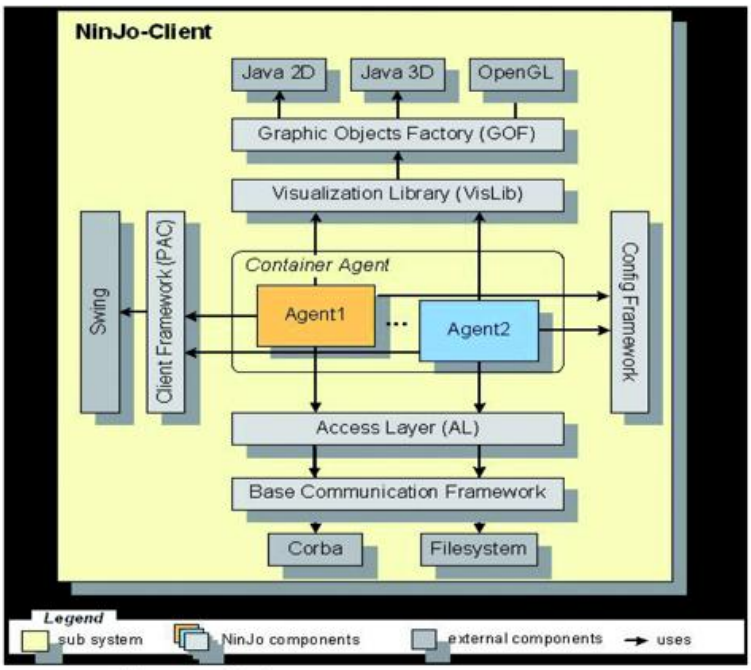


Abb. 8-12: Client-Architektur.

und technische Visualisierung) und GOF (Grafic Objects Factory) kümmern sich um die grafischen Darstellungen, basierend auf JAV2D, JAV3D oder OpenGL (Abb. 8-12).

4.3 XML-Konfiguration und Favoriten

Für die Konfiguration, einen der anspruchvollsten Aspekte des Systems dient XML als Dateiformat. Ein NinJo eigenes Konfigurationsframework dient zum Definieren und Validieren verschiedenster XML-basierter Strukturen sowie zum Lesen und Schreiben der zugehörigen Konfigurationsdateien. Hierbei dienen sogenannte XML Bean-Definitionen der Festlegung der erlaubten Struktur der XML-Dateien. Das NinJo-eigene Konfigurationsframework nutzt diese XBD-Dateien zum Validieren von Konfigurationen und zum Generieren von JAVA-Klassen für das Lesen und Schreiben dieser XML-Dateien (Marshalling/ Unmarshalling).

Mit mehr als 1 Mio Zeilen JAVA-Quellcode und mehr als doppelt so vielen Zeilen XML – Konfiguration sowie ca. 800 verschiedenen XBD Definitionen lässt sich der konfigurationsgetriebene Aufbau des Systems auch zahlenmäßig belegen (Abb. 8-13).

4.4 Der Client-Baukasten

In der objektorientierten Softwareentwicklung werden verschiedene Entwurfsmuster eingesetzt.

Model-**V**iew-**C**ontroller (MVC) bezeichnet das bekannteste Architekturmuster zur Strukturierung von Softwaresystemen. Es besteht aus den drei Einheiten Datenmodell (Model), Präsentation (View) und Programmsteuerung (Controller). Ziel des Musters ist es, einen flexiblen Programmentwurf mit sauber getrennten Elementen zu ermöglichen, der eine spätere Änderung oder Erweiterung erleichtert und eine Wiederverwendbarkeit der einzelnen Komponenten zulässt. Der NinJo-Client folgt einem Entwurfsmuster, das das MVC erweitert. Mit dem „**P**resentation **A**bstraction **C**ontrol“ Muster (PAC) wird ein ganzer Baum kooperierender MVC-Agenten aufgebaut.

Jeder PAC-Agent hat dabei eine Controller, eine Modell- und eine View-Komponente (analog dem MVC = Model/View/Controller Pattern). Die Controller stellen dabei den Kommunikationsfluss zwischen den Agenten sicher. Hierbei läuft alles streng hierarchisch ab. Die Agenten müssen in der Kommunikation sozusagen „den Dienstweg einhalten“.

Direkte Kommunikation findet nur vertikal, also zwischen Kind-Agent und Elternagent statt. Das ist notwendig, um innerhalb der stark dynamischen Hierarchie des Clients für Sicherheit der Abläufe zu sorgen. Wenn man weiß, dass sich Art, Anzahl, Hierarchie und Inhalt der Agenten durch beliebige Nutzerinteraktion im Betrieb von NinJo ständig ändern, ist klar, dass nur „strenge Regeln“ dieses System absichern können (Abb. 8-14).

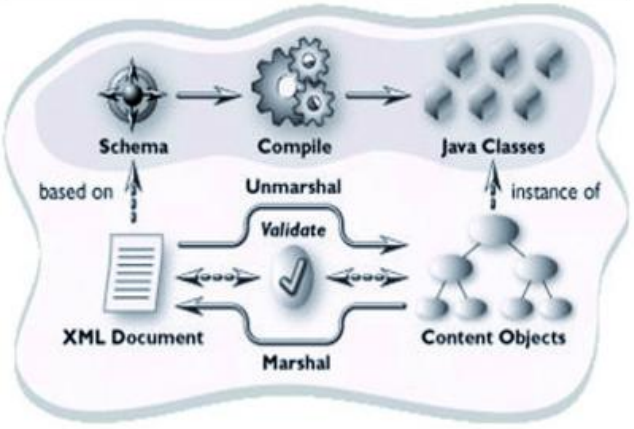


Abb. 8-13: XML-Binding.

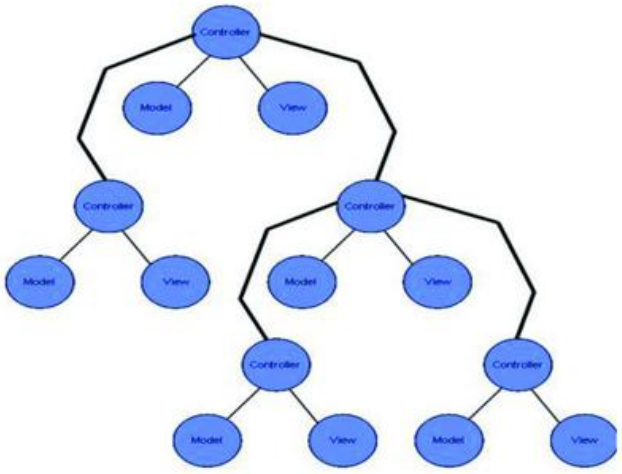
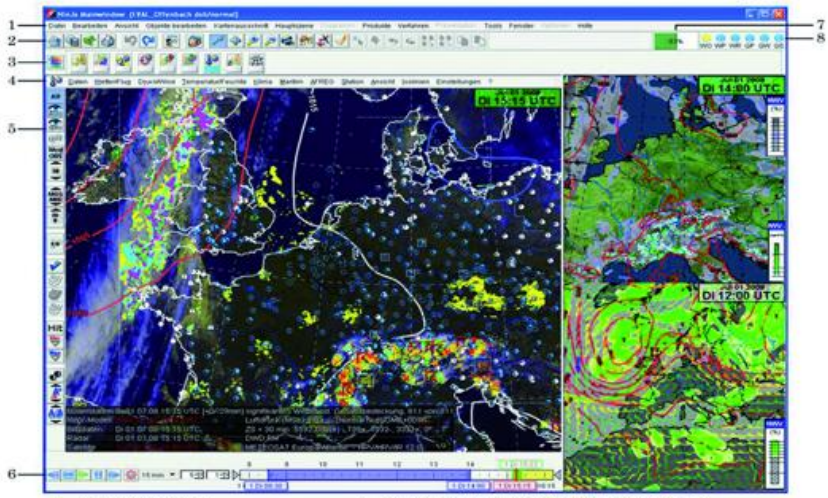


Abb. 8-14: PAC-Hierarchie.



1 Allgemeines Menü
2 Allgemeine Symbolleiste
3 Layersymbolleiste
4 Layerspezifisches Menü
5 Bereich für die layerspezifische Symbolleiste
6 Zeitkontrollen und Zeitleiste
7 Anzeige der aktuellen Speicherauslastung durch NinJo
8 Warnlampen für das automatische Warnverfahren

Abb. 8-15: Aufbau des NinJo-Hauptfensters.

Beispielsweise obliegt die Kontrolle über parallele Abläufe (Multithreading) im Client dem PAC-Framework und wird über die Controllerhierarchie abgewickelt. PAC stellt sicher, dass innerhalb eines Agenten nur ein Thread gleichzeitig aktiv ist, während es im Gesamtsystem im Prinzip beliebig viele sein können. Dadurch sind die Daten innerhalb eines Agenten gegen „fremde“ Zugriffe abgesichert, so dass sie trotz Parallelverarbeitung konsistent bleiben.

Ebenso werden zentrale Abläufe wie Zeitsteuerung, Animation, Eventverarbeitung usw. ausschließlich über PAC gesteuert und kontrolliert.

Beim Laden eines NinJo-Favoriten beispielsweise wird ein neuer Agentenbaum angelegt. Jeder Agent bekommt seine Konfiguration zugeteilt, initialisiert seine Daten, seine Bedienelemente (GUI), seine Grafik. Die Client Oberfläche setzt sich dann aus GUI-Komponenten der PAC-Hierarchie zusammen, analog die Grafik aus Graphenteilen (Knoten und Bäumen von Grafikelementen).

Beispiel: Start eines „Hauptfensters“ in NinJo (Abb. 8-15). Dieses beinhaltet maximal vier Szenen. Jede Szene ist eine Kartendarstellung von verschiedenen übereinander gezeichneten Datenthemen, die in NinJo „Layer“ genannt werden. Zum Beispiel als unterstes die Geografie, darüber ein Satellitenbild, darüber eine Modellvorhersage als Isolinien, darüber Stationsdaten mit Text und Symboldarstellungen.

Jedes Layer ist ein PAC-Agent vom Typ Layer (ein Bottom Level Agent), jede Szene ist ein Agent vom Type Scene (Intermediate Level) und kann beliebig viele Layer aggregieren. Jedes Layer kann seinen eigene Scenegraphen (die Darstellung seiner Daten als Bild oder Vektorgrafik), Legenden sowie Menüs, Toolbars und andere GUI-Elemente zuliefern. Die Szene sammelt diese Grafik und Bedienelemente ein und ordnet sie entsprechend der Layoutvorgabe an.

Multiszenen-Agenten nun tun dies analog mit dem, was sie von ihren Kind-Szenen bekommen können: Grafik und GUI-Elemente (komplette Menüzeile, Komplette Toolbar, einzelne Knöpfe) einsammeln und richtig anordnen. Auf diese Art baut sich ein typischer NinJo-Multiwindow-Client selbst zusammen. Entsprechend dem objektorientierten Ansatz (Zuständigkeiten) kümmert sich jeder Agent hierbei selber um seine Daten, seine Grafik, seine Menüs etc. Containeragenten verwalten zusätzlich die untergeordneten Kinder. Sie geben zum Beispiel Kommandos (Command) durch und nehmen Anfragen (Requests) entgegen. Auch hier geht es streng nach Dienstablauf: Kommandos gehen von oben nach unten, Anfragen („Anträge“) von unten nach oben.

4.5 Multithreading im Client

Die dynamische Baumstruktur und daraus resultierende „strenge Dienstabläufe“ stellte sich für die Multithreadfähigkeit zunächst als schwierig heraus. Für die Flexibilität (beliebige Anzahl und Art offener Anwendungen, freie Konfigurierbarkeit) sowie das Baukastenprinzip an sich ist es jedoch der beste Weg.

Die Multithreadfähigkeit konnte schließlich auch mit Hilfe der PAC-Agentenstruktur eingeführt und abgesichert werden.

5 Das internationale NinJo-Konsortium

Die rasante Entwicklung der Hard- und Softwaretechnologien ermöglichte seit etwa 1980 die Entwicklung von meteorologischen Visualisierungs- und Produktionssystemen in den Wettervorhersagediensten der WMO. Sie wurden meist unabhängig voneinander und oft zunächst für die Verifikation der Datenerfassung entwickelt und nebeneinander eingesetzt. Auf diese Weise konnten schließlich die verschiedenen verfügbare Daten und Produkte direkt am synoptischen Arbeitsplatz zeitnah dargestellt bzw. ausgewertet oder bearbeitet werden (KUSCH 1994, KOPPERT 1997, HEIZENREDER 1999).

Zu Beginn des neuen Jahrtausends ließen die begrenzten personellen und finanziellen Ressourcen im Entwicklungsbereich des DWD eine parallele Pflege und Weiterentwicklung der entstandenen Vielfalt von meteorologischer Anwendungssoftware zur Entschlüsselung, Speicherung, Visualisierung und Bearbeitung von meteorologischen Daten im DWD und im ehemaligen GeophysBDBw nicht mehr zu. Auch war die Erweiterungsfähigkeit der Altsysteme größtenteils an ihre Grenzen gestoßen und ein Technologiewechsel notwendig.

Im Rahmen des Projektes "Zusammenführung zentraler wetterdienstlicher Bereiche des DWD und des GeophysBDBw" wurde deshalb am 19.12.1999 das „Gemeinsames Visualisierungs- und Produktionssystem“ (GGS) für den

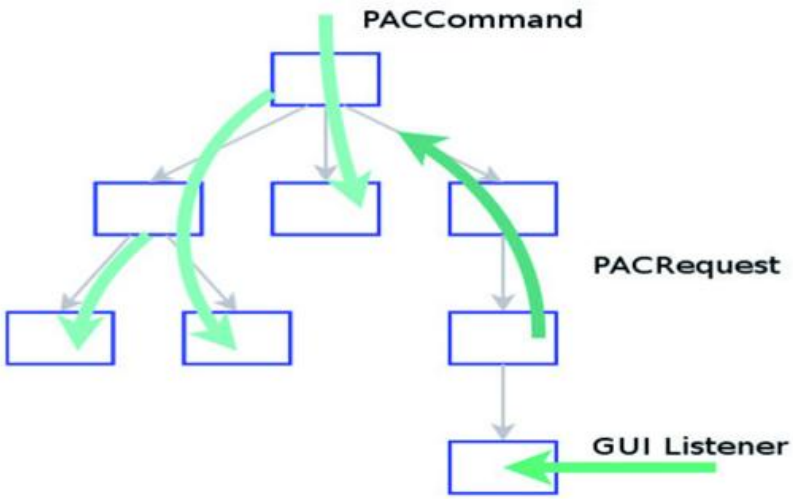


Abb. 8-16: PAC-Agentenhierarchie des Hauptfensters.

DWD und den GeophysBDBw in Auftrag gegeben. Das neue gemeinsame System sollte auf verschiedenen preiswerten Hardwareplattformen lauffähig sein, die Funktionalitäten der vorhandenen Softwaresysteme integrieren und erweitern sowie eine Bündelung der Ressourcen für zukünftige Pflege- und Entwicklungsarbeiten ermöglichen. Durch Anwendung moderner Technologien und wissenschaftlicher meteorologischer Verfahren sollte es die Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Wetterdienste in der Zukunft sicherstellen.

Im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit zeigte sich rasch, dass andere Wetterdienste mit vergleichbaren Problemen und Anforderungen an einer Zusammenarbeit mit dem DWD interessiert waren. Im Jahr 2001 schlossen sich die Wetterdienste aus der Schweiz und Dänemark dem Projekt an. Beide Wetterdienste benötigten ebenfalls ein neues System zur Unterstützung des operationellen Wettervorhersagedienstes und waren von der Konzeption und den Möglichkeiten des geplanten GGS überzeugt. Damit war aus der nationalen eine internationale Kooperation geworden, zu der im Jahre 2003 der kanadische Wetterdienst hinzu kam (KOPPERT 2004). Die Kanadier hatten sich nach einer weltweiten Marktsichtung für das GGS entschieden, da es ihnen sowohl von der gewählten Technologie als auch der Projektstruktur und den Kooperationsmöglichkeiten am zukunftsträchtigsten erschien.

Die Entscheidung für den gemeinsamen Systemnamen fiel auf „NinJo“, da der ursprüngliche deutsche Begriff GGS im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit nicht mehr passend erschien.

In 2003 wurde damit begonnen, ein vertraglich abgesichertes internationales Konsortium aus den beteiligten Wetterdiensten zu bilden, mit dem Ziel, die Entwicklung und Pflege des meteorologischen Präsentations- und Produktionssystems unter Leitung des DWD zukünftig gemeinsam durchzuführen. Der entsprechende Konsortialvertrag wurde 2006 unterzeichnet und 2009 bestätigt. Die gleichberechtigten Partner im NinJo-Konsortium bringen entsprechend ihrer Leistungskraft eigene Entwicklungsleistungen und finanzielle Ressourcen in die Entwicklung und Pflege des Systems und der entsprechenden meteorologischen Verfahren ein. Neben der erfolgreichen direkten Zusammenarbeit in der Entwicklung selbst, führte die gemeinsame Arbeit am NinJo-System auch zu einer Vertiefung der fachlichen Kontakte der beteiligten Wetterdienste.

Für die Zusammenarbeit im NinJo-Konsortium wurden verschiedenen Gremien eingerichtet. Entscheidungen über die Entwicklungspläne und Ressourcenverteilungen werden regelmäßig im Steering Committee des NinJo-Konsortiums getroffen. Im Steering Committee sind die beteiligten Wetterdienste durch jeweils ein Mitglied vertreten, der Leiter wird zusätzlich vom DWD gestellt. Die Planung des Softwaredesigns erfolgt im NinJo-Chefdesigner (CD)-Team auf der Basis der meteorologisch-fachlichen Anforderungen. Jeder Konsortialpartner stellt mindestens einen Vertreter für das CD-Team.

Auch die internationalen Nutzer des NinJo-Systems arbeiten eng zusammen. In der vom Steering Committee eingerichteten NinJo-User-Group (NUG) erfolgt ein intensiver Austausch der Anwender über die Nutzung, Konfiguration und Bedienung des NinJo Systems. Der letzte Workshop der NUG fand vom 9. bis 11. Juni 2009 in Montreal statt und zählte 63 Teilnehmer. Dabei zeigte sich, dass NinJo inzwischen internationale in unterschiedlichsten Konfigurationen und Anwendungsbereichen erfolgreich zum Einsatz kommt und zu einem geschätzten sowie unverzichtbaren Arbeitsmittel in den Wettervorhersagediensten der Konsortialpartner geworden ist.

Für die externe Lizenzierung arbeitet der DWD erfolgreich mit einer externen Firma zusammen, die sowohl die Installation als auch Schulungen und Support für die Lizenznehmer gewährleistet.

NinJo wird nicht nur bei den Konsortialpartnern operationell eingesetzt. Auch externe Lizenznehmer, wie z.B. die Wetterdienste in Südafrika und Spanien sowie weitere Nutzer (z.B. Klimahaus Bremerhaven, EUMETSAT) setzen NinJo im täglichen Betrieb ein.

Staatliche Einrichtungen eines Landes, dessen Wetterdienst Vertragspartner im NinJo-Entwicklerkonsortium ist, können die NinJo-Software für den amtlichen Gebrauch, insbesondere im Zusammenhang mit Verteidigungsaufgaben sowie zu Zwecken der öffentlichen Forschung und Lehre kostenlos nutzen. In diesem Rahmen sind die staatlichen Einrichtungen zwar von der Entrichtung einer Lizenzgebühr befreit aber für Installation und Support sowie für die Datenbereitstellung sind in jedem Fall die notwendigen Aufwandsentschädigungen zu leisten. An vielen Universi-

täten wird NinJo auf diesem Wege für die Forschung und Lehre eingesetzt.

Die internationale Kooperation zwischen den beteiligten Wetterdiensten ist in den vergangenen Jahren zu einem wichtigen Bestandteil der strategischen Planung der Weiterentwicklung des NinJo-Systems geworden. Durch die gemeinsame Nutzung der eingebrachten Ressourcen aller Konsortialpartner für die Softwareentwicklung und -pflege konnten die Anforderungen der Nutzer an die kontinuierliche Verbesserung und Modernisierung der Systeme zur Unterstützung des Wettervorhersage- und Warndienstes mit zunehmendem Erfolg erfüllt werden. Konzeptioneller Bestandteil der internationalen Zusammenarbeit ist die Kooperation des NinJo-Entwicklungsteams mit den Nutzern. In der NinJo-Evaluierungsgruppe werden regelmäßig die Planungen der Nutzer zur Weiterentwicklung des Wettervorhersagedienstes dokumentiert, bestehende Gemeinsamkeiten der Konsortialpartner analysiert und entsprechende Änderungsanforderungen der Nutzer an das NinJo-System gemeinsam mit den Entwicklern diskutiert, priorisiert und ihre Umsetzung geplant. Damit wird eine zielgerichtete Weiterentwicklung von NinJo auf der Basis der wichtigsten Nutzeranforderungen garantiert, gleichzeitig aber auch die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Wettervorhersage gefördert.

Für den Erfolg der internationalen Zusammenarbeit im NinJo Konsortium in einem hochdynamischen internationalen Umfeld wurden in den letzten Jahren neue Wege der internationalen Kooperation, der Software- und Verfahrensentwicklung, des Projektmanagements, der Kommunikation, der Qualitätssicherung sowie eines nutzerorientierten und flexiblen Change-Request-Managements gegangen.

6 Ausblick

Die Weiterentwicklung des NinJo-Systems erfolgt im Rahmen des internationalen NinJo-Konsortiums auf der Basis eines jährlich fortgeschriebenen Entwicklungsplanes. Die wesentlichen Entwicklungsziele werden dabei regelmäßig im Steering Committee des internationalen NinJo-Konsortiums auf Grundlage der dokumentierten Nutzeranforderungen und der strategischen Ziele der Konsortialpartner festgelegt.

Dabei wird regelmäßig zwischen gemeinsamen Entwicklungszielen die gemeinsam erfüllt werden und Zielen einzelner Konsortialpartner, die individuell umgesetzt werden, unterschieden. Die Weiterentwicklung der vielfältigen Eingangsdaten des Systems findet in der Entwicklungsplanung ebenfalls Berücksichtigung.

Der DWD plant im Rahmen seiner Strategie bis 2015 eine Zentralisierung des Wettervorhersage- und Warndienstes. Entsprechende Unterstützungsverfahren werden dafür entwickelt. Nach erfolgreicher Entwicklung und Erprobung werden diese Verfahren in NinJo integriert, so dass sie direkt im täglichen Vorhersage- und Warndienst zur Verfügung stehen.

In den kommenden Jahren nimmt im operationellen Wettervorhersagedienst weltweit der Einsatz von Ensemblevorhersagen zur weiteren Verbesserung der Qualität numerischen Wettervorhersagen zu. Diese Entwicklung bildet sich entsprechend auch im NinJo Entwicklungsplan ab. Mit der Bereitstellung eines neuen „Ensemble-Layers“ werden sich die Möglichkeiten für die Verwendung von Ensemblevorhersagen im täglichen Vorhersagedienst deutlich erweitern.

Radardaten bilden die Grundlage für eine Vielzahl von Vorhersagen und Wetterwarnungen im Nowcasting- und Kürzestfristbereich, aber auch für die Klima- und Umweltberatung. Der DWD wird bis 2012 den Radarverbund in Deutschland modernisieren und zukünftig neue Dual-Polarisationsgeräte einsetzen. Vergleichbare Entwicklungen planen auch die Konsortialpartner. Die neuen Radargeräte liefern in der Zukunft zusätzliche Variablen (Polarisationsmomente), eine höhere zeitliche und räumliche Auflösung der Daten und bessere hardwarenahe Mess- und Auswerteverfahren. Damit eröffnen sich eine Vielzahl neuer Möglichkeiten für den Einsatz in der Wettervorhersage und im Bereich der Klima- und Umweltberatung (SELTMANN 2009). Neben der Verbesserung bestehender Qualitätssicherungsverfahren (HELMERT 2008) gilt dies besonders auch für die Verbesserung bestehender Auswerteverfahren, z.B.

- Hydrometeorerkennung zur ortsbezogenen Unterscheidung von Hagel, Starkregen, Schnee auf der Basis der neuen Polarisationsdaten für den Wettervorhersagedienst und die Hydrometeorologie,
- Polarimetrische Quantifizierungsalgorithmen für hydrologische Anwendungen bzw. für den Einsatz im Warndienst,
- Verbesserte Erkennung von konvektiven Zellen bzw. Mesozyklonen durch die erhöhte Auflösung und Datenqualität,
- Erkennung von Vereisungsgefahr für die Luftfahrt,
- Erkennung von Vogelschlag für die Luftfahrt.

Die Nutzung der neuen Möglichkeiten wird unmittelbar zur Verbesserung der Leistungen in der Wettervorhersage und in den Bereichen Klimamonitoring sowie Klima- und Umweltberatung führen. Für die Nutzer des NinJo-Systems ergeben sich dabei insbesondere die Anforderungen nach einer Integration der neu entstehenden Daten und Auswerteverfahren, um von den zu erwartenden Vorteilen direkt im Arbeitsprozess zu profitieren.

Grundsätzlich werden alle Änderungsanforderungen der NinJo-Nutzer in einem Change-Request-Management-System (Jira) online dokumentiert und geplant. Jeder Änderungswunsch erhält dabei eine eindeutige Identifikationsnummer und wird auf Grundlage der

Informationen über Zielsetzung, Zweck, Aufwand und Priorität bewertet und umgesetzt. Dazu finden auch in Zukunft regelmäßig internationale Workshops statt, auf denen sowohl Vertreter des Entwicklungsteams als auch Nutzervertreter die weitere Planung vorbereiten. Die endgültige Entscheidung über den jeweils aktuellen Entwicklungsplan wird abschließend vom Steering Committee des NinJo-Konsortiums getroffen, auch unter Berücksichtigung der voraussichtlich zur Verfügung stehenden Ressourcen.

Für die Jahre 2010-2013 wurden u.a. folgende Themen in den Entwicklungsplan aufgenommen:

- Anpassung von NinJo an veränderte Datenformate (z.B. BUFR, GRIB2),
- Weiterentwicklung aller vorhandenen Layer nach den priorisierten Nutzeranforderungen,
- Entwicklung eines „Ensemble-Layers“ zur Integration von Ensemblevorhersagen verschiedenerNWV-Systeme,
- Weiterentwicklung der Komponenten zur Produktion von Wettervorhersageprodukten (NinJo-Batch, IGE),
- Integration des Systems AutoWarn zur Unterstützung des Wetterwarndienstes,
- Integration von Dual-Polarisationsdaten und entsprechender Auswerteverfahren, z.B. zur Hydrometeorerkennung oder zur Niederschlagsquantifizierung,
- Erweiterung des Radar-Layers um eine „Cell-View-Funktionalität“ (JOE 2004) mit automatisierten Querschnitten durch signifikante konvektive Zellen,
- Bereitstellung einer Schnittstelle für OGC-konforme Webservices,
- Erweiterte Datenanbindung an externe Datenbanken und Archive.

Ein wesentliches Ziel für die Weiterentwicklung des NinJo-Systems wird entsprechend der strategischen Ziele aller beteiligten Konsortialpartner auch in Zukunft die Verbesserung der Qualität des Wettervorhersage- und Warndienstes bleiben.

Literatur

BANSE, D. F., HEIZENREDER, D., HAUCKE, S., 2009: Nutzerhandbuch NinJo 1.3. Unveröffentlichtes Dokument des NinJo-Konsortiums, Potsdam, 2. überarbeitete Auflage.

HEIZENREDER, D., 1999: Meteorological Workstation Systems at DWD. Proceedings of the International Workshop on Graphical Interaction with Gridded Fields, Helsinki, 46-49.

HEIZENREDER, D., 2000: Gemeinsames Grafisches Visualisierungs- und Produktionssystem des Deutschen Wetterdienstes und des Geophysikalischen Beratungsdienstes der Bundeswehr. Pflichtenheft, Deutscher Wetterdienst, internes Projektdokument.

HEIZENREDER, D., KOPPERT, H.-J., 2005: NinJo - A Meteorological Workstation of the Future. The European Forecaster **10**, 23-28.

HELMERT, K., HENGSTEBECK, T., SELTMANN, J., 2008: DWD's operational tool to enhance radar data quality. 2008 ERAD Conf., Helsinki, Finnland, 30 June - 4 July 2008.

JOE, P., KOPPERT, H.-J., HEIZENREDER, D., ERBSHÄUSSER, B., RAATZ, W., REICHERT, B., ROHN, M., 2005: Severe Weather Forecasting Tools in the NinJo Workstation. International Symposium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting, Toulouse, 128-134.

JOE, P., BURGESS, D., POTTS, R., KEENAN, T., STUMPF, G., TRELOAR, A., 2004: The S2K Severe Weather Detection Algorithms and Their Performance. Weather and Forecastin **19**, 1, 43–63.

JOE, P., FALLA, M., VAN RIJN, P., STAMADIANOS, L., FALLA, T., MAGOSSE, D., ING, L., DOBSON, J., 2003: Radar Data Processing for Severe Weather in the National Radar Project of Canada. 21st Conf. SELS, San Antonio, TX, AMS, 221–224.

KOPPERT, H.-J., 2002: A Java Based Meteorological Workstation, 18th International Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography and Hydrography, AMS, 307–310.

KOPPERT, H. K., PEDERSON, T. B., ZUERCHER, B., JOE, P., 2004: How to Make an International Workstation Successful, AMS, 20th IIPS, Seattle, WA, paper 11.1, 6 pp.

KUSCH, W., KOPPERT, H.-J., POGODA, M.,1994: The Meteorological Application and Presentation System (MAP) of Deutscher Wetterdienst (DWD). 10. International Conference on Interactive Information an Processing Systems for Meteorology, Oceanography and Hydrology, AMS, 200-203.

LANG, P., 2001: Cell Tracking and Warning Indicators Derived from Operational Radar Products, AMS, 30th radar conference, Munich, Germany, 245–247.

LAPCZAK, S., ALDCROFT, E., STANLEY JONES, M., SCOTT, J., JOE, P., VAN RIJN, P., FALLA, M., GAGNE, A., FORD, P., REYNOLDS, K., HUDAK, D., 1999: The Canadian National Radar Project, 29th AMS Radar Conf, Montreal, CA, AMS, 327–330.

REICHERT, B. K., PALMER, Z., WEISER, C., TRÄGER, C., 2005: AutoMON - The Automatic Monitoring and Alerting System for Significant Weather Events in the Meteorological Workstation NinJo, Proc. European Working Group on Operational Workstations (EGOWS) 21-24 June 2005, UK MetOffice, Exeter, Great Britain, 1-6.

REICHERT, B. K., TRÄGER C., ASMUS J., 2004: Automatic Monitoring of NWP Fields Using Synthetic Satellite Images. EUMETSAT Meteorol. Sat. Conf., EUMETSAT, Darmstadt, Germany, 371-376.

SELTMANN, J., 2009: Neue Möglichkeiten des neuen Radarverbundes, Fachtag des DWD, Offenbach, 22.10.2009.

SCHREIBER, K. J., 2001: A Review of Operational Weather Radar Networking in Germany - Products and Applications, AMS, 30th Radar Conf., Munich, 68–70.

ZIRNIC D.S., BURGESS D.W., HENNINGTON, L.D., 1985: Automatic Detection of Mesocyclonic Shear with Doppler Radar. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology **2**, 4, 425–438.

Abkürzungen

AutoMon	Automatisches Monitoring
AutoWarn	Automatische Unterstützung der Herausgabe von Wetterwarnungen
AutoSWIS	Automatisierte Datenerstellung für SWIS
Bft	Beaufort (Windstärke)
BWER	Bounded Weak Echo Region
BUFR	Binary Universal Form for the Representation of Meteorological Data
CAPE	Convective Available Potential Energy
CD	Chefdesigner
CORBA	Common Object Request Broker Architecture
COSMO	Consortium for Small-scale Modeling
COSMO-DE	Lokale Version des COSMO-Modells mit expliziter Konvektion
dBz	Dezibel
EPM	Edition, Produktion und Monitoring von Warnungen
GeophysBDBw	Geophysikalischer Beratungsdienst der Bundeswehr
GGS	Gemeinsames Grafisches System
GME	Global Model Extended - 4.Genration des Globalen Modells des DWD
GRIB2	Gridded Binary Version 2
GUI	Grafisches Userinterface
IGE	Interaktiver Grafischer Editor
MAP	Meteorologisches Applikations- und Präsentationssystem
MVC	Model View Controler (Entwurfsmuster für Java Software)
NUG	NinJo User Group
NWV	Numerische Wettervorhersage
OGC	Open Geospatial Consortium
OOG	Objektiv Optimierte Guidance
PAC	Presentation Abstraction Control (Entwurfsmuster für Java Software)
SCIT	Storm Cell Identification and Tracking System
SigWx	Signifikant Weather Chart
SWIS	Straßenzustands- und Wetterinformationssystem
XML	Extensible Markup Language

promet, Jahrg. 35, Nr. 1-3, 70-77
© Deutscher Wetterdienst 2010

A. WALTER, S. TREPTE, R. THEHOS

9 Statistische Vorhersage- und Warnverfahren: MOS-MIX, WarnMOS, BlitzMOS und CellMOS

Statistical Prediction- and Warningmethods: MOS-MIX, WarnMOS, BlitzMOS and CellMOS

Zusammenfassung
Numerische Wettervorhersagemodelle (NWP) sind heutzutage in der Lage, das allgemeine Zirkulationsmuster der Atmosphäre für ungefähr eine Woche mit signifikanter Qualität zu simulieren. Dabei werden auch bestimmte Wetterelemente, die von Beobachtungsstationen gemessen und registriert werden, wie z.B. Temperatur, Wind oder Niederschlag, vom Modell ausgegeben und vorhergesagt, teils durch entsprechende Parametrisierungen. Die Qualität dieser Simulationen unter physikalischer Betrachtung ist stark abhängig vom genauen Ort, dem betrachteten Element, der Jahreszeit und der allgemeinen Wettersituation. Die Bandbreite reicht von sehr guter Qualität über systematische Fehler bis hin zu für den Nutzer gegebenenfalls unbrauchbaren Vorhersagen. Statistische Verfahren bieten ein intelligentes Feedback zwischen diesen numerischen Simulationen und den Messungen bzw. Beobachtungen. Sie sind in der Lage, systematische Fehler aus dem Direct Modell Output (DMO) herauszufiltern. Darüber hinaus führen weitere Eingangsvariablen neben dem DMO auch dann zu guten Ergebnissen, wenn der DMO nur eine schlechte Qualität besitzt. Model Output Statistics (MOS) ist ein solches statistisches Post-Processing Verfahren und wird routinemäßig beim DWD betrieben. MOS basiert auf selektiven linearen Regressionsgleichungen und die erhaltenen Korrelationen beschreiben die bestmögliche Prediktor-Prediktand[1] Beziehung, wobei neben dem DMO auch Beobachtungs- und Fernerkundungsdaten genutzt werden.

Abstract
Numerical Weather Prediction Models (NWP) are capable of forecasting circulation patterns of the atmosphere with a significant quality for up to one week. Thereby certain observable variables, such as temperature, wind or precipitation, are forecasted by the model itself, partly as corresponding parametrizations. The quality of these forecasts strongly depends on the specific location, the element of interest, the season and the larger scale weather situation. The spread of quality typically reaches from very good quality to unusable forecasts. Statistical algorithms provide an intelligent coupling between numerical simulations and actual observations and are capable to detect and correct systematic wrong direct model output (DMO) forecasts. Furthermore, additional input variables into these algorithms may lead to increasing forecasts even if the DMO is of poor quality. Model Output Statistics (MOS) is such a powerful statistical post-processing algorithm and is operated routinely at DWD. MOS is based on stepwise linear regression and the obtained correlations are exploited to obtain the best possible predictor-predictand relationship, where the DMO may only serve as one potential predictor beside SYNOP- and remote sensing data.

1 Einleitung

Numerische Wettervorhersagemodelle (NWP-Modelle, **N**umerical **W**eather **P**rediction) berechnen den zukünftigen Zustand der Atmosphäre zu bestimmten Zeitpunkten, indem sie den auf Basis von vielfältigen Messungen ermittelten atmosphärischen Ist-Zustand durch Lösen der atmosphärischen Gleichungen für spätere Zeitpunkte prognostizieren. Diese Prognosen werden für so genannte Gitterpunkte erstellt, mit denen die Erde im Modell netzartig überzogen wird. Die Qualität der Prognosen, besonders für Bodenparameter, nimmt mit zunehmendem räumlichen Abstand dieser Gitterpunkte ab: ein großer Abstand bedingt lokale Ungenauigkeiten, ein feinmaschiges Gitter bietet die Möglichkeit einer feineren regionalen Auflösung.

NWP-Modelle, wie beispielsweise das GME-Modell des Deutschen Wetterdienstes (MAJEWSKI et al. 2000; MAJEWSKI et al. 2002), oder das Vorhersagemodell des **E**uropäischen **Z**entrums für **m**ittelfristige **W**ettervorhersagen (EZMW)[2] arbeiten mit einem horizontalen Gitterpunktsabstand von etwa 30 km beziehungsweise 16 km. Dies ist ausreichend, um den zukünftigen Zustand der höheren Atmosphäre gut zu beschreiben, die Prognose von Bodenparametern für bestimmte Orte hingegen ist teilweise zu ungenau für den täglichen Gebrauch. Dies gilt besonders dann, wenn eine räumlich und zeitlich stark variierende Variable (z.B. 10 m-Windgeschwindigkeit) in orografisch stark gegliedertem Gelände betrachtet wird. Zudem besitzen NWP-Modelle weitere Schwächen:

- NWP-Modelle vereinfachen die Gegebenheiten am Boden dadurch, dass die Erdoberfläche als ein Netz von Gitterpunkten interpretiert wird, auf dem die Vorhersagen gültig sind. Demzufolge werden kleinräumige Effekte (z.B. topographische Besonderheiten, kleine Wassermassen, u.a.), die für das lokale Wetter an einem Ort von Bedeutung sind, vernachlässigt. Zudem müssen Variablen oder Punkte, für die Vorhersagen erwünscht sind, nicht explizit im NWP-Modell repräsentiert sein.
- NWP-Modelle sind nicht perfekt und ihre Vorhersagen daher – verglichen mit Beobachtungsdaten – auch mit Fehlern behaftet. Soweit es sich hierbei um systematische Fehler handelt, können auf NWP-Vorhersagen basierende statistische Nachbearbeitungen diese Fehler erfassen und eventuell korrigieren.
- Vorhersagen von NWP-Modellen sind deterministisch. Das heißt, obwohl der zukünftige Zustand der Atmosphäre inhärent unsicher ist, kann durch ein NWP-Modell, bei einem vorgegeben Satz initialer Bedingungen, nur eine Vorhersage erzeugt werden. Die Kombination von NWP Vorhersagen mit statistischen Verfahren erlaubt hingegen die Quantifizierung von Ungenauigkeiten. Insbesondere ist es möglich, statistische Wahrscheinlichkeitsvorhersagen zu generieren.

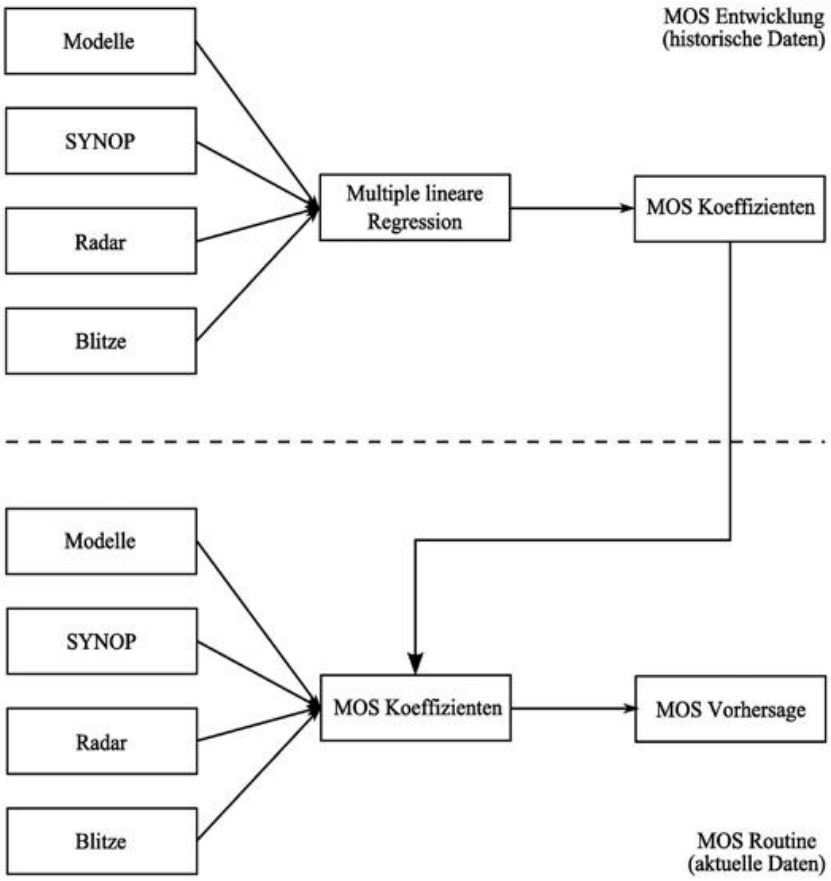


Abb. 9-1: Darstellung der Unterschiede zwischen MOS-Entwicklung und MOS-Routine. Zu beachten ist, das während der Entwicklung historische Daten verwendet werden um die MOS-Koeffizienten zu bestimmen, während im Routinebetrieb aktuelle Daten mit den MOS-Koeffizienten korrigiert werden.

MOS-Verfahren (**M**odel **O**utput **S**tatistics; GLAHN und LOWRY 1972, CARTER et al. 1989) können dazu benutzt werden, die direkten Vorhersagen von NWP-Modellen (DMO, **D**irect **M**odel **O**utput) anhand vorher ermittelter statistischer Beziehungen zwischen DMO und langen historischen Messwertsreihen und historischen Modellergebnissen dahingehend zu modifizieren, dass lediglich eine geringstmögliche Abweichung zu aktuellen Beobachtungswerten verbleibt. Im Allgemeinen werden dabei mittels **m**ultipler **l**inearer **R**egression (MLR) diejenigen Parameter (Prediktoren) aus einem langen Datensatz historischer Beobachtungs- und Modelldaten selektiert, welche signifikant dazu beitragen, Variabilität in den interessierenden Parametern (Prediktanden) zu erklären.

2 Model Output Statistics (MOS)

Die Kernaufgabe der MOS-Verfahren liegt darin, statistische Beziehungen zwischen Prediktanden, meist Messungen eines atmosphärischen Zustandes am Boden und/oder in der Höhe, und dem DMO eines NWP-Modells zu einem bestimmten Vorhersagezeitschritt zu bestimmen (statistisches Post-processing). Es wird also die zu einer bestimmten meteorologischen Situation gehörende Statistik des NWP-Modells ermittelt. Ist beispielsweise bekannt, welcher Bodenwind an einem Punkt am wahrscheinlichsten ist, wenn ein Modell für diesen Punkt einen bestimmten Wind in 850 hPa prognostiziert, so kann diese Relation mit Hilfe statistischer Algorithmen quantifiziert werden und hieraus der Bodenwind abgeleitet werden.

Zu diesem Zweck liegen sowohl NWP Vorhersagen des GME und des EZMW-Modells, als auch Beobachtungszeitreihen von SYNOP-Stationen, Blitz- und Radarbeobachtungen über mehrere Jahre archiviert vor. Anhand dieser Datensätze werden in einer sogenannten Entwicklungsphase mit Hilfe einer selektiven Regression Prediktoren nach Signifikanzkriterien selektiert und in einer multiplen linearen Regressionsgleichung implementiert, die dann einen bestmöglichen linearen statistischen Zusammenhang zwischen Prediktoren und Prediktanden beschreibt. Die so erhaltenen Regressionsgleichungen werden operationell mit aktuellen Beobachtungsdaten und Modellvorhersagen betrieben und liefern so eine statistisch korrigierte aktuelle Vorhersage, siehe Abb. 9-1. Um mit zunehmender Länge des Vorhersagezeitraums des NWP-Modells nicht Prognosen von geringerer Qualität als das entsprechende Klimamittel zu erhalten, wird dann tendenziell immer stärker das klimatologische Signal ausgegeben und die stark fehlerhaften Prediktoren des Modells immer stärker vernachlässigt. Am Ende des

Vorhersagezeitraums erhält man schließlich den klimatologischen Erwartungswert.

2.1 Multiple Lineare Regression

Die **m**ultiple **l**ineare **R**egression (MLR) bezieht eine abhängige Variable Y, den Prediktand, auf einen Satz n unabhängiger Variablen X_i, die Prediktoren. Das Resultat ist eine Gleichung zur Schätzung des Prediktanden als Linearkombination der Prediktoren

$$\hat{Y} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + ... + a_n X_n \,. \tag{1}$$

Die a_n sind hierbei die Regressionskoeffizienten, die so bestimmt werden, dass die Summe der quadratischen Schätzfehler einen minimalen Wert annimmt,

$$\sum_{j=1}^{n} (y_j - \hat{y}_j)^2 = MIN \,. \tag{2}$$

Ein Maß für die Güte einer Schätzung gemäß Gleichung 1 ist die **R**eduktion der **V**arianz (RV)

$$RV = \frac{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(y_j - \bar{y}_j)^2 - \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(y_j - \hat{y}_j)^2}{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(y_j - \bar{y}_j)^2} \,. \tag{3}$$

Gleichung 3 ist der Anteil der Variation von Y um den Mittelwert $\bar{Y}$ normiert durch die Varianz

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(y_j - \bar{y})^2 \tag{4}$$

der durch die Regressionsbeziehung (Gleichung 1) erklärt werden kann. Aus den Gleichungen (1) bis (4) ist ersichtlich, dass eine Verminderung der quadratischen Summe der Schätzfehler gleichbedeutend ist mit einer Reduktion der Varianz RV und somit einer Minimierung der mittleren quadratischen Fehlers (RMSE)

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(y_j - \hat{y}_j)^2\right]^{\frac{1}{2}} \,. \tag{5}$$

Eine Technik um einen bestmöglichen Satz von Prediktoren (X_n in Gleichung 1) zur Beschreibung des Prediktanden auszuwählen wird als schrittweise (engl. „stepwise") oder auch selektive Regression bezeichnet (HOCKING 1976, von STORCH und ZWIERS 1999).

Hierbei wird aus einem Pool potentieller Variablen[3] mit einer historischen Verfügbarkeit von mindestens 5 Jahren, diejenige Variable ausgewählt, die zum Prediktanden die höchste Korrelation aufweist. Diese Variable erklärt somit die meiste Varianz des Prediktanden. In einem zweiten Schritt wird dann diejenige Variable bestimmt, welche die höchste Korrelation zum unerklärten Rest (Residuum) aufweist. Die Auswahl von Variablen (Prediktoren) wird so lange fortgesetzt, bis ein bestimmtes Signifikanzkriterium nicht mehr erfüllt wird. Auf diese Art wird für alle in Frage kommenden Stationen und alle Variablen zu jedem Vorhersagezeitpunkt jeweils eine bestmögliche Regressionsbeziehung gefunden. Dieses setzt jedoch sowohl unveränderte Messvorschriften als auch konstante Modellversionen voraus, ansonsten müssen Änderungen bei den regelmäßig stattfindenden Neuentwicklungen der Regressionsbeziehungen berücksichtigt werden.

3 MOS-Systeme im DWD

Der DWD betreibt im Routinebetrieb ein weitestgehend von der Firma Meteo Service Weather Research GmbH[4] entwickeltes System von MOS-Verfahren.

Die Verfahren GME-MOS und EZMW-MOS basieren auf dem DMO dieser beiden NWP-Modelle und werden im Verfahren MOS-MIX gewichtet kombiniert. Diese Kombination bietet zum einen den Vorteil, dass eventuelle Fehlprognosen eines der beiden Modelle „gedämpft" werden, zum anderen kann auf diese Weise auch ein Ausfall eines der beiden Modelle kompensiert werden. Wie bei der Ensemblevorhersagetechnik liefert schon eine einfache Mittelung der Vorhersagen im Mittel bessere Ergebnisse als jedes der Einzelmodelle. Die einzelnen Verfahren werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Der Zusammenhang bestimmter Prediktoren zum Prediktanden weist einen deutlichen Jahresgang auf. Dieser Jahresgang wird durch eine Klassifikation der eingehenden Datensätze berücksichtigt: sie werden in Sommer- und Winterhalbjahr, bei manchen Anwendungen in vier Jahreszeiten aufgeteilt. Um ein plötzliches Umschalten zwischen den Jahreszeiten zu vermeiden wird auch hier linear interpoliert. Die bei der Aufteilung in verschiedene Jahreszeiten gewonnene Homogenität führt jedoch zu einem reduzierten Umfang an klassifizierbaren Datensätzen. Da die primäre Ursache für die jahreszeitliche Instationarität der Regressionskoeffizienten in der sich über das Jahr ändernden Strahlungsbilanz zu suchen ist, wird die Abhängigkeit der Koeffizienten von der Jahreszeit mittels einer harmonischen Funktion beschrieben. Dazu kann ein Jahr in beispielsweise 36 Dekaden aufgeteilt werden, für die lineare Korrelationskoeffizienten mittels selektiver Regression (Abschnitt 2) bestimmt werden. Diese Korrelationskoeffizienten werden dann einer harmonischen Analyse unterzogen und ihr geglätteter Jahresgang anschließend mit Sinus- und Cosinus-Funktionen approximiert. An Stelle der Original-Prediktoren werden dann in der Regressionsbeziehung die mit dem am jeweiligen Tag gültigen Regressionskoeffizienten gewichteten Prediktoren verwendet.

Als weitere Prediktorengruppe sind Persistenzprediktoren ein wichtiger Bestandteil des MOS-Systems. Be-

sonders im Nowcast- und Kürzestfristbereich führen persistenzdominierte Regressionsgleichungen zu guten Ergebnissen (LEYENDECKER 2007). Typischerweise werden Persistenzprediktoren der letzten drei Stunden sowie der entsprechende Vortagswert (-24 Stunden) verwendet.

Zur Vorhersage von Überschreitungswahrscheinlichkeiten bestimmter Schwellenwerte, eine wesentliche Aufgabe der MOS-Systeme, werden die Abhängigkeiten der Wahrscheinlichkeitsprediktanden vom Prediktanden auf dem der Schwellenwert definiert ist, durch geglättete Stufenfunktionen beschrieben (HOFFMANN 2008). Ein Satz entsprechend transformierter Prediktoren wird ebenfalls dem Regressionsalgorithmus verfügbar gemacht (ARRIT und FRANK 1985).

Neben diesen auf Grund physikalischer Plausibilitätsbetrachtungen transformierten Prediktoren, werden dem Regressionsalgorithmus zudem empirisch transformierte Prediktoren[5] angeboten. Für stationsbezogene Beobachtungen als auch für Fernerkundungsdaten werden sogenannte Advektions-Prediktoren bereitgestellt (HOFFMANN 2008). Dabei wird ausgenutzt, dass um den Vorhersageort gelegene andere Beobachtungsstationen bzw. zeitlich und räumlich dicht vorliegende Fernerkundungsdaten (z.B. Niederschlag) oft sehr wertvolle prognostische Information liefern, wenn es sich um Prediktanden handelt, die sich während der Advektion nur wenig verändern. Mit Hilfe des Modellwindes wird dazu, ausgehend vom Vorhersageort, eine Rückwärtstrajektorie gerechnet um den Ursprungsort der Advektion festzulegen. Weiterhin kommen binäre Funktionen als Prediktoren zum Einsatz, die beispielsweise Diskontinuitäten in einer Modelldatenreihe, etwa durch den Wechsel einer Modellversion, abfangen sollen.

3.1 MOS-MIX

Die Basis des MOS-Systems beim Deutschen Wetterdienst bilden die GME- und die EZMW-MOS-Vorhersagen. Das GME-MOS basiert auf dem jeweils aktuellen DMO des GME-Modells (0 und 12 UTC) und das EZMW-MOS basiert auf dem 12 UTC-Modelllauf des EZMW-IFS.

MOS-MIX (HAALMAN 200la) liefert auf Basis dieser Einzelmodell-MOS-Systeme Vorhersagen, wobei eine vom Prediktanden, vom Vorhersagezeitpunkt und von der Jahreszeit abhängige gewichtete Mittelung beider Modelle berechnet wird. Zurzeit werden Vorhersagen für mehrere Tausend Punkte weltweit bis zu einem Vorhersagzeitraum bis +168 Stunden ausgegeben.

3.2 BlitzMOS

Das **B**litz**MOS**-System (BMOS; KNÜPFFER 2001) arbeitet auf einem Gitter mit einem Gitterpunktsabstand von 0,25 x 0,375 Grad, entsprechend etwa 27 x 27 km, über Deutschland. Basierend auf Blitzortungsdaten berechnet BMOS operationell viertelstündige flächendeckende Vorhersagen der Gewitter- und Blitzwahrscheinlichkeit für Deutschland. Gewitterereignisse direkt bei einer Messstation sind relativ selten, um dennoch stabile Regressionsbeziehung zwischen Gewitterprediktanden und -prediktoren zu gewährleisten, wurde für das Verfahren ein so genannten Multi-Stations-Ansatz gewählt, bei dem Gitterpunkte mit ähnlichen topographischen und regionalen Eigenschaften zu Clustern von 20 bis 30 Gitterpunkten zusammengefasst werden. Durch diese breitere Datenbasis - es resultiert die 20- bis 30-fache Fallzahl pro Regression - ist gewährleistet, dass belastbare Regressionsbeziehungen gefunden werden und diese Beziehungen auch für seltene Ereignisse stabil sind.

Da Blitzortungsdaten, im Gegensatz zu den in anderen MOS-Verfahren genutzten Daten, unregelmäßig in Zeit und Raum verteilt sind, müssen diese Daten möglichst ohne Informationsverlust in Gitterpunktswerte transformiert und geeignete Prediktanden für die Kürzestfrist- und Kurzfristvorhersage definiert werden. Für einen Vorhersagezeitraum bis zu zwei Stunden sind bei BMOS-Advektionsprediktoren der Blitzortungsdaten, etwa gemäß des Modellwindes in 500 hPa, dominant. Ab einer Vorhersagezeit von sechs Stunden werden diese in ihrer Relevanz zunehmend von weiteren Modellprediktoren abgelöst. Die Persistenz der Blitzortungsdaten ist lediglich innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne von Relevanz (HOFFMANN 2008).

3.3 RadarMOS

Analog zum bestehenden BMOS-Verfahren wurde ein MOS-Verfahren zur Vorhersage von Radarreflektivitäten und daraus ableitbaren Parametern durch die Firma Meteo Service entwickelt. Der RadarMOS-Algorithmus basiert ebenfalls auf Gitterpunkten und hat das Ziel neben Vorhersagen für Radarreflektivitäten auch die damit einher gehenden Wahrscheinlichkeiten für das Überschreiten bestimmter Warnkriterien im Kürzestfristbereich zu generieren. Die Prediktanden werden aus Datensätzen des Radarverbundsystems des DWD definiert. RadarMOS wurde, wie auch BMOS, als unterstützendes System für Folgesysteme wie WarnMOS konzipiert und stellt beim DWD kein eigenständiges MOS-System mehr dar.

RadarMOS und BMOS sind in das Verfahren WarnMOS integriert (siehe Kapitel 3.5)

3.4 CellMOS

Durch den dem CellMOS-Verfahren zu Grunde liegende Ansatz der Einbeziehung von Fernerkundungsdaten (Radar, Blitzortungssysteme, Doppler-Verfahren) in die klassischen MOS-Algorithmen soll eine möglichst realis-

tische Vorhersage der Zugbahn und Eigenschaften von - zumeist kleinräumigen und kurzlebigen - Gewitterzellen erreicht werden (HOFFMANN 2008). Somit kann ein wesentliches Problem traditioneller MOS-Systeme in Bezug auf die Vorhersage von Gewitterzellen – das hierfür zu dünne Beobachtungsnetz - umgangen werden. Durch den hier vollzogenen Übergang zum Lagrangeschen Bezugssystem werden einzelne Gewitterzellen selbst zu Objekten der Regression, d.h. es werden Prediktanden für jede im Untersuchungsgebiet geortete Zelle abgeleitet und entsprechende Prediktoren aus Modell, Persistenz etc. für den aktuellen Ort der Zelle berechnet. Neben den genannten Fernerkundungsdaten gehen in CellMOS die GME-Modelldaten ein. Aus der Regression resultieren Gleichungen, die zur Vorhersage individueller Zelleigenschaften (Ort und Form, Verlagerung und Warnparameter) genutzt werden können.

Aus dem Deutschland-Komposit-Radarbild sowie Blitzortungsdaten werden bei CellMOS in einem ersten Schritt die aktuelle Position und Eigenschaften individueller Gewitterzellen bestimmt. Da zur Prognose von Veränderungen der Zelleigenschaften - insbesondere der Zugbahn - die Zelltrajektorien bekannt sein müssen, werden in einem Zelltracking-Algorithmus die erkannten Zellorte zweier aufeinander folgender Radarbilder einander zugeordnet. Hierzu können unter anderem die Korrelation der Radarpixel, der 700 hPa-Modellwind, Advektionsparameter aus BMOS und Persistenzen bezüglich der Verlagerungseigenschaften herangezogen werden.

Für CellMOS werden Vorhersagegleichungen für die verschiedenen Jahreszeiten entwickelt, wobei zu beachten ist, dass die zu Grunde liegenden Ereignisse über das Jahr inhomogen verteilt sind. Zur Berücksichtigung regionaler Besonderheiten beim Zellverhalten wird das Untersuchungsgebiet in zwölf verschiede Gebiete über Deutschland aufgeteilt und individuelle Regressionsbeziehungen für diese berechnet. Zu jeder vollen Stunde werden neue, dem Tagesgang angepasste, Regressionskoeffizienten verwendet. Für eine detaillierte Darstellung des CellMOS-Verfahrens sei hier auf (HOFFMANN 2008) verwiesen.

3.5 WarnMOS

Ziel von WarnMOS ist es, einen aktuellen und vorhergesagten Warnzustand für alle deutschen Landkreise für die 27 vom DWD definierten Warn- bzw. Unwetterkriterien[6] zu erzeugen um dem Meteorologen im Warndienst eine objektive Entscheidungshilfe zur Verfügung zu stellen. Dieser Warnzustand dient zudem als wesentlicher Input in das automatisierte Warnverfahren AutoWARN des DWD, siehe hierzu den entsprechenden Beitrag in diesem Heft. Neben Synopbeobachtungen, Blitzortungs- und Radardatensätzen sowie CellMOS-Resultaten gehen in WarnMOS die NWP-Daten vom GME- und EZMW-Modell ein, so dass im engeren Sinn von WarnMOS-MIX gesprochen werden kann. Die meisten WarnMOS-Prediktanden sind probabilistischer Natur. Für diese Prediktanden wird auf eine Transformationstechnik zurückgegriffen, welche Fernerkundungsdaten mit Hilfe einer geglätteten Stufenfunktion in probabilistische Werte umwandelt (HOFFMANN 2008).

Ein wichtiger Teil des WarnMOS ist die sogenannte Verdichtung: die Reduktion der etwa 150 von WarnMOS generierten Prediktanden auf 27, den DWD-Warnkriterien entsprechenden probabilistische Prediktanden, welche die Wahrscheinlichkeit zur Überschreitung bestimmter warnrelevanter Schwellenwerte in bestimmten Bezugszeiträumen angeben. Bei der Bestimmung dieser landkreisbezogenen Überschreitungswahrscheinlichkeiten ist der Übergang von Punktwahrscheinlichkeiten zu den gewünschten Flächenwahrscheinlichkeiten für Landkreise zu vollziehen. Dabei wird eine repräsentative Station für jeden Landkreis bestimmt an Hand derer Vorhersagen dann auf die Vorhersagewerte für den entsprechenden Landkreis geschlossen werden kann[7].

Im operationellen Betrieb wird WarnMOS viertelstündlich betrieben, wobei zu jeder vollen Stunde eine Vorhersage bis 24 Stunden gerechnet wird. Zu den Zwischenterminen werden -unter Verwendung aktueller Blitz- und Radardaten - Vorhersagen bis 6 Stunden erstellt. Dreimal täglich (4, 16 und 21 UTC) wird eine Vorhersage bis 168 Stunden berechnet, wobei jeweils die aktuellen Modellergebnisse des GME und des EZMW eingehen.

4 Operationeller Betrieb der MOS-Systeme im DWD

In Abb. 9-2 sind alle MOS-Systeme des DWD dargestellt. Die operationelle Post-Processing-Routine des DWD beinhaltet neben denen in Kapitel 3 beschriebenen MOS-Verfahren zudem das Verfahren AutoTAF (**T**erminal **A**erodrome **F**orecast), eine durch ICAO-Richtlinien, international normierte Flugwetterprognose für ein(en) bestimmten(s) Flugfeld, -platz oder -hafen (HAALMAN

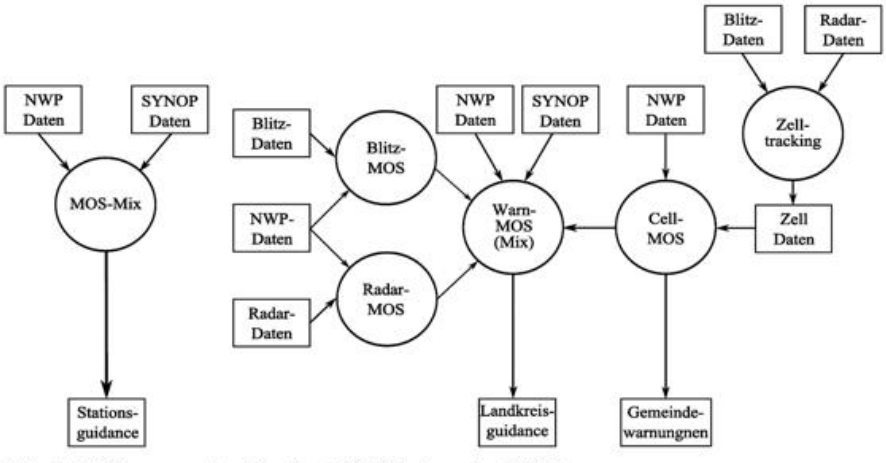


Abb. 9-2: Diagramm des Routine-MOS-Systems im DWD.

2001b). Dieses Verfahren, auf das hier nicht weiter eingegangen werden soll, ist ebenfalls zu den MOS-Verfahren auf Stationsbasis zu rechnen.

Die zeitliche Abfolge der in der Routine laufenden MOS-Verfahren ist in Abb. 9-3 skizziert. WarnMOS liefert zu jeder vollen Stunde eine 24-stündige und alle 15 Minuten eine 6-stündige Prognose. Dazu kommen die langen Läufe bis +168 Stunden um 4, 16 und 21 UTC. Das Verfahren CellMOS (Kapitel 3.4) liefert konstant alle 5 Minuten eine zweistündige Vorhersage der detektierten Gewitterzellen. Ein TAF wird jeweils 15 Minuten nach der vollen Stunde mit einer Gültigkeitsdauer von 30 Stunden erstellt. MOS-MIX-Läufe werden um 0, 1, 3, 4, 15 und 16 Uhr gestartet und liefern Vorhersagen bis 78 bzw. 168 Stunden. Das Verfahren BlitzMOS läuft alle 15 Minuten und liefert statistische Vorhersagen der Blitzaktivität für die nächsten drei Stunden. Auf Grund der großen Zahl von Prediktanden, Stationen und Verfahren können hier nur einige ausgewählte Resultate der MOS-Verfahren dargestellt werden.

In Abb. 9-4 ist beispielhaft der Verlauf des RMSE (Gleichung 5) in Bezug auf den Entwicklungszeitraum aus MOS-MIX für die 2 m-Temperatur der beiden Stationen Helgoland (oben) und Zugspitze (unten) in Abhängigkeit von der Vorhersagedauer für jede Jahreszeit dargestellt. In beiden Fällen wurden im Entwicklungszeitraum ca. 3450 Fälle zur Bestimmung der Regression genutzt.
Zunächst ist festzuhalten, dass der RMSE an der Station Helgoland generell niedriger ausfällt als auf der Zugspitze, was durch die geringere Variabilität der 2 m-Temperatur auf Grund der dämpfenden Wirkung der Nordsee

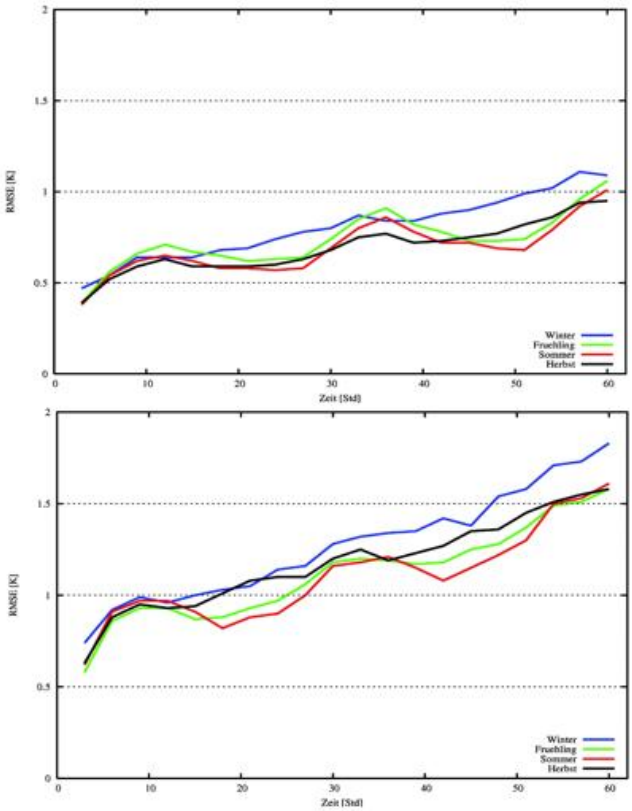


Abb. 9-4: Root Mean Square-Fehler der 2 Meter-Temperatur von MOS-MIX für die Stationen Helgoland (oben) und Zugspitze (unten) in Abhängigkeit von der Jahres- und Vorhersagezeit.

erklärt werden kann. Generell kann bei dieser Variablen eine Zunahme des RMSE von küstennahen zu eher kontinental geprägten beziehungsweise exponierten Stationen beobachtet werden.

Weiterhin fällt auf, dass an beiden Stationen der RMSE im Winter am höchsten ist, was auf die höhere Variabilität und damit verbundene komplexere Struktur der Regressionsbeziehung, der bodennahen Temperatur während des Winters zurückzuführen ist, die von einem linearen Verfahren nur teilweise reproduziert werden kann. Die besten Vorhersagen werden an beiden Stationen demzufolge im Sommer erzielt.

Die Zunahme des RMSE mit zunehmender Vorhersagezeit ist generell sowohl der zunehmenden Unsicherheit der eingehenden Modelldaten als auch des immer stärker Einflusses von Nicht-Linearitäten geschuldet, da Persistenzprediktoren mit zunehmender Vorhersagezeit zusehends an Gewicht verlieren. Vor allem an der Zugspitze nimmt der RMSE innerhalb der ersten sechs Vorhersagestunden stark zu.
Abb. 9-5 illustriert beispielhaft den Quotienten der Gewichtung der eingehenden Modelle GME und EZMW in Abhängigkeit von der Jahreszeit (Rot: Winter, grün: Frühling, blau: Sommer und pink: Herbst) mit zunehmender Vor-

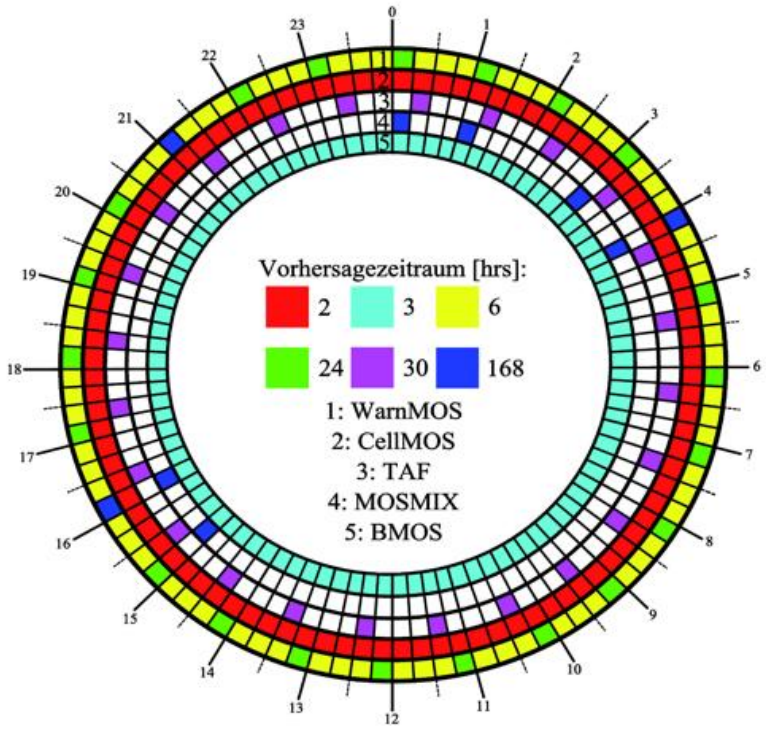


Abb. 9-3: Zeitlicher Ablauf der operationellen MOS-Verfahren in der Routine des DWD. Details siehe Text. Zeitangaben in MEZ.

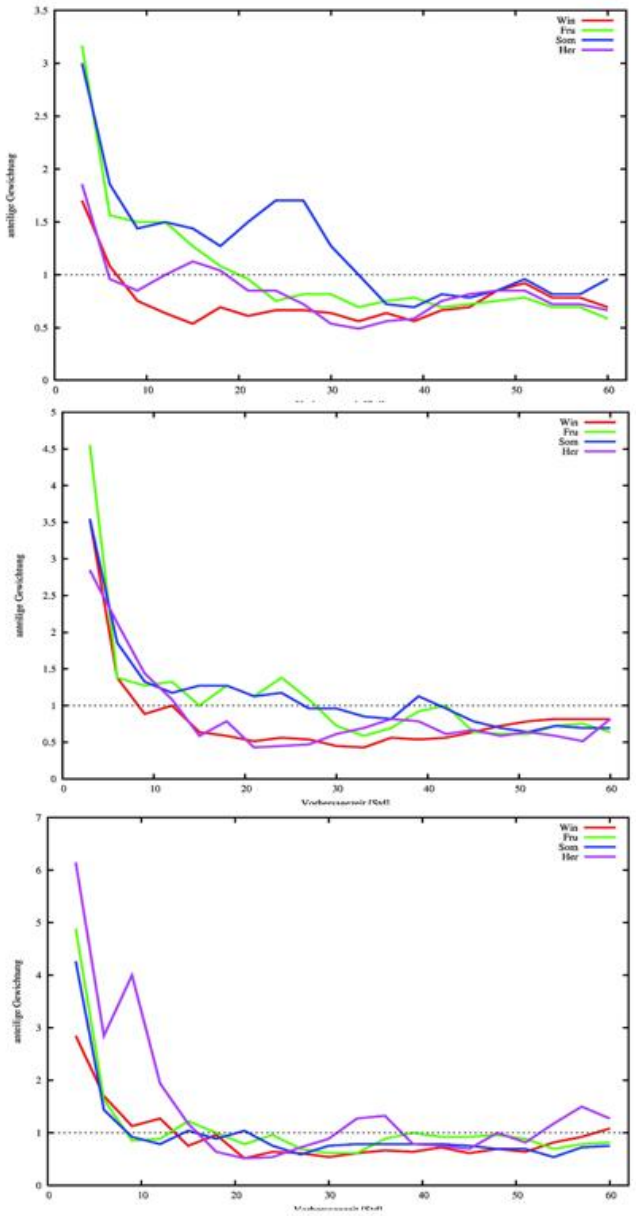


Abb. 9-5: Verlauf der Quotienten der Modellgewichtung GME zu EZMW an den Stationen Helgoland (oben), Brocken (Mitte) und Zugspitze (unten) für MOS-MIX in Abhängigkeit von der Vorhersagezeit und Jahreszeit. Rot: Winter, grün: Frühling, blau: Sommer und pink: Herbst. Element: 2 Meter-Temperatur. Zu beachten ist die unterschiedliche Ordinatenskalierung.

hersagezeit an den Stationen Helgoland (oben), Brocken (Mitte) und Zugspitze (unten). Ein Wert > 1 bedeutet eine stärkere Gewichtung der GME-Ergebnisse, ein Wert < 1 hingegen eine stärkere Gewichtung des EZMW-Modells.

Auf den kurzen Zeitskalen dominiert generell das GME die MOS-MIX-Resultate, wohingegen auf längeren Zeitskalen das EZMW-Modell einen leicht stärkeren Einfluss auf die Endresultate besitzt. Die Prediktoren, die erwartungsgemäß am stärksten zur Reduktion der Varianz beitragen, sind für Helgoland der DMO der 2 m-Temperatur (durchschnittliche Gewichtung über alle Vorhersagezeiten etwa 24 %), für den Brocken die Temperatur zwischen 850 hPa und 1000 hPa (durchschnittliche Gewichtung etwa 25 %) und auf der Zugspitze die Temperatur zwischen 850 hPa und 700 hPa (durchschnittliche Gewichtung etwa 30 %). Für alle drei Stationen erhalten zudem Presistenzprediktoren der jeweils vor Ort gemessenen Temperatur ein hohes Gewicht.

Abb. 9-6 verdeutlicht schließlich die Fähigkeit der hier vorgestellten statistischen Post-Processing Verfahren systematische Modellfehlvorhersagen zu korrigieren. Dargestellt ist die absolute Häufigkeit der Abweichung zwischen Vorhersage (+42 Stunden) und eingetretenem Wert der 2 m-Temperatur als Mittel über 14 Stationen innerhalb Deutschlands[8]. Deutlich zu sehen ist, dass der direkte GME-DMO bei diesem Beispiel einen positiven Bias von 1° C aufweist, das heißt im Mittel eine zu warme Prognose liefert. Zudem liefert der DMO in mehr als 3,5 % der Fälle Fehlprognosen von mehr als +5° C.

GME-MOS verringert zum einen diesen positiven Bias auf 0° C und liefert in 0,5 % aller Fälle eine Prognose von mehr als +5° C Abweichung. Die Quote der absoluten Treffer von GME-MOS liegt bei 22,2 %. MOS-MIX liefert lediglich in 0,3 % aller Fälle Vorhersagen von $\geq 5°$ C und liegt in 24,2 % aller Vorhersagen richtig. Eine weitere deutliche Vorhersageverbesserung ist bei regional feiner aufgelösten Vorhersagen (einzelne Stationen) und bei zeitlich differenzierter Betrachtung (einzelne Jahreszeiten) zu beobachten.

4 Fazit

In der Praxis haben sich die MOS-Verfahren als wertvolle Interpretationshilfen für die Meteorologen erwiesen, insbesondere MOS-MIX wird im Routinebetrieb regelmäßig zu Rate gezogen. MOS-MIX ist darüber hinaus die zentrale Datenart der **O**bjektiv **O**ptimierten **G**uidance (OOG, vergleiche Beitrag von M. Rohn in diesem Heft).
Mit WarnMOS steht ein modernes, umfassendes Hilfsmittel zur Generierung automatischer Warnvorschläge bereit, das durch die Integration in AutoWARN (vergleiche Beitrag von B. Reichert in diesem Heft) einen wesentlichen Beitrag zum innovativen Warnmanagement innerhalb des

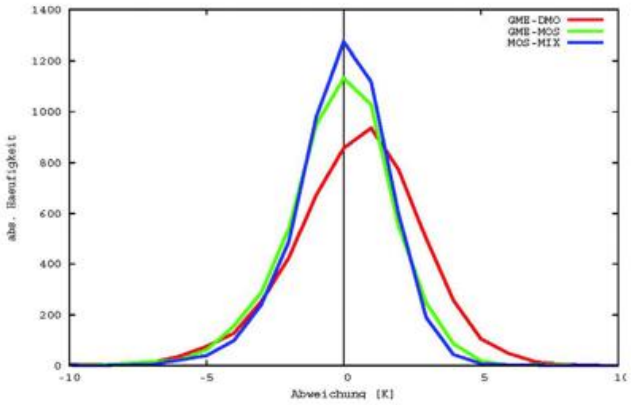


Abb. 9-6: Absolute Häufigkeit des Vorhersagefehlers des GME-DMO (rot), von GME-MOS (grün) und MOS-MIX (blau) als Mittel von 14 repräsentativen Stationen in Deutschland. Jahreswerte 1.1.2008 bis 31.12.2008. Dargestellt ist die absolute Häufigkeit der Abweichung zwischen Vorhersage und eingetretenem Wert.

DWD leisten wird. Die MOS-Verfahren im DWD werden regelmäßig durch Hinzuahme aktueller Mess- und Modellvorhersagereihen aktualisiert und durch die Aufnahme weiterer Stationen erweitert.

Es sei an dieser Stelle auch auf den Beitrag „Verifikation von Unwetterwarnungen" in diesem Heft hingewiesen, der unter anderem Verifkiationsergebnisse der hier besprochenen MOS-Verfahren beinhaltet.

Literatur

ARRIT, R.W., FRANK, W.M., 1985: Experiments in probability of Precipitation Amount Forecasting Using Model Output Statistics. *Mon. Wea. Rev.* **113**, 1837-1851.

CARTER, G.M., DALLAVALLE, J.P., GLAHN, H.R., 1989: Statistical Forecasts Based on the National Meteorological Center's Numerical Weather Prediction System. *Weather and Forecasting* **4**, 401-412.

GLAHN, H.R, LOWRY, D.A., 1972: The Use of Model Output Statistics (MOS) in Objective Weather Forecasting. *J. Appl. Met.* **11**, 1203-1211.

HAALMAN, D., 2001a: MOS-MIX: Integrated Statistical Interpretation of Multiple Numerical Models. Sixth European Conference On Applications on Meteorology ECAM 2003, Rom, Italien.

HAALMAN, D., 2001b: AUTOTAF - Automatic TAF Production. Fifth European Conference On Applications on Meteorology ECAM 2001, Budapest, Ungarn.

HOFFMANN, J., 2008: Entwicklung und Anwendung von statistischen Vorhersage-Interpretationsverfahren für Gewitternowcasting und Unwetterwarnungen unter Einbeziehung von Fernerkundungsdaten. Dissertation, Freie Universität Berlin.

HOCKING, R.R., 1976: The Analysis and Selection of Variables in Linear Regression. *Biometrics* **32**, 1-49.

KNÜPFFER, K., 2001: Lightning MOS – A New Approach for Thunderstorm Prediction. Proceedings of ECAM 2001, Budapest, Ungarn.

LEYENDECKER, V., 2007: Weiterentwicklung eines GFS/MOS-Systems unter Einbeziehung von Beobachtungsdaten zur Verbesserung der Kurzfristvorhersage. Diplomarbeit, Universität Bonn.

MAJEWSKI, D., LIERMANN, D., PROHL, P., RITTER, B., BUCHHOLD, M., HANISCH, T., PAUL, G., WERGEN, W., BAUMGARDNER, J., 2002: The Operational Global Icosahedral–Hexagonal Gridpoint Model GME: Description and High-Resolution Tests. *Mon. Wea. Rev.* **130**, 319-338.

MAJEWSKI, D., LIERMANN, D., PROHL, P., RITTER, B., BUCHHOLD, M., HANISCH, T., PAUL, G., WERGEN, W., BAUMGARDNER, J., 2000: The global-icosahedral-hexagonal grid point model GME – Operational version and high resolution tests. *ECMWF,* Workshop Proceedings, Numerical methods for high resolution global models, 47-91.

KARL, T.R., SCHLESINGER, M.E., WANG, W.C., 1989: A method of relating general circulation model simulated climate to the observed local climate. Part I: Central tendencies and dispersion. Preprints, Sixth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, 188-196.

TAUBENHEIM, J., 1969: Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten. Akademische Verlagsanst. *Geest u. Portig*, Leipzig, 386 Seiten.

von STORCH, H., ZWIERS, F., 1999: Statistical analysis in climate research. *Cambridge University Press*, Cambridge, 470 pp.

Fußnoten

[1] Prediktand: vorherzusagende Größe, abhängige Variable; Prediktor: alle potentiell zur Vorhersage des Prediktanden nutzbaren Größen, unabhängige Variablen.

[2] Eine ausführliche Dokumentation des Integrated Forecast Systems des EZMW kann unter http://ecmwf.int/research/ifsdocs/ eingesehen werden.

[3] Als potentielle Prediktoren werden während der schrittweisen Regression in der MOS-Entwicklungsphase neben Modellprognosen auch SYNOP-, Radar- und Blitzbeobachtungen sowie Persistenzprediktoren angeboten.

[4] Siehe auch http://www.mswr.de.

[5] Empisch transformierte Prediktoren dienen unter anderem dazu, nichtlineare Zusammenhänge zwischen Prediktor und Prediktand weitestgehend zu linearisieren.

[6] Die Warn- und Unwetterkriterien können unter http://www.wettergefahren.de abgerufen werden.

[7] Der Vorhersagewert für das Eintreten eines Ereignisses in einem Gebiet ist immer größer, als die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieses Ereignisses an einem bestimmten Punkt. Eine detaillierte Beschreibung dieses nicht trivialen Übergangs von Punkt- zu Flächenwahrscheinlichkeiten würde den zur Verfügung stehenden Rahmen sprengen, so dass auf die Fachliteratur hierzu, insbesondere (TAUBENHEIM 1969), verwiesen wird.

[8] Es handelt sich um die Werte 1.1.2008 bis 31.12.2008 (5110 Werte) für die Stationen Hamburg-Fuhlsbüttel, Rostock-Warnemünde, Bremen, Potsdam, Düsseldorf, Leipzig-Schkeuditz, Dresden-Klotzsche, Erfurt-Bindersleben, Trier-Petrisberg, Frankfurt/Main-Flughafen, Stuttgart/Echterdingen, Nürnberg, Lahr und München-Stadt.

promet, Jahrg. 35, Nr. 1-3, 78-86
© Deutscher Wetterdienst 2010

E. WEIGL, T. WINTERRATH

10 Radargestützte Niederschlagsanalyse und –vorhersage (RADOLAN, RADVOR-OP)

Radar based precipitation analysis and forecasting (RADOLAN, RADVOR-OP)

Zusammenfassung

Mit der Fertigstellung des Verbunds von 16 Wetterradaren sowie des automatischen Niederschlagsmessnetzes im Jahr 2000 hat der Deutsche Wetterdienst (DWD) die Grundlage für zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Niederschlagsanalysen und -vorhersagen in Echtzeit geschaffen. Die Verknüpfung beider Datenquellen liefert einerseits mit der Radar-Online-Aneichung (RADOLAN) quantitative, stündliche Niederschlagsanalysen sowie andererseits alle 15 Minuten mit der Radar-Online-Vorhersage im operationellen Einsatz (RADVOR-OP) quantitative Niederschlagsvorhersagen für die nächsten zwei Stunden. Da diese radargestützten Verfahren insbesondere für den Hochwasserschutz in den Bundesländern einen wichtigen Beitrag darstellen, hat sich die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) sowohl finanziell als auch fachlich an der Entwicklung beider Verfahren stark beteiligt. Eine räumliche Ausdehnung auf das gesamte hydrologische Einzugsgebiet von Deutschland wird derzeit in Zusammenarbeit mit den benachbarten nationalen Wetterdiensten aufgebaut.

Abstract

With the installation of the weather radar network and the automatic precipitation station network completed in 2000 Deutscher Wetterdienst has laid the basis for temporally and spatially highly-resolved precipitation analyses and forecasts in real-time. With the combination of these two data sets the radar online adjustment supplies quantitative precipitation analyses, while the radar online nowcasting system produces quantitative precipitation forecasts. Because of the high importance of these two radar based methods for the flood forecast centres of the federal states, the Länderarbeitsgemeinschaft Wasser was financially and technically involved in the development of both methods. The spatial extension to the whole hydrological catchment of Germany is currently performed in cooperation with the neighbouring national weather services.

1 Einführung

Das Routineverfahren zur Online-Aneichung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer) wurde im DWD als Projekt RADOLAN (**Rad**ar-**O**nline-**An**eichung) im Jahr 1997 begonnen, von der LAWA finanziell gefördert und fachlich begleitet. Es liefert seit Juni 2005 flächendeckende, räumlich und zeitlich hoch aufgelöste quantitative Niederschlagsdaten aus online angeeichten Radarmessungen im Echtzeitbetrieb für Deutschland (BARTELS et al. 2004). Die Anwendungsmöglichkeiten sind vielfältig (siehe hierzu auch Tab. 10-3 am Ende dieses Beitrags). Im Vordergrund steht im Interesse des Katastrophen- und Hochwasserschutzes die schnelle und genaue Erfassung von Niederschlägen im Einzugsgebiet von Flüssen. Die flächenhafte Niederschlagsanalyse eignet sich auch besonders gut für Validierungszwecke sowie für Klimastudien. Das derzeit bestmögliche, am schnellsten verfügbare RADOLAN-Ergebnis (RW-Produkt) ist ein angeeichtes Radar-Deutschlandkomposit mit stündlichen Niederschlagshöhen in einer Intensitätsauflösung von 0,1 mm und in einer räumlichen Auflösung von einem Quadratkilometer, welches zeitnah (innerhalb von 30 Minuten) zur Verfügung steht. Eine Beschreibung des RADOLAN-Verfahrens folgt in Abschnitt 2.

Abb. 10-1: Radarverbund des DWD und angrenzende Radarstandorte mit 125 km-Radius.

RADOLAN-Produkte werden als Eingangsdaten für Anschlussverfahren genutzt. Dazu gehören das quantitative Radar-Nowcasting (RADVOR-OP; siehe Abschnitt 3), das numerische DWD-Wettervorhersagemodell COSMO-DE (siehe Beitrag 11) zur zeitnahen Niederschlagsvorhersage im Kürzest- und Kurzfristbereich bis 18 Stunden, das radargestützte DWD-Unwetterwarnsystem KONRAD (**KON**vektionsentwicklung in **RAD**arprodukten; LANG 2001, LANG et al. 2003) sowie die Analyse und Vorhersage des Niederschlagsdargebots (Menge des Schmelz- und Regenwassers, das aus einem Schneevolumen austritt) mit dem DWD-Modell SNOW (BLÜMEL und SCHNEIDER 2004).

Die **RAD**argestütze, zeitnahe Niederschlags**VOR**hersage für den **OP**erationellen Einsatz (Niederschlag-Nowcasting-System) – RADVOR-OP – wurde im DWD als Projekt mit finanzieller Förderung und fachlicher Begleitung durch die LAWA im Jahr 2002 begonnen. Unter dem Namen RADVOR-OP wurden die Entwicklung des Latent Heat Nudgings im COSMO-DE (siehe Beitrag 11) sowie die Entwicklung von Nowcasting-Systemen auf der Basis von Trackingverfahren (siehe Abschnitt 3) zusammengefasst. Seit Ende 2008 werden flächendeckend räumlich und zeitlich hoch aufgelöste, quantitative Kürzest- und Kurzfristvorhersagen des Niederschlags im Echtzeitbetrieb für Deutschland produziert und bereitgestellt. Derzeit werden vom DWD drei verschiedene Verfahren zur Verlagerung von Niederschlagsstrukturen aus Radardaten betrieben: KONRAD – ein Verfahren zur Erkennung und Verlagerung konvektiver Zellen; ein Trackingverfahren zur Erkennung und Verlagerung stratiformer und konvektiver Niederschlagsstrukturen und das statistische Verfahren CellMOS (siehe Beitrag 9).

KONRAD und das Trackingverfahren sind Teil des hydrometeorologischen Systems zur Kürzestfristvorhersage der Quantität, Lage und Phase des Niederschlags. Die RADar-OnLine-ANeichung (RADOLAN) liefert in Form der Eingangsdaten sowie der Aneichinformation die Grundlage für die quantitative Niederschlagsvorhersage im Kürzestfristbereich. Mit einer Frequenz von 15 Minuten werden Vorhersagen für die erste und zweite Vorhersagestunde generiert und den Nutzern in der Vorhersagezentrale des Deutschen Wetterdienstes und in den Hochwasserzentralen der Bundesländer sowie regionalen Wasserverbänden zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse des radarbasierten Trackingverfahrens dienen darüber hinaus als Eingangsdaten für die **O**bjektiv **O**ptimierte **G**uidance (OOG) (siehe Beitrag 6). Eine Beschreibung der radarbasierten Vorhersageverfahren des Projekts RADVOR-OP folgt in Kapitel 10.3.

2 Routineverfahren zur Online-Aneichung der Radarniederschlagsdaten

Bei der Bestimmung des Niederschlags durch Radar wird der bodennahe Niederschlag nicht direkt gemessen, sondern nur die von Regen, Schnee und anderen Hydrometeoren in höheren Schichten der Atmosphäre reflektierten Signale. Mittels empirisch gewonnener Z/R-Beziehungen werden diese Radarreflektivitäten Z in Niederschlagsraten R umgerechnet. Die Qualität von Radarniederschlagsdaten ist daher ohne Aneichung mit Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer) für quantitative Anwendungen (z.B. in der Wasserwirtschaft) unbefriedigend. Das RADOLAN-Verfahren kombiniert die Vorteile zweier Messtechniken: Die Niederschlagsmesser der Wetterstationen erfassen den am Standort der Station - also bodennah - gefallenen Niederschlag. Das Wetterradar liefert das Bild der flächenhaften Verteilung des Niederschlags. Diese mathematische Verknüpfung wird mit dem Begriff Radaraneichung beschrieben. An direkte Messungen der Wetterstationen angeeichte Radarniederschlagsdaten stellen somit eine Synthese aus den beiden Datenquellen Radar und Bodenmessnetz dar. Der DWD hat den Projektnamen der Entwicklung eines Online-Verfahrens – RADOLAN – als Kurzform für seine operationelle Produktsuite auf der Basis der Radar-Online-Aneichung übernommen.

Die Datengrundlage für die Radar-Online-Aneichung bildet einerseits der operationelle Wetterradarverbund des

Abb. 10-2: Gemeinsames Niederschlagsmessnetz des DWD und der Bundesländer mit automatisch abrufbaren Ombrometern.

DWD mit 16 C-Band Standorten (siehe Abb. 10-1) und andererseits das gemeinsame Niederschlagsmessnetz des DWD und der Bundesländer mit automatisch abrufbaren Ombrometern (siehe Abb. 10-2).

Dabei wird radarseits der „Precipitation Scan" mit seinen fünfminütigen Radarniederschlagsdaten und einer maximalen Reichweite von 125 km Radius um den jeweiligen Standort für die quantitative Niederschlagsbestimmung genutzt. Von derzeit mehr als 1100 Ombrometerstationen (450 synoptische Stationen AMDA I/II und AMDA III/S des DWD; 450 automatische Niederschlagsstationen AMDA III/N des DWD; 200 Stationen aus Verdichtungsmessnetzen der Bundesländer) geht der stündlich gemessene Niederschlagswert in die Aneichung ein. Darüber hinaus werden auch zeitnah verfügbare stündliche Niederschlagsdaten aus den Nachbarstaaten (etwa 200) genutzt.

Vor der eigentlichen Aneichung werden verschiedene Vorverarbeitungsschritte der quantitativen Radarniederschlagsdaten durchgeführt. Diese sind im Einzelnen die orographische Abschattungskorrektur, die Anwendung von verfeinerten Z/R-Beziehungen, die quantitative Kompositerstellung für Deutschland, die statistische Unterdrückung von Falschechos (Clutter), die Gradientenglättung und die Voraneichung mit einem Faktor aus Boden- zu Radarniederschlagsmaximum. Diese vorangeeichten Radarniederschlagsdaten werden mit den Messwerten der Niederschlagsstationen verglichen. Dabei werden sowohl Faktoren als auch Differenzen zum jeweils besten Radarwert im Neunerfeld (= das der Niederschlagsstation direkt entsprechende Radarpixel mit seinen acht umliegenden Radarpixeln) gebildet. Die so für jede Niederschlagsstation berechneten Faktoren beziehungsweise Differenzen werden auf das Feld des Radarkomposits interpoliert. Anschließend werden die Radarniederschlagsdaten mit diesen Faktoren und Differenzen angeeicht. Zur Bestimmung des besten Aneichverfahrens werden sog. Kontrollstationen als Unterkollektiv aller Aneichstationen ausgewählt, die absolute Abweichung zwischen der Niederschlagshöhe der Kontrollstation und dem angeeichten Radarniederschlagswert gebildet und das sich daraus ergebende beste Verfahren für die Kontrollstation angewendet. Detaillierte Beschreibungen zu den verschiedenen Verfahren sind im Abschlussbericht zum Projekt RADOLAN (BARTELS et al. 2004) veröffentlicht.

So werden im Rahmen der operationellen Aneichung die Vorteile zweier Aneichmethoden, des Faktoren- und des Differenzenverfahrens, genutzt. In der Praxis hat sich gezeigt, dass nur für einen Radius von maximal 100 km um einen Radarstandort und bei einer Verwendung von 40 bis 60 Aneichstationen in diesem Radius eine für quantitative wasserwirtschaftliche Anwendungen genügende Datenqualität erzielt werden kann. Derzeit gewährleisten online im DWD verfügbare Ombrometerdaten von Messnetzen der Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz diese Stationsdichte nur im Süden und Südwesten Deutschlands. Das Verdichtungsmessnetz wird derzeit sukzessive auf weitere Bundesländer ausgedehnt. Zusätzlich wird an der Optimierung der Abdeckung des hydrologischen Einzugsgebietes Deutschlands mit Wetterradar gearbeitet. In diesem Zusammenhang sind die Verlegung einzelner Radarstandorte, ein zusätzliches 17. operationelles Wetterradar für das Allgäu sowie die Einbindung von Daten aus Nachbarländern zu nennen. Als erster Standort aus einem Nachbarland ist das französische Radar von Nancy (Météo France) bereits seit April 2006 operationell in RADOLAN eingebunden. Weitere Radarstandorte der benachbarten Staaten Belgien, Frankreich,

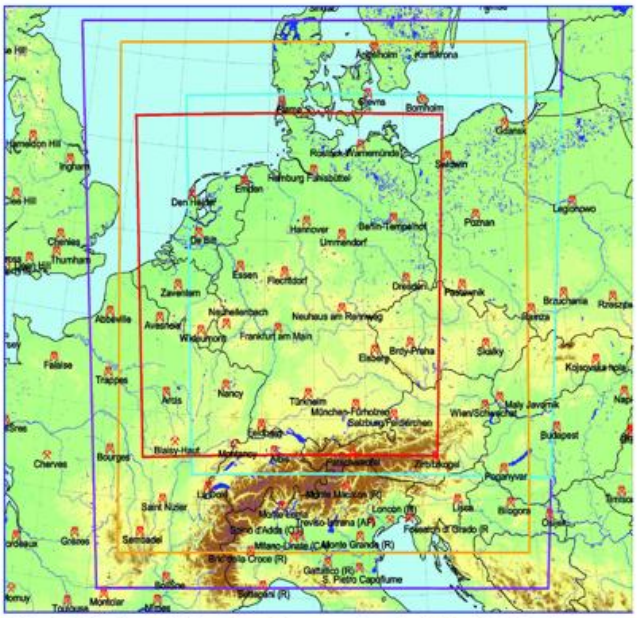


Abb. 10-3: Räumliche Ausdehnung der drei für die Hochwasservorhersagezentralen verfügbaren hydrometeorologischen Echtzeit-Leistungen (RADOLAN (rot), RADOLAN-ME (violett), SNOW (blau)) und des numerischen Wettervorhersagemodells COSMO-DE (gelb).

Niederlande und Schweiz sind seit Juni 2009 als Input für das als RADOLAN-ME bezeichnete, auf Mitteleuropa räumlich erweiterte operationelle Verfahren verfügbar. Dieses Gebiet deckt auch die beiden anderen für hydrologische Echtzeit-Anwendungen bedeutenden Verfahren beziehungsweise Modelle (SNOW und COSMO-DE) ab (siehe Abb. 10-3).

2.1 Kontinuierliche Erweiterungen und Verbesserungen der operationellen RADOLAN-Routine

Seit der Operationalisierung im Juni 2005 konnten mehrere fachliche Erweiterungen und Verbesserungen in den operationellen Routinebetrieb des RADOLAN-Verfahrens überführt werden:

- Stündlich aktualisierte 6 h-, 12 h- und 24 h-aufsummierte Niederschlagshöhen (SQ-, SH- und SF-Radarprodukte) auf der Basis des „best angeeichten" RW-Radarproduktes. Die bis zu 24 Stunden aufsummierten Niederschlagsanalysen sind insbesondere bei länger andauernden Niederschlägen für die Hochwasservorhersagen von Interesse. So kann ein scheinbar geringer stündlicher Niederschlag von 1 bis 2 mm/h bei einer kontinuierlichen Andauer von 24 Stunden bereits die Schwelle von 30 mm/24 h für eine Wetterwarnung vor Dauerregen überschreiten. Bei entsprechendem Vorregen kann dieser „Landregen" bei großräumiger Überdeckung bereits zu Warnungen durch die **H**ochwasservorhersage**z**entralen (HVZ, www.hochwasserzentralen.de) der Länder führen. Auch für andere, auf sechs, zwölf oder 24 Stunden basierende Niederschlagswarnungen ist mit diesen stündlich aktualisierten Niederschlagsanalysen ein wich-tiges Instrument im Warnwesen des DWD und der HVZ der einzelnen Bundesländer einsetzbar.

- Verwendung der „pull"-Kompositmethode bei den RY- und QY-Radarprodukten. Die Verwendung unterschiedlicher Kompositmethoden bei der Erstellung eines aus den lokalen Radardaten zusammengesetzten Datensatzes (Radar-Komposit) hat ihre Ursache in dem den Radardaten zugrunde liegenden Polarkoordinaten-Format. Die Datenaufnahme erfolgt kreisförmig in einer Auflösung von 1° und radial von 1 km bis maximal 128 km (Auflösung: 1 km). Diese Polarkoordinaten werden für ein quantitatives Radar-Komposit mit einer räumlichen Auflösung von 1 km Seitenlänge in ein kartesisches Format transformiert. Die ursprüngliche – von den qualitativen Radar-Komposits übernommene – „push"-Kompositmethode führt zu einer Ausbreitung der Polar-Radarpixel auf bis zu neun umliegende kartesische Radarpixel. In Verbindung mit der Maximummethode (wenn für einen Radarpixel Werte von mehreren Radars (Überlappungsgebiete) vorliegen, wird der maximale Wert übernommen) kann so z. B. ein nur für Polar-Radarpixel vorliegender, hoher Wert auf maximal neun kartesische Radarpixel übertragen werden. Die „pull"-Kompositmethode bildet dagegen nur das nächstgelegene Polar-Radarpixel auf das kartesische Radarpixel ab. Diese Methode hat sich für rein qualitative Anwendungen, wie z. B. KONRAD und die NWV Datenassimilation, als die bessere erwiesen (STEPHAN 2007). Aus diesem Grund findet die „pull"-Kompositmethode derzeit Anwendung auf die fünf-minütlichen Radarkomposits RX (Input für KONRAD, CellMOS und EuRadCom), RY und QY (beide Input für die Datenassimilation von COSMO-DE und AutoWARN).

- Füllen von Lücken im RW-Radarprodukt mit interpolierten Bodenniederschlagsdaten sowie Einführung der Triggerung von Bodenniederschlagsstationen in Radarlücken. Das mit quantitativen Radarmessungen der DWD-Radars erfasste Gebiet deckt Deutschland nicht komplett ab. In wenigen Randbereichen (Allgäu, Berchtesgadener Land, Raum Passau, Odermündung, nördliches Schleswig-Holstein) sowie bei Ausfällen (Störung und Wartung der Radaranlage) eines oder mehrerer Radars existieren Erfassungslücken. Daher werden in diesen Gebieten bzw. in solchen Fällen für hydrologische Anwendungen die angeeichten Radarniederschlagsprodukte mit den Werten aus interpolierten Bodenniederschlagsdaten „aufgefüllt". Diese durch die beiden unterschiedlichen Messverfahren bedingte heterogene Niederschlagsverteilung wird gegenüber dem sonst bestehenden Nachteil der Nicht-Information bewusst in Kauf genommen.

- Integration des von der Wasserwirtschaft entwickelten Mergingverfahrens als drittes Aneichverfahren mit den stündlichen RL- und RU-Radarprodukten. Mit der Integration der von der Wasserwirtschaft entwickelten Aneichmethode des Mergingverfahrens (EHRET 2003) in die operationelle RADOLAN-Routine werden jede Stunde zwei Aneichungen für den aktuellen Aneichtermin gestartet. Für ein möglichst zeitnahes Ergebnis wird die operationelle RADOLAN-Routine wie bisher mit den beiden Aneichmethoden des Faktoren- und des Differenzenverfahrens (sogenannte Standardaneichung mit dem RW-Radarprodukt als Ergebnis) durchgeführt. Gleichzeitig erfolgt eine zweite Aneichung mit allen drei Aneichmethoden: Faktoren-, Differenzen- und Mergingverfahren. Diese Ergebnisse liegen aufgrund des mathematisch aufwändigen Mergingverfahrens in der Regel erst eine halbe Stunde später vor. Bei entsprechend flächenhaften Niederschlägen in Deutschland verzögert sich das Endergebnis proportional zur Anzahl der zur Aneichung verfügbaren Bodenniederschlagsstationen. Es liegen dann sowohl das reine merging-angeeichte RL-Radarprodukt als auch das aus den drei Verfahren mit der Kontrollstationsmethode als bestes ermittelte, verschnittene RU-Radarprodukt vor.

2.2 Auswertung von Starkniederschlagsereignissen mit dem RADOLAN-Verfahren

Der Vorteil der Radarniederschlagsmessung ist insbesondere bei konvektiven Niederschlagsereignissen zu sehen. Aus diesem Grunde werden an dieser Stelle beispielhaft für lokale Starkniederschlagsereignisse in Deutschland

RADOLAN-Auswertungen zum Dortmunder Ereignis am 26. Juli 2008 sowie zum Poxdorfer Ereignis am 21. Juli 2007 vorgestellt.

In der sich über Westdeutschland befindlichen, ungewöhnlich feuchten Warmluft entwickelten sich am Nachmittag des 26. Juli 2008 lokale Gewitterzellen, die teilweise zu katastrophalen Niederschlägen führten. Besonders betroffen waren die Innenstadt sowie der Westen von Dortmund. An der Meteomedia-Messstation Dortmund-Universität fielen allein innerhalb der drei Stunden von 12.50 bis 15.50 UTC (entspricht 14.50 bis 17.50 MESZ) insgesamt 200,2 mm (SCHENK und WEHRY 2008). Die räumliche Verteilung dieses Niederschlages kann nur mit quantitativen Radarniederschlagsmessungen wiedergegeben werden (siehe Abb. 10-4).

Die originären Radarmessungen überschätzen diese von der Station gemessenen Niederschläge um fast 100 mm. Die mittels der operationellen RADOLAN-Routine berechneten stündlichen Niederschlagshöhen zeigen eine Unterschätzung von etwa 70 mm in den drei Stunden, davon entfällt mit fast 60 mm der größte Anteil allein auf die zweite Stunde. Die extrem hohe räumliche Variabilität dieses „Jahrhundertereignisses" spiegelt sich bereits in den Werten der beiden Niederschlagsstationen in Dortmund wieder: An der nur etwa 3 km nordwestlich liegenden Messstation Dortmund-Marten der Emschergenossenschaft fielen in der selben Zeit „nur" 110,5 mm. Diese Stationswerte werden sehr gut mit RADOLAN nachvollzogen. Beide Stationen in Dortmund sind für die operationelle RADOLAN-Routine nicht verfügbar. Die verschiedenen Stations- und aus Radar berechneten Werte des Niederschlags sind in der Tab. 10-1 zusammengefasst.

Eine markante Ähnlichkeit – zumindest bezogen auf die hohen Niederschlagswerte und -gradienten – ist bei dem Starkniederschlagsereignis im oberfränkischen Poxdorf (Landkreis Forchheim) am 21. Juli 2007 festzustellen (siehe Abb. 10-5, Abb. 10-6 und Tab. 10-2; AGV MITTLERE REGNITZ 2009). In beiden Ereignissen mit sehr hohen räumlichen Niederschlagsgradienten von ≥ 30 mm/km und gemessenen Niederschlagshöhen von über 150 mm

Zeit (MESZ) → ↓ Station bzw. RADOLAN-Pixel	1h-RR-Wert (15-16)	1h-RR-Wert (16-17)	1h-RR-Wert (17-18)	3h-RR-Wert (15-18)
DO-Uni (Original-Radar)	100,1	126,9	71,9	298,9
DO-Uni aus RADOLAN (Radar-angeeicht)	43,1	66,5	19,0	128,6
Station DO-Uni (Meteomedia; keine Aneichstation)	50,3	125,2	24,7	200,2
Aneichstation Waltrop	0,0	2,7	5,4	8,1
Aneichstation Bochum	0,5	12,1	0,7	13,3
Aneichstation Gevelsberg	0,0	0,0	0,8	0,8
Station DO-Marten (EG; ca. drei km nordwestlich von DO-Uni; keine Aneichstation) bzw. RADOLAN (Radar-angeeicht)	42,0 bzw. 43,0	55,6 bzw. 58,2	12,9 bzw. 20,1	110,5 bzw. 121,3

Tab. 10-1: Niederschlagshöhen aus Stations- und Radarmessungen für das Dortmunder Ereignis am 26. Juli 2008 (siehe auch Abb. 10-4).

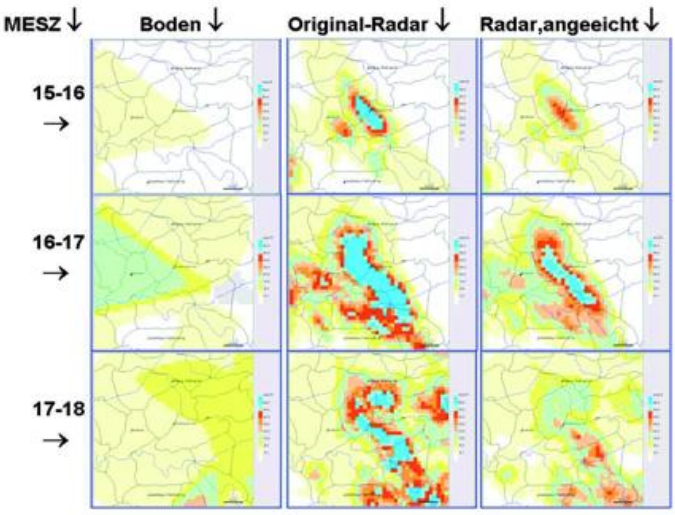


Abb. 10-4: Stündliche Niederschlagsverteilung für das Dortmunder Ereignis am 26. Juli 2008; in den Bodenniederschlagsanalysen sind nur die für die operationelle RADOLAN-Routine verfügbaren Online-Stationen enthalten.

sind teilweise selbst die originären Radarniederschlagswerte noch zu gering. Dies lässt sich durch radarmesstechnisch bedingte Dämpfungseffekte des Niederschlags selbst erklären.

Weitere Informationen zu RADOLAN stehen auf der Seite www.dwd.de/RADOLAN des Metportals des DWD zur Verfügung.

3 Radargestütze, zeitnahe Niederschlagsvorhersage für den operationellen Einsatz

Im Rahmen des Projekts RADVOR-OP wurde ein Niederschlag-Nowcasting-System entwickelt, das auf der Basis von Radar- und Bodenmessungen quantitative, räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagsprognosen für den Kürzestfristzeitraum bis zwei Stunden Vorhersagezeit in Echtzeit generiert. Die Vorhersagen setzen auf dem RADOLAN-Kompositprodukt RZ mit einer Pixelseitenlänge

Station	RR	RH	RB	RW
Bräuningshof	167,2	151,7	107,4	99,3
Wellerstadt	89,3	122,5	101,2	94,0
Poxdorf	159,8	179,3	130,5	119,0
Hagenau	146,9	172,0	120,3	110,4
Effeltrich	150,8	210,9	146,0	131,6
Baiersdorf "Point"	110,4	120,9	93,4	87,9
Baiersdorf "In der Huth"	148,1	138,0	106,8	99,2
Möhrendorf-Kleinseebach	73,5	113,2	88,7	82,8
Mittel	130,8	151,1	111,8	103,0

Tab. 10-2: Niederschlagshöhen aus Stations- und Radarmessungen für das Poxdorfer Ereignis am 21. Juli 2007; Quelle zu den RR-Werten der Stationen (außer Möhrendorf-Kleinseebach): Abwasser- und Gewässerunterhaltungsverband Mittlere Regnitz (siehe auch Abb. 10-5 und 10-6, Abkürzungen siehe Tab. 10-3).

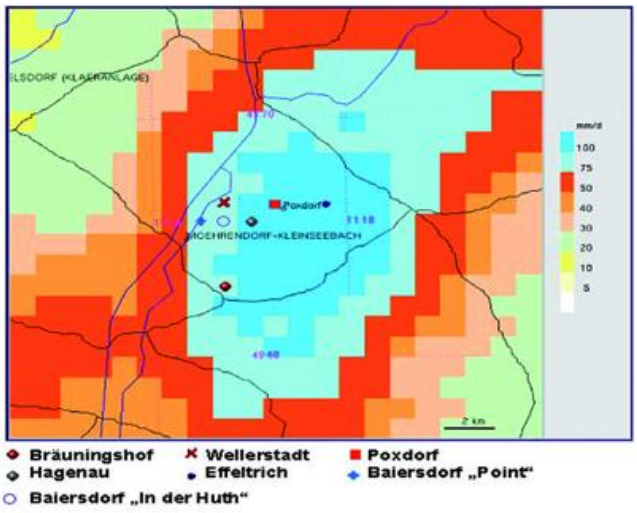


Abb. 10-5: Tägliche RADOLAN-Niederschlagsverteilung (SF-Radarprodukt) für das Poxdorfer Ereignis am 21. Juli 2007.

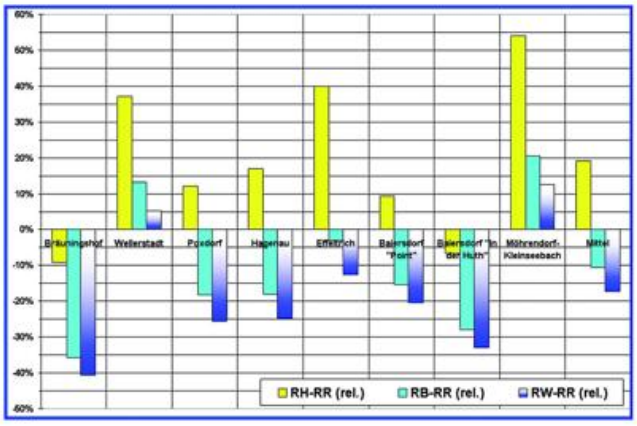


Abb. 10-6: Relative Differenzen der Stations-Niederschlagshöhen (RR) zu den Radarmessungen (RH, RB und RW) für das Poxdorfer Ereignis am 21. Juli 2007; Quelle zu den RR-Werten der Stationen (außer Möhrendorf-Kleinseebach): Abwasser- und Gewässerunterhaltungsverband Mittlere Regnitz (siehe auch Tab. 10-2).

von einem Kilometer und einer Flächenabdeckung von 900 km x 900 km auf und stehen dem Nutzer wenige Minuten nach dem Messzeitpunkt zur Verfügung.

3.1 Trackingverfahren

Den Kern des Nowcasting-Verfahrens bildet ein Verlagerungsalgorithmus. Die grundlegende Idee ist die Ermittlung des Bewegungsfeldes aus zurückliegenden, sequentiellen Radarbildern und die Extrapolation der analysierten Niederschlagsgebiete entlang dieses Vektorfeldes in die Zukunft. In aufeinanderfolgenden Radarbildern werden mit Hilfe eines Bilderkennungsverfahrens Strukturen erkannt und zugeordnet. Die Interpolation der resultierenden Verlagerungsvektoren sowie die Verwendung des gewichteten Mittels aus aktuellen und zurückliegenden Vektorfeldern garantieren zusätzlich eine stetige Verlagerung. Der Schwerpunkt des Verfahrens liegt auf der meso-β-Skala (räumliche Erstrekkung: 25 bis 250 km), die in erster Linie stratiforme Niederschlagsgebiete abdeckt. Die Anwendung der Mustererkennung auf der meso-γ-Skala (räumliche Erstreckung: 2,5 bis 25 km) erlaubt zusätzlich die Erfassung kurzlebigerer, konvektiver Strukturen. Das Trackingverfahren produziert mit einer Frequenz von fünf Minuten qualitativ-quantitative Vorhersagen in Form des 5-Minuten-Produkts RV und des Stunden-Produkts RS bis zu einer Vorhersagezeit von zwei Stunden. Eine Beschreibung des Verfahrens findet man in BARTELS et al. (2005) und WINTERRATH und ROSENOW (2007).

3.2 KONRAD

KONRAD (**Kon**vektionsentwicklung in **RAD**arprodukten) ist ein am DWD-Observatorium Hohenpeißenberg entwickeltes System für die Vorhersage konvektiver Niederschlagsereignisse. Hierbei handelt es sich um ein detailliertes radargestütztes Gewitterdiagnose- und -prognoseverfahren, das insbesondere auf die Überwachung von Gewitterlagen ausgelegt ist. KONRAD bezieht seine Daten aus dem Radarverbund des DWD. Die mit Hilfe eines Bilderkennungsverfahrens aus den Radarbildern berechneten KONRAD-Zellverlagerungsbilder ermöglichen eine Unwetterprognose für eine Vorhersagezeit von maximal einer Stunde. Im Gegensatz zu dem im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Trackingverfahren generiert KONRAD keine quantitativen Niederschlagsvorhersagen, sondern liefert Aussagen zu Zugrichtung und -geschwindigkeit, Intensität und historischer Entwicklung von Konvektionszellen sowie deren meteorologischen Begleiterscheinungen. Abbildung 10-7 zeigt ein Beispiel eines KONRAD-Vorhersageproduktes.

3.3 Verschneidung

Während KONRAD ausschließlich konvektive Strukturen selektiert und verlagert, liegt der Schwerpunkt des Trackingverfahrens auf den stratiformen Niederschlägen. Um die Zugbahn konvektiver Ereignisse in der quantitativen Vorhersage bestmöglich abzubilden, werden die Ergebnisse der beiden Verfahren verschnitten. Hierzu werden durch die Kombination der mittels KONRAD detektierten Größe und prognostizierten Verlagerung der Zellen und des aktuellen 5-minütigen qualitativ-quantitativen RADOLAN-Zwischenprodukts RZ stündliche Niederschlagswerte entlang der Zugbahn der Zellen ermittelt und mit den prognostizierten Stundenwerten des Trackingverfahrens derart kombiniert, dass für jedes Pixel der Maximalwert aus

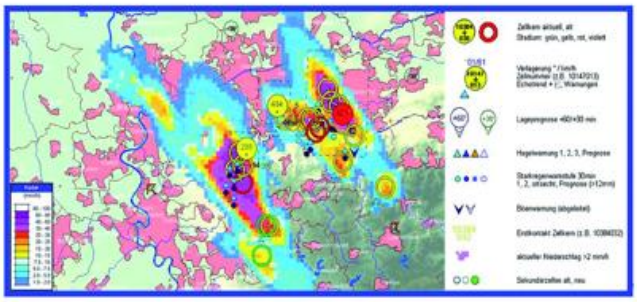


Abb. 10-7: KONRAD-Produkt warnrelevanter Konvektionsparameter für das Starkniederschlagsereignis in Dortmund am 26. Juli 2008; hinterlegt ist das qualitativ-quantitative Stunden-Produkt RH.

beiden Verfahren Eingang findet. Dieses Verfahren wurde gewählt, um die verfügbaren Informationen über das Auftreten extremen Niederschlags abzubilden.

3.4 Quantifizierung

Radargeräte messen den Niederschlag nur indirekt. Um Aussagen über die Niederschlagshöhe am Boden zu erhalten, müssen die Reflektivitäten Z in Niederschlagshöhen R umgerechnet werden. Dies geschieht zum Einen über die sogenannte Z/R-Beziehung, $Z = aR^b$, wobei die Koeffizienten a und b in Abhängigkeit von der Niederschlagscharakteristik gewählt werden. Grundlage dieses formalen Zusammenhangs sind vieljährige Untersuchungen zur Bestimmung repräsentativer Tropfenspektren (LANG 1997).

Eine realistische Bestimmung der quantitativen Niederschlagshöhe erfordert hingegen die Aneichung der Radardaten an Bodenmessdaten. Die Vorgehensweise wurde im Kapitel 2 dargelegt. Eine direkte Übertragung des Aneichverfahrens auf die Vorhersagedaten ist naturgemäß nicht möglich. Aus diesem Grund wurde ein Quantifizierungsverfahren entwickelt, das Information aus der angeeichten Niederschlagsanalyse auf die Vorhersage überträgt. Die grundlegende Annahme besteht in der Persistenz der Häufigkeitsverteilung des Niederschlags seit der letzten Aneichung. Diese Annahme ist unter der Voraussetzung gerechtfertigt, dass die zeitliche Änderung des Niederschlags geringer ist als die Niederschlagsänderung durch die Aneichung. Um den Einfluss von Falschechos zu minimieren wird eine zusätzliche progressive Clutterfilterung (WINTERRATH und ROSENOW 2007) auf das RW-Radarprodukt angewendet. Die Niederschlagsverteilungen des aktuellsten angeeichten Stunden-Produkts RW und des zu quantifizierenden vorhergesagten Stunden-Produkts RS werden mit Hilfe von Weibull-Verteilungsfunktionen (ϕ^{RW}, ϕ^{RS}) angenähert. Anschließend wird die Transformationsfunktion $T\ ^{\phi^{RS} \rightarrow \phi^{RW}}$ die ϕ^{RS}auf ϕ^{RW} abbildet, bestimmt und auf die Pixelwerte des Niederschlags im RS-Radarprodukt angewendet. Aufgrund des asymptotischen Verlaufs der Weibull-Funktion für stärkere Niederschläge, wird das obere Ende der Häufigkeitsverteilung linear abgebildet. Abb. 10-8 zeigt als Beispiel das quantitative Niederschlagsvorhersageprodukt RQ vom 03.12.2009, 14.30 UTC.

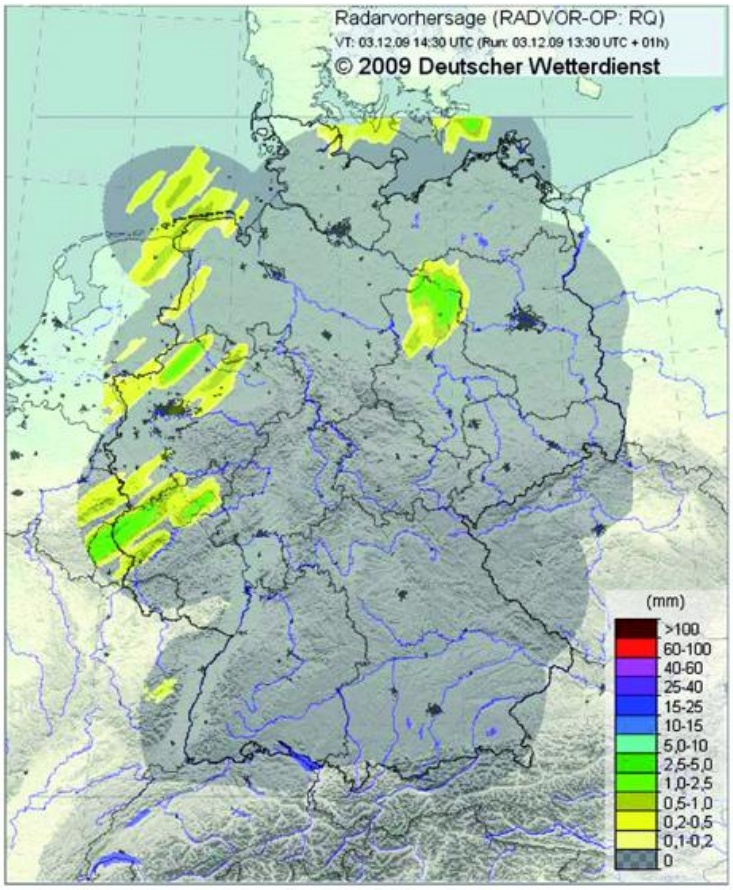


Abb. 10-8: Quantitatives Niederschlagsvorhersageprodukt RQ; einstündige Vorhersage für 03.12.2009, 14.30 UTC. Die Grauschattierung zeigt den Bereich an, für den eine Vorhersage vorliegt.

3.5 Produktbereitstellung und Visualisierung

Die Vorhersagen, die aus den Radar-Nowcasting-Verfahren resultieren, werden im DWD mit Hilfe von NinJo (siehe Beitrag 8 in diesem Heft) visualisiert. Dem Anwender stehen alle 15 Minuten aktuelle Vorhersagen der quantifizierten Niederschlagshöhe für die erste und zweite Vorhersagestunde zur Verfügung. Des weiteren stehen sogenannte qualitativ-quantitative Niederschlagsprodukte zur Verfügung, die alle fünf Minuten mit einer zeitlichen Auflösung von fünf Minuten bis zu einer Vorhersagezeit von zwei Stunden generiert werden. Diese lassen sich mit Hilfe des NinJo-Systems zu einem Vorhersagefilm zusammenfassen und liefern einen visuellen Eindruck von der zu erwartenden Verlagerung der Niederschlagsfelder. Auch die Ergebnisse des KONRAD-Verfahrens stehen im NinJo-System zur Verfügung. Die verschiedenen Analyse- und Vorhersageparameter werden über farbige Symbole visualisiert und stellen ein wichtiges Instrument für das zeitkritische Warnmanagement dar.

Zur Unterstützung des Hochwasser- und Katastrophenschutzes werden aktuelle Niederschlagsanalysen und -vorhersagen im **Wa**sserwirtschafts**W**etter**I**nformations**S**ystem (WaWIS; http://www.dwd.de → Spezielle Nutzer → Wasserwirtschaft → WaWIS) des DWD bereitgestellt. WaWIS ist eine passwortgeschützte Internetplattform, die externen Nutzern zeitnah für Zwecke der Hochwasservorhersage aktuelle Analysen und Vorhersagen hydrologisch relevanter Parameter präsentiert.

KONRAD ist für externe Nutzer in Verbindung mit dem System FeWIS (**Fe**uerwehr**W**etter**I**nformations**S**ystem) eingerichtet, siehe www.dwd.de/fewis. FeWIS und KONRAD ergeben zusammen mit WaWIS ein umfassendes System für ein effektives Warnmanagement, welches für Kunden aus dem Katastrophenschutz verfügbar ist.

Weitere Informationen zu RADVOR-OP stehen auf den Seiten www.dwd.de/radvor-op des Metportals des DWD zur Verfügung.

4 Ausblick

Zur Validierung der durch die verschiedenen Aneichmethoden produzierten, quantitativen Radarniederschlagsprodukte sind auf der Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2008) in Helsinki erste Verifikationsergebnisse vorgestellt worden (WEIGL und WINTERRATH 2008). Eine routinemäßige Auswertung auf der Basis von konventionellen Stationen mit täglichen Niederschlagshöhen für die seit Dezember 2007 verfügbaren, unterschiedlich angeeichten Radarprodukte wird derzeit aufgebaut. Darüber hinaus sind Untersuchungen zur Genauigkeit (Qualität) und erste klimatologische Auswertungen aus RADOLAN-Daten in Planung.

In der Weiterentwicklung der operationellen RADOLAN-Routine muss den radarseitigen Defiziten (Clutterfilterung, Bright-Band, Niederschlagsdämpfung) besondere Bedeutung zugemessen werden. Als wesentlicher Baustein zum Erreichen dieser Ziele wird die Nutzung der Dual-Polarisationstechnik der innerhalb der nächsten Jahre im DWD neu installierten Wetterradargeräte gesehen.

Zu den in naher Zukunft zu realisierenden Verbesserungen der operationellen RADOLAN-Routine gehören

- die Einführung des Stetisierungsverfahrens bei der Kompositierung (MEHL et al. 2007),
- die Verbesserung der Aneichmethode des Mergingverfahrens im RIMAX-Projekt OPAQUE, siehe brandenburg.geoecology.uni-potsdam.de/projekte/opaque/,
- die Vervollständigung des RADOLAN-ME-Gebietes im Norden, Osten und Südosten durch Einbeziehung benachbarter Radardaten sowie
- die Nutzung einer auf Satellitendaten basierenden Cluttermap zur Falschechounterdrückung.

Für die hydrologische Abflussmodellierung ist die Abflusswirksamkeit des Niederschlags eine entscheidende Komponente der meteorologischen Eingangsgrößen. Aus diesem Grund entwickelt der DWD derzeit ein Verfahren zur quantitativen Prognose des Aggregatzustandes des vorhergesagten Niederschlags. Auf der Basis von interpolierten Bodentemperaturmessungen, Wetterbeobachtungen und Satellitenbildern produziert das Radarwetter-Verfahren alle 15 Minuten eine flächenhafte Vorhersage des Aggregatzustandes mit einer Auflösung von 15 Minuten für zwei Vorhersagestunden. Dieses qualitative Produkt erlaubt in Kombination mit den fünfminütigen Radar-Vorhersageprodukten eine quantitative Abschätzung des festen und flüssigen Anteils des prognostizierten Niederschlags.

Tab. 10-3 gibt einen Überblick über alle derzeit bzw. in naher Zukunft verfügbaren radargestützten Niederschlagsanalysen und -vorhersagen aus den operationellen Verfahren RADOLAN und RADVOR-OP.

Produkt-kennung	Inhalt	zeitliche Auflösung	verfügbar nach	Anwendung
RX	Original Radardaten in qualitativen rvp-6-Einheiten	5 Min.	**2 Min.**	KONRAD, CellMOS, EuRadCom
EX	Mitteleuropäische Original Radardaten in qualitativen rvp-6-Einheiten: räumliche Ausdehnung auf alle Deutschland beeinflussende Fluss-Einzugsgebiete	5 Min.	**3 Min.**	in Planung
RZ	Radardaten nach Abschattungskorrektur und nach Anwendung der verfeinerten Z-R-Beziehungen in Niederschlagshöhen umgerechnet	5 Min.	**3 Min.**	Radarwetter, quantitatives RADAR-Nowcasting
EZ	Mitteleuropäische quantitative Radardaten: räumliche Ausdehnung auf alle Deutschland beeinflussende Fluss-Einzugsgebiete	5 Min.	**5 Min.**	Quantitative Niederschlagsanalyse (Mitteleuropa)
RY/QY	qualitätsgeprüfte Radardaten nach Abschattungskorrektur und nach Anwendung der verfeinerten Z-R-Beziehungen in Niederschlagshöhen umgerechnet / Qualitätsflags	5 Min.	**5 Min.**	COSMO-DE, AutoWARN
EY	Mitteleuropäische qualitätsgeprüfte Radardaten: räumliche Ausdehnung auf alle Deutschland beeinflussende Fluss-Einzugsgebiete	5 Min.	**6 Min.**	in Planung
RH	RZ auf eine Stunde aufsummiert	60 Min. (alle 5 Min.)	**5 Min.**	Warnwesen, AutoWARN
EH	EZ auf eine Stunde aufsummiert	60 Min. (alle 5 Min.)	**7 Min.**	Warnwesen
RB	vorangeeichte Radardaten nach Anwendung eines Faktors	60 Min.	**30 Min.**	SNOW
RW	angeeichte Radardaten: Endergebnis der Aneichung nach Durchführung der gewichteten Mittelung aus zwei Standardverfahren	60 Min.	**30 Min.**	HVZ, quant. RADAR-Nowcasting, Landwirtschaft, Auswertung
EB/EW	Mitteleuropäische vorangeeichte bzw. angeeichte Radardaten: räumliche Ausdehnung auf alle Deutschland beeinflussende Fluss-Einzugsgebiete	60 Min.	**40 Min.**	Quantitative Niederschlagsanalyse (Mitteleuropa)
SQ/SH/ SF	aufsummierte, angeeichte Radardaten	6h/12h/24h (alle 60 Min.)	**40 – 60 Min.**	Warnwesen, HVZ
RL/RU	Radardaten nach Merginganeichung/ angeeichte Radardaten: Endergebnis der Aneichung nach Durchführung der gewichteten Mittelung aus zwei Standardverfahren und dem Mergingverfahren	60 Min.	**60 – 120 Min.**	HVZ
„RW2“, „SF2“	„nach-angeeichte“ Radardaten: Endergebnis der Aneichung nach Durchführung der gewichteten Mittelung aus zwei Standardverfahren	60 Min./24h	**18 – 25 h**	HVZ
RV	Qualitativ-quantitative, vorhergesagte Radardaten auf der Basis der RZ-Produkte von RADOLAN; Vorhersage bis 2h	5 Min.	**4 Min.**	Radarwetter, quantitatives RADAR-Nowcasting
RS	RV auf eine Stunde aufsummiert; Vorhersage bis 2h	60 Min. (alle 15 Min.)	**5 Min.**	Radarwetter, quantitatives RADAR-Nowcasting
RQ	Quantifizierte, vorhergesagte Radardaten auf der Basis der RW-Produkte von RADOLAN und der RS-Produkte; Vorhersage bis 2h	60 Min. (alle 15 Min.)	**6 Min.**	Warnwesen, HVZ
RE	Anteil des festen Niederschlags für die RQ-Produkte; Vorhersage bis 2h	60 Min. (alle 15 Min.)	**7 Min.**	Warnwesen, HVZ

Tab. 10-3: RADOLAN- und RADVOR-OP-Produkte mit ihren Anwendungszwecken.

Danksagung

Wir bedanken uns bei allen Kollegen, die an der Entwicklung der RADOLAN und RADVOR-OP zu Grunde liegenden Verfahren zur quantitativen radarbasierten Niederschlagsanalyse und -kürzestfristvorhersage mitgewirkt haben, insbesondere bei Wolfgang Rosenow, Thomas Reich, Christian Podlasly, Peter Lang und Otto Plörer.

Literatur

AGV MITTL. REGNITZ, 2009: Interne Auswertungen der verbandseigenen Nieder-

schlagsmessungen am 21.07.2007.

BARTELS, H., WEIGL, E., REICH, T., LANG, P., WAGNER, A., KOHLER, O., GERLACH, N., 2004: Zusammenfassender Abschlussbericht zum Projekt RADOLAN. http://www.dwd.de/RADOLAN.

BARTELS, H., WEIGL, E., KLINK, S., KOHLER, O., REICH, T., LANG, P., ROSENOW, W., PODLASLY, C., WINTERRATH, T., ADRIAN, G., MAJEWSKI, D., LANG, J., 2005: Zusammenfassender Abschlussbericht zum Projekt RADVOR-OP. http://www.dwd.de/radvor-op.

BLÜMEL, K., SCHNEIDER, G., 2004: Abschlussbericht zum Projekt SNOW-BW2003. *Deutscher Wetterdienst,* Geschäftsfeld Hydrometeorologie, Berlin-Buch.

EHRET, U., 2003: Rainfall and flood nowcasting in small catchments using weather radar. Stuttgart: Institut für Wasserbau. *Mitteilungen* **121**.

LANG, P., 1997: Niederschlagsquantifizierung auf der Basis von Radardaten. *Promet* **26**, 1-3, 22-31.

LANG, P., 2001: Cell tracking and warning indicators derived from operational radar products. Preprints 30th Conf. Radar Meteorol., Munich, Germany, 19-24 July 2001 (AMS 2001), 245-247.

LANG, P., PLÖRER, O., MUNIER, H., RIEDL, J., 2003: KONRAD – ein operationelles Verfahren zur Analyse von Gewitterzellen und deren Zugbahnen, basierend auf Wetterradarprodukten. *Bericht des Deutschen Wetterdienstes* **222**.

MEHL, S., SACHER, D., LANG, J., 2007: Stetisierung von Niederschlagsverteilungen aus Radardaten. Poster auf der Meteorologentagung DACH 2007. http://www.cosis.net/abstracts/DACH2007/00260/DACH2007-J-00260.pdf.

SCHENK, F., WEHRY, W., 2008: Der Unwetter-Regen im Ruhrgebiet vom 26. Juli 2008. Beiträge zur Berliner Wetterkarte, http://wkserv.met.fu-berlin.de/edu/wetterkarte/beilagen/2008/unwetterruhr.pdf.

STEPHAN, K., 2007: Erfahrungsbericht zur Verwendung des PULL-Kompositverfahrens zur Erstellung des RADOLAN-Komposits (RZ-Komposit). DWD, Interner Bericht.

WEIGL, E., WINTERRATH, T., 2008: Improvements of the operational composite QPE products (RADOLAN) by the German Meteorological Service (DWD). Poster auf der ERAD 2008, http://www.fmi.fi/kuvat/ERAD2008_0073.pdf.

WINTERRATH, T., ROSENOW, W., 2007: A new module for the tracking of radar-derived precipitation with model-derived winds. *Advances in Geosciences* **10**, 77-83.

promet, Jahrg. 35, Nr. 1-3, 87-97
© Deutscher Wetterdienst 2010

M. BALDAUF, A. SEIFERT, U. DAMRATH, K. STEPHAN, U. PFLÜGER, D. MAJEWSKI

11 Das Regionalmodell COSMO-DE

The regional model COSMO-DE

Zusammenfassung

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) betreibt seit April 2007 das so genannte „konvektionserlaubende" Wettervorhersagemodell COSMO-DE für den Kürzestfristvorhersagebereich, das heißt für Vorhersagen bis zu 21 Stunden. Hauptziel ist dabei eine verbesserte Vorhersage konvektiver Niederschlagsereignisse von Einzelgewittern bis hin zu mesoskaligen konvektiven Komplexen. Dazu war nicht nur eine Reduzierung der horizontalen Gittermaschenweite auf 2,8 km notwendig, sondern es mussten erhebliche Erweiterungen und Anpassungen in der Modellnumerik, der physikalischen Parametrisierung und der Datenassimilation erfolgen. Neben der Beschreibung dieser Modellentwicklungen werden Fallbeispiele erläutert sowie Probleme bei der Verifikation auf dieser Skala angesprochen.

Abstract

The German Weather Service (DWD) since April 2007 operates the so-called ‚convection-permitting' weather prediction model COSMO-DE for the very short forecast range, i.e. for forecasts up to 21 h. Main goal is an improved prediction of convective precipitation events from single thunderstorms to mesoscale convective complexes. For this purpose not only a reduction of the horizontal grid mesh size to 2,8 km was necessary but also considerable extensions and adaptations in the model numerics, the physical parameterisations and the data assimilation. Among the description of these model developments, case studies are described and problems with the verification on those scales are discussed.

1 Einleitung

Die Vorhersage konvektiver Systeme, von einzelnen Gewitterzellen oder Multizellengewittern bis hin zu Superzellen oder großräumigen mesoskaligen konvektiven Komplexen, stellt eine der großen Herausforderungen in der operationellen Wettervorhersage dar. Auf der synoptischen Skala, das heißt bei der Vorhersage von Hoch- und Tiefdruckgebieten und deren Fronten, konnten in den letzten Jahrzehnten durch die numerische Modellierung große Fortschritte erzielt werden. Hingegen ist eine Vorhersage sommerlicher konvektiver Ereignisse und der mit ihnen verbundenen Niederschläge immer noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Konvektive Niederschläge sind oft lokal begrenzt, und können damit zu hohen Niederschlagskonzentrationen führen. Bekannte Folgen sind übergelaufene Keller, Überlastung von Kanalisationssystemen bis hin zu Erdrutschen im Alpengebiet. Eine verbesserte Vorhersage ist damit zunächst für den gesamten Warndienst wichtig. Nutzer der hydrologischen Dienste können darüber hinaus Abflussmengen über Schleusen und Staudämme gezielter steuern. Die mit konvektiven Ereignissen verbundenen starken Böen stellen ein weiteres Sicherheitsrisiko im Bereich der Luftfahrt dar, vor allem in der Nähe von Flughäfen.

Die Vorhersageunsicherheit resultiert zum Teil daraus, dass konvektive Systeme in den bislang üblichen Wettervorhersagemodellen, wie dem Globalmodell GME und dem Regionalmodell COSMO-EU (MAJEWSKI und RITTER 2002, DOMS et al. 2002), als subskalige Prozesse parametrisiert sind. Diese Parametrisierungen, meist sogenannte Massenflussschemata (TIEDTKE 1983), beschreiben dabei nicht nur die wolkenmikrophysikalischen Prozesse, sondern auch die Wolkendynamik. Hierbei müssen naturgemäß viele Vereinfachungen gemacht werden, und auch heute ist das Problem der Konvektionsparametrisierung noch nicht befriedigend gelöst (ARAKAWA 2004). Insbesondere die Parametrisierung langlebiger und organisierter konvektiver Systeme, die über mehrere Stunden und hunderte Kilometer propagieren, scheint mit den klassischen Ansätzen kaum möglich. Die Defizite der üblichen Konvektionsparametrisierungen führen vor allem bei

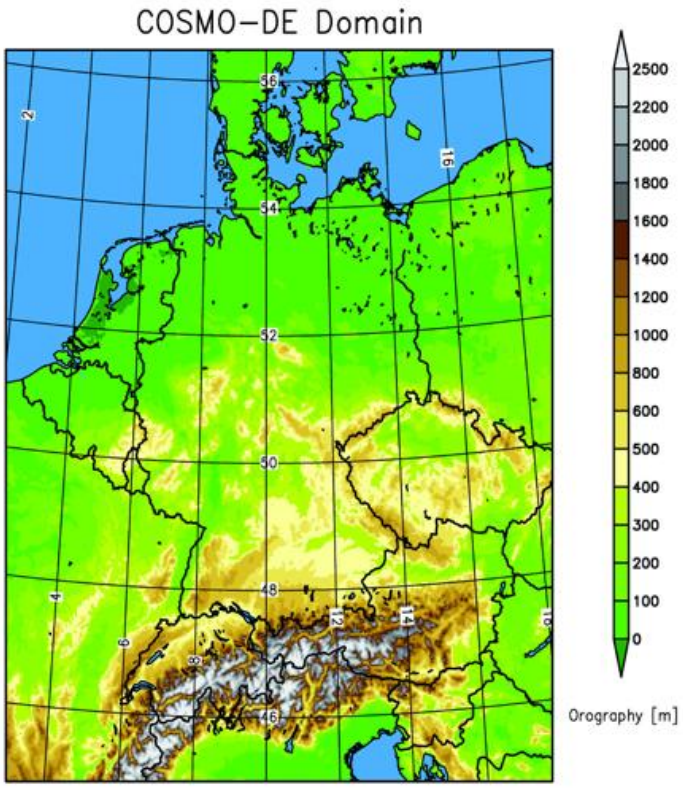


Abb. 11-1: Modellgebiet des COSMO-DE. Topographische Höhe in m für Landgitterpunkte (Landanteile > 50%).

Luftmassenkonvektion zu einer fehlerhaften Darstellung des Tagesganges der Konvektion und des Niederschlags. Einen Ausweg aus dieser Sackgasse bieten sogenannte konvektionsauflösende oder konvektionserlaubende Wettervorhersagemodelle, die mit Maschenweiten von 1-4 km die Dynamik der hoch reichenden Feuchtkonvektion explizit simulieren können. Pionierarbeit haben dabei DONE et al. (2004) und WEISMAN et al. (2008) geleistet, die mit dem **W**eather **R**esearch and **F**orecasting (WRF) Modell zeigen konnten, dass bereits eine Maschenweite von 4 km ausreichend sein kann, um große konvektive Systeme, wie sie über den USA auftreten, erfolgreich zu simulieren und vorherzusagen.

Der DWD war im Rahmen des COSMO-Konsortiums federführend an der Entwicklung einer konvektionsauflösenden Version des COSMO-Modells (früher Lokal-Modell, DOMS et al. 2002, STEPPELER et al. 2003) beteiligt. Dieses Modellsystem, das beim DWD unter der Bezeichnung COSMO-DE seit dem 16. April 2007 operationell ist, wird im Folgenden dargestellt. Kapitel 2 gibt einen Überblick über die Neuerungen in Dynamik und Modellphysik und einen kurzen Überblick über vergleichbare Modelle anderer Wetterdienste, Kapitel 3 über die Datenassimilation. In Kapitel 4 werden zunächst einige Fallbeispiele des COSMO-DE gezeigt, während in Kapitel 6 am Beispiel der Grenzschichtparametrisierung die Notwendigkeit von permanenten Entwicklungsmaßnahmen demonstriert wird. Kapitel 5 beschreibt für die konvektive Skala angepasste Verifikationsmethoden.

2 Modellentwicklungen für COMO-DE

2.1 Modellkonfiguration

Das Modellgebiet des COSMO-DE umfasst neben Deutschland, der Schweiz und Österreich auch kleinere Teile der jeweils angrenzenden Länder. Mit 421 x 461 Gitterpunkten wird bei einer Maschenweite von 0.025° ≈ 2,8 km eine Fläche von etwa 1300 x 1200 km² überdeckt. Wie auch COSMO-EU verwendet COSMO-DE ein rotiertes Koordinatensystem dessen Pol bei λ_N = 170° W und ϕ_N = 40.0° N liegt. Abbildung 11-1 zeigt das Modellgebiet des COSMO-DE, dargestellt ist die Topographie und die Land-Meer-Maske im Modellgitter. Als Vertikalkoordinate verwendet COSMO-DE eine modifizierte Gal-Chen-Koordinate mit 50 Schichten. Der Modelloberrand liegt bei 22 000 m, die unterste Hauptfläche bei 10 m. Weitere Details der operationellen Konfiguration sind ausführlich bei BALDAUF et al. (2009) beschrieben.

Angetrieben wird COSMO-DE vom COSMO-EU, das eine Maschenweite von 7 km hat. Da die Hauptanwendung von COSMO-DE in der Kürzestfristvorhersage konvektiver Ereignisse liegt, wird das Modell alle 3 Stunden mit einer sehr kurzen Datenassimilationszeit (0,5 Stunden nach Termin) für eine Vorhersagezeit von 21 Stunden gerechnet. Dem Vorhersagemeteorologen stehen damit für einen Zieltermin unter Umständen sogar mehrere Vorhersagen

$$
\begin{aligned}
L(\phi^n) := \frac{\tilde{\phi}-\phi^n}{\frac{\Delta t}{3}} &= A(\phi^n)+P(\phi^n) \\
\text{1. RK-Schritt:}\quad \phi^* &= \phi^n+\frac{\Delta t}{3}L(\phi^n) \\
\text{'fast waves' mit Tendenzen} \quad & \frac{\phi^*-\phi^n}{\Delta t/3}\text{, beginnend bei } \phi^n \Rightarrow \phi^* \\
L(\phi^*) := \frac{\tilde{\phi}-[\alpha\phi^n+(1-\alpha)\phi^*]}{\frac{\Delta t}{2}} &= A(\phi^*)+P(\phi^n) \\
\text{2. RK-Schritt:}\quad \phi^{**} &= \phi^n+\frac{\Delta t}{2}L(\phi^*) \\
\text{'fast waves' mit Tendenzen} \quad & \frac{\phi^{**}-\phi^n}{\Delta t/2}\text{, beginnend bei } \phi^n \Rightarrow \phi^{**} \\
L(\phi^{**}) := \frac{\tilde{\phi}-[\alpha\phi^n+(1-\alpha)\phi^{**}]}{\Delta t} &= +A(\phi^{**})+P(\phi^n) \\
\text{3. RK-Schritt:}\quad \phi^{n+1} &= \phi^n+\Delta t\,L(\phi^{**}) \\
\text{'fast waves' mit Tendenzen} \quad & \frac{\phi^{n+1}-\phi^n}{\Delta t}\text{, beginnend bei } \phi^n \Rightarrow \phi^{n+1}
\end{aligned}
$$

Tab. 11-1: Prinzipieller Ablauf des Runge-Kutta-Zeitintegrationsschemas, A bezeichnet die Advektionsoperatoren, P die Tendenzen der Physikparametrisierungen, ϕ steht abkürzend für die Felder u, v, w, T und p.

zur Verfügung. Damit kann schon eine erste Einschätzung über die Verlässlichkeit der Vorhersage gewonnen werden. Diese Vorgehensweise wird auch als „Lagged average forecast"-Ensemble bezeichnet.

2.2 Dynamik und Numerik

Konvektionsauflösende Modelle stellen erhöhte Anforderungen an die Genauigkeit der Numerik, da die für das Modellverhalten wichtige hoch reichende Feuchtkonvektion bei der derzeitigen Modellauflösung nur mit wenigen Gittermaschenweiten aufgelöst werden kann. Die bislang im COSMO-Modell verwendete Leapfrog-Zeitintegration, die zusammen mit räumlichen zentrierten Differenzen-Diskretisierungen verwendet wurde, ist dafür nicht mehr optimal geeignet. Zum einen erzeugen zentrierte Differenzen-Diskretisierungen zweiter Ordnung zu starke Oszillationen bei fein aufgelösten Strukturen, zum anderen wird eine relativ kräftige künstliche Diffusion benötigt, um das gesamte Schema zu stabilisieren. Deshalb wurde ein neuer dynamischer Kern entwickelt, der auf der **R**unge-**K**utta-(RK)-Zeitintegration nach WICKER und SKAMAROCK (2002) basiert. Speziell werden dabei Aufwind-Advektionsoperatoren 5. Ordnung mit Hilfe eines RK-Schemas 3. Stufe integriert; dies ist eine der effizientesten Kombinationen zwischen Advektionsoperatoren und RK-Verfahren (BALDAUF 2008), das heißt sie erlaubt eine hohe Courantzahl und damit einen relativ großen Zeitschritt bei noch erträglichem Rechenaufwand pro Zeitschritt. Mit dem RK-Kern werden die so genannten dynamischen Variablen u, v, w, also die sphärischen Komponenten der Windgeschwindigkeit sowie die Abweichungen von Druck (p') und Temperatur (T') von einem vorgegebenen, stationären und ruhenden Grundzustand, prognostiziert.

Neben der Advektion wird der maximal mögliche Zeitschritt vor allem durch sich schnell ausbreitende Schallwellen und Schwerewellen begrenzt. Um diese starke Begrenzung zu umgehen, werden zwei Maßnahmen angewendet. Erstens wird ein sog. Zeitsplitting eingeführt, das heißt diese schnellen Prozesse werden mit einem kleineren Zeitschritt berechnet, während die "teuren" Advektionsprozesse mit einem großen Zeitschritt berechnet werden. Wie in WICKER und SKAMAROCK (2002) gezeigt, erlaubt das RK-Schema ein solches Splitting. Zweitens werden alle vertikalen Diskretisierungen implizit behandelt. Da die vertikalen Gittermaschenweiten vor allem in Bodennähe sehr klein sind, hätte man ansonsten eine zu restriktive Zeitschrittbegrenzung.

In Tabelle 11-1 ist der prinzipielle Ablauf eines RK-Zeitintintegrationsschritts vom Zeitpunkt n zu n + 1 (Zeitpunkte werden mit oberen Indizes bezeichnet) skizziert. In jedem Subschritt wird dabei zunächst eine langsame Tendenz L aus **A**dvektion A und den Tendenzen der Physik**p**arametrisierungen P aus den Feldern ϕ berechnet. Mit dieser langsamen Tendenz wird der eigentliche Runge-Kutta-Schritt durchgeführt und ein intermediäres Feld (zum Beispiel ϕ^*) berechnet. Von ϕ^* aus werden schließlich die Schall- und Schwerewellen ("fast waves") berechnet. Nach dreimaliger Wiederholung (dreistufiges RK-Schema) stehen dann die Felder ϕ^{n+1} bereit. Mit α ist dabei eine Art Überdämpfung gewichtet, die implizite Anteile der Vertikaladvektion stabilisiert.

Bei der expliziten Simulation hoch reichender Feuchtkonvektion sollten insbesondere die Transporte der Feuchtevariablen möglichst genau, unter Umständen sogar erhaltend sein. Die Vorteile einer besseren Feuchteadvektion wurden auch von den Entwicklern des konvektionsauflösenden WRF-Modells erkannt. Da man hierfür positiv definite Verfahren benötigt, werden diese Variablen außerhalb des RK-Kerns (dessen 5. Ordnung-Aufwind-Verfahren nicht positiv definit sind) mit einem Finite-Volumen-Verfahren mit einer Flußformulierung und -limitierung nach BOTT (1989) transportiert. Alternativ kann ein Semi-Lagrange-Verfahren mit hoher Interpolationsordnung verwendet werden. Beide Verfahren sind in FÖRSTNER et al. (2006) beschrieben.

2.3 Modellphysik

Für die explizite Simulation hoch reichender Feuchtkonvektion sind diverse Änderungen und Erweiterungen der Parametrisierungen subskaliger physikalischer Prozesse erforderlich.

Dies betrifft unter anderem die Wolkenmikrophysikparametrisierung, die nun auch Prozesse beinhalten muss, wie sie typischerweise in konvektiven Wolken ablaufen. Hierzu wurde das bestehende Wolkenmikrophysikschema des COSMO-Modells um eine Partikelklasse „Graupel" erweitert. Graupel entsteht durch Bereifen von Schnee oder Eis. Im Modell wird ein Schwellenwert von 0,2 g/kg für das Wolkenwasser vorausgesetzt, bevor Graupel entsteht. Die Partikeleigenschaften von Graupel werden primär durch die Masse-Durchmesser-Relation, m_g=169,6 $D_g^{3.1}$ mit D_g in m, m_g in kg, sowie die Fallgeschwindigkeit, V_g=442$D_g^{0.89}$ in m/s, bestimmt. Diese empirischen Beziehungen gehen auf Messungen von HEYMSFIELD und KAJIKAWA (1987) zurück und sind typische Werte für Graupel mit niedriger Dichte. Eine explizite Vorhersage von Hagel ist mit diesem Modell, aufgrund der noch zu groben Maschenweite, derzeit nicht angestrebt. Für die Größenverteilung der Graupelpartikel wird eine Exponentialverteilung

$$f_g(D_g) = N_{0,g} \exp(-\lambda_g D_g) \tag{1}$$

angenommen, wobei N_{0g}=4×10^6 m^{-4} konstant ist (z.B. RUTLEDGE und HOBBS 1984). Um die Größenverteilung der Regentropfen in konvektiven Situationen besser zu beschreiben, wurde diese auf eine Gamma-Verteilung geändert

$$f_r(D_r) = N_{0,r} D_r^{\mu} \exp(-\lambda_r D_r) \tag{2}$$

mit μ = 0,5 and $N_{0,r}$ = 3,96 x 10^7 m$^{-7/2}$. Dies bewirkt unter anderem eine reduzierte Verdunstung des Niederschlags unterhalb der Wolkenbasis.

Mit der Maschenweite von 2,8 km kann hoch reichende Feuchtkonvektion explizit simuliert werden, dies gilt jedoch nicht für die kleinskaligere flache Konvektion. Diese ist insbesondere für den Feuchtehaushalt der Grenzschicht von großer Bedeutung, da sie einen zusätzlichen Vertikaltransport von Feuchte bewirkt. Die Vernachlässigung dieses Prozesses würde deshalb im Modell zu einem zu hohen Bedeckungsgrad skaliger Grenzschichtbewölkung führen (DOMS und FÖRSTNER 2004). Im COSMO-DE wurde deshalb der Teil des Tiedtke-Schemas, der die flache Konvektion parametrisiert, als eigenständiges Schema implementiert. Hierfür ist es allerdings notwendig, eine obere Grenze für die vertikale Mächtigkeit flacher Konvektion vorzugeben: Oberhalb dieser Grenze nehmen wir an, dass die Konvektion explizit vom Modell aufgelöst wird. Im COSMO-DE ist dieser Wert derzeit durch eine Druckdifferenz Δp = 250 hPa spezifiziert. Diese pragmatische Vorgehensweise ist in der operationellen numerischen Wettervorhersage durchaus gerechtfertigt. Langfristig ist es jedoch erforderlich, eine wissenschaftlich besser fundierte Behandlung von Grenzschichtwolken und deren skalenabhängiger Parametrisierung zu entwickeln. Anstrengungen in diese Richtung werden derzeit beim DWD und an anderen Zentren unternommen.

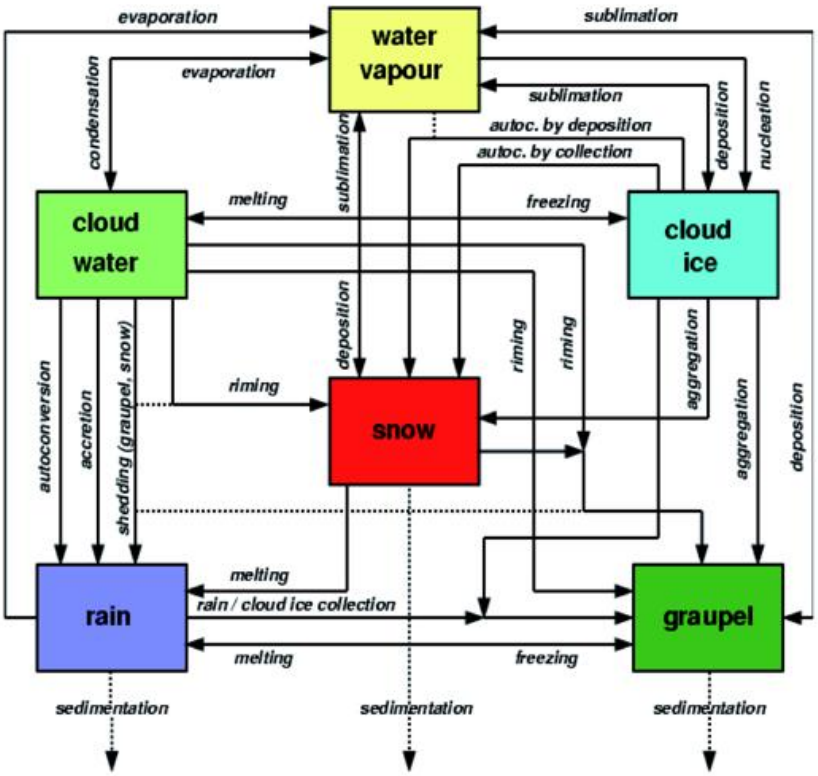


Abb. 11-2: Schematische Darstellung der prognostischen Größen und deren Wechselwirkungen im Wolkenmikrophysikschema des COSMO-DE.

Die Parametrisierung der Strahlung erfolgt im COSMO-Modell mit dem Strahlungsschema nach RITTER und GELEYN (1992). Üblicherweise wird diese Parametrisierung im COSMO-Modell nur jede Stunde aufgerufen und die Tendenzfelder werden dann zeitlich konstant gehalten. Um die Aufruffrequenz bei gleichem Rechenaufwand im COSMO-DE auf 15 Minuten zu erhöhen, wird das Strahlungsschema auf einem vergröberten Gitter, bei dem jeweils 2 x 2-Gitterpunkte gemittelt werden, aufgerufen. Die Strahlungsflüsse werden dann, entsprechend der Bodeneigenschaften, auf die einzelnen Gitterpunkte interpoliert.

Die weiteren physikalischen Parametrisierungen, wie z.B. das Grenzschichtschema sowie das Bodenmodell TERRA sind identisch mit den im COSMO-EU verwendeten Parametrisierungen (STEPPELER et al. 2003, DOMS und SCHÄTTLER 2004).

3 Datenassimilation

Die Bestimmung des Anfangszustandes einer numerischen Wettervorhersage ist die Aufgabe der Datenassimilation. Hierfür werden Beobachtungen der atmosphärischen Bedingungen in geeigneter Weise mit dem Modellzustand verknüpft, um ein möglichst genaues Abbild der Atmosphäre zu gewinnen. Es ist davon auszugehen, dass erst dadurch eine gute Vorhersagequalität erreicht werden kann. Je nach Auflösung eines Vorhersagemodells müssen andere Skalen durch das Assimilationsverfahren beeinflusst werden.

Für das COSMO-DE werden neben den konventionellen Beobachtungen von Druck, Temperatur, Wind und Feuchte, die mit Hilfe von Bodenmesssystemen, Radiosonden und Flugzeugmessungen erfasst werden, auch Fernerkundungsdaten des Deutschen Radarverbundes in der Datenassimilation verarbeitet. Die konventionellen Daten werden mit Hilfe des sogenannten Nudging-Verfahrens assimiliert. Hierbei wird das numerische Modell durch Anbringung kleinster Inkremente in den prognostischen Größen in Richtung der Beobachtung gezogen. Da die räumliche und zeitliche Auflösung dieser Beobachtung im allgemeinen viel gröber ist als die des Modells, müssen die lokal bestimmten Inkremente in Raum und Zeit interpoliert werden. Hierdurch werden die größeren Skalen des Modells initialisiert. Im Gegensatz dazu liegen die Radardaten in einer hohen räumlichen Auflösung vor. Zurzeit werden nur die gemessenen Reflektivitäten aus dem so genannten "precipitation scan" der Radargeräte verwendet. Diese werden zunächst in Regenraten umgewandelt, welche dann im Assimilationsverfahren mit den Niederschlagsraten des Modells verglichen werden. Im Gegensatz zu den anderen Beobachtungsgrößen kann dabei kein direktes Anpassen des Modells an die Beobachtungen erfolgen, sondern es wird die latente Wärme des Modells in der Art beeinflusst, dass die modellierten Niederschläge besser mit den beobachteten übereinstimmen (STEPHAN et al. 2008). Einfach gesprochen, wird an Modellgitterpunkten mit zu geringem Niederschlag

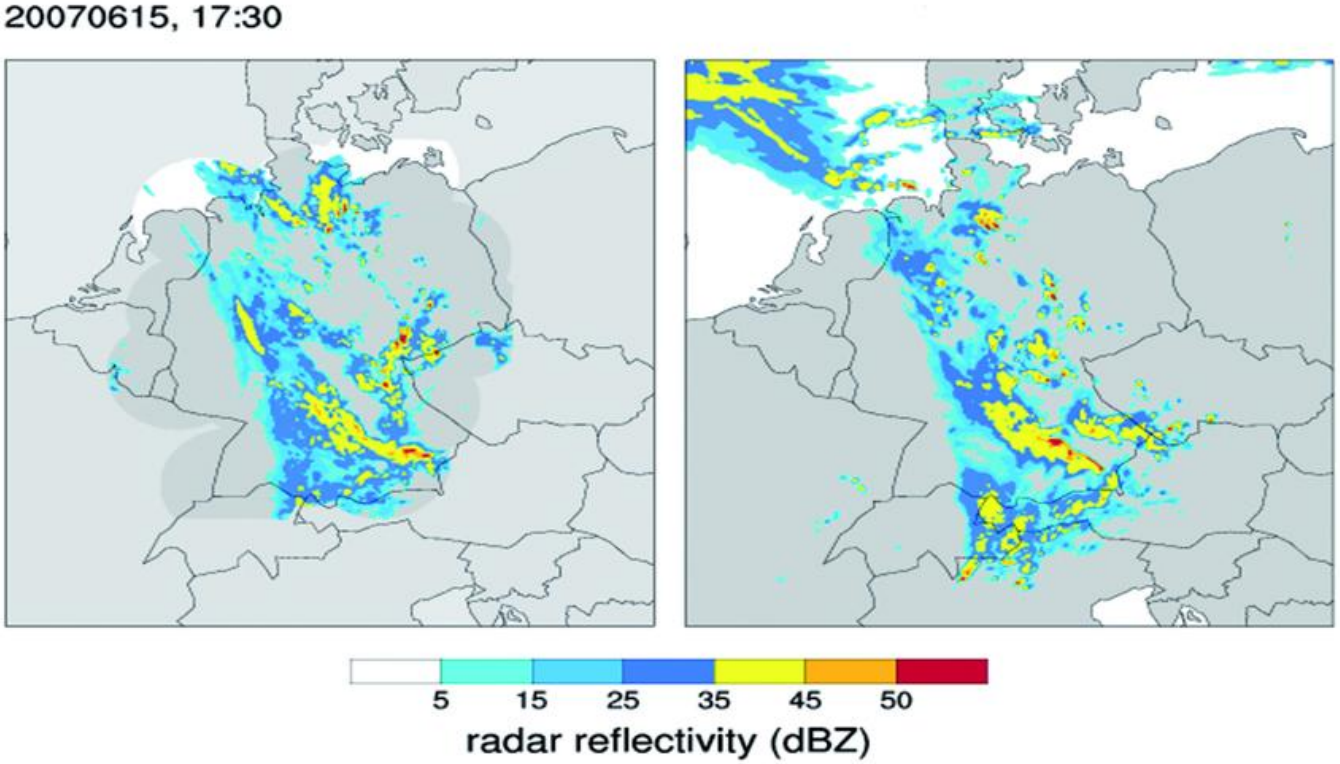


Abb. 11-3: Radarreflektivitätsfaktor gemessen vom DWD-Radarverbund (*links*) und simuliert auf Basis der COSMO-DE Vorhersage von 00 UTC (*rechts*) für den 15. Juni 2007 17.30 UTC.

Wärme eingefügt, während Modellgitterpunkte mit zu hohem Niederschlag gekühlt werden. Hierdurch werden konvektionsähnliche Mechanismen ausgelöst, die dann zur Bildung von Wolken und Niederschlag im Modell führen. Das COSMO-DE kann somit auf seiner konvektiven Skala beeinflusst und nahe an die Realität gebracht werden.

Der Einfluss der Assimilation der Radardaten auf die Vorhersagegüte lässt sich bis zu einigen Stunden lang in der freien Vorhersage nachweisen. Eine erfolgreiche Datenassimilation ist somit ein wichtiger Ausgangspunkt für eine gute Vorhersagequalität.

Die derzeitigen Nudging-Verfahren sind in der Lage, zeitlich und räumlich hochaufgelöste Daten zu assimilieren. Ein Nachteil ist jedoch, dass physikalische Zusammenhänge und Korrelationen zwischen verschiedenen Modellgrößen nur in sehr begrenztem Maße berücksichtigt werden können. Langfristig sollen deshalb die Nudging-Verfahren im COSMO-DE durch sogenannte Ensemble Kalman Filter Methoden abgelöst werden.

In den letzten Jahren haben viele Wetterdienste derartige Modelle entwickelt und zum Teil auch bereits in eine operationelle Anwendung überführt. Das britische Met Office hat vor kurzem sein „unified model" mit einer horizontalen Gittermaschenweite von 1,5 km in Betrieb genommen. Der französische Wetterdienst MeteoFrance hat nun ebenfalls sein AROME-Modell mit einer Gittermaschenweite von 2,5 km erfolgreich in Betrieb genommen. Das COSMO-Modell selbst wird außerdem von MeteoSchweiz und Italien in einer konvektionsauflösenden Version mit vergleichbaren Modelleinstellungen wie im DWD verwendet.

Bei den dabei verwendeten Modellgittermaschenweiten stellt sich die Frage, ob hochreichende Konvektion überhaupt schon gut genug aufgelöst wird. Das COSMO-DE folgt dabei den mit dem WRF-Modell gemachten Erfahrungen, dass die Nachteile von Konvektionsparametrisierungen größer sind als die Schwächen einer noch ungenügenden Auflösung. Das „unified model" mit 4 km Gittermaschenweite verzichtet demgegenüber jedoch nicht komplett auf eine Konvektionsparametrisierung, sondern verwendet diese abgeschwächt weiter. In der 1,5 km-Version wird jedoch ebenfalls die Parametrisierung komplett abgeschaltet. Das mit dem AROME verwandte ALARO-Modell verwendet eine extra entwickelte Konvektionsparametrisierung für diesen Skalenbereich (GERARD et al. 2009).

Eine abschließende Bewertung zu dieser Frage gibt es momentan noch nicht, jedoch sind die im folgenden dargestellten Beispiele ein Beleg dafür, dass der voll explizite Ansatz gute Vorhersagen liefern kann.

4 Fallstudien und Erfahrungen mit COSMO-DE

Das konvektionsauflösende COSMO-DE ist in der Lage, konvektive Wetterlagen in einer nahezu realistischen Art und Weise zu simulieren. So werden nicht nur größere konvektive Systeme erfasst, sondern das Modell

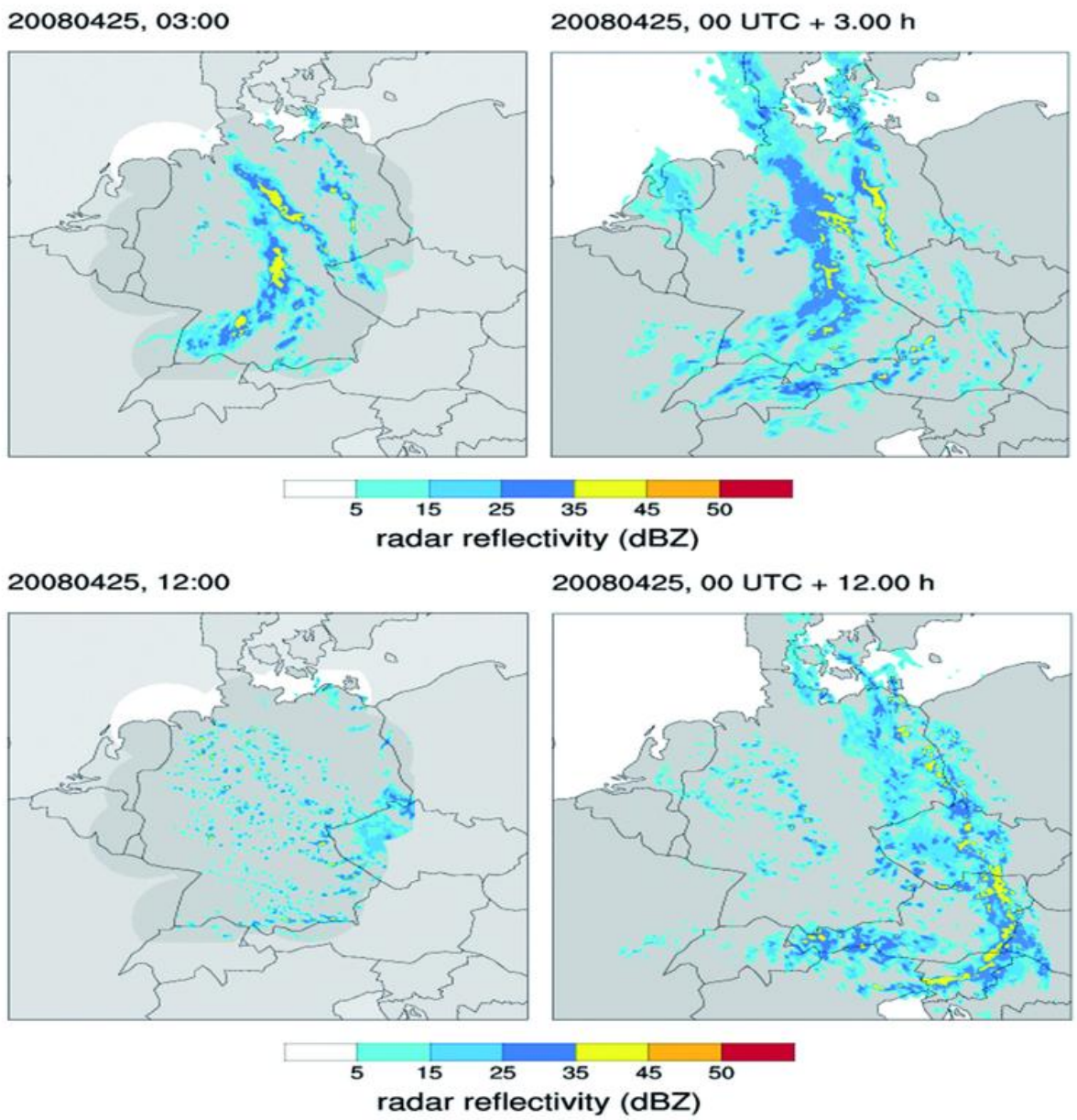


Abb. 11-4: Radarreflektivitätsfaktor gemessen vom DWD-Radarverbund (links) und simuliert auf Basis der COSMO-DE Vorhersage von 0 UTC (rechts) für den 25. April 2008 3.00 UTC (oben) und 12:00 UTC (unten).

kann einzelne konvektive Zellen explizit simulieren. Diese realitätsnahe Simulation wird z.B. deutlich, wenn man sich künstlich erzeugte Radarbilder betrachtet. In Abbildung 11-3 sind die Beobachtungen, hier das Reflektivitäts-Komposit des DWD-Radarverbundes, für den 15. Juni 2007, 17.30 UTC der COSMO-DE Vorhersage von 0 UTC des gleichen Tages gegenübergestellt. Die Wetterlage war charakterisiert durch eine Kaltfront, die von starker präfrontaler Konvektion begleitet war. Das Modell ist prinzipiell in der Lage, eine derartige Situation zu erfassen und simuliert auch die Entwicklung präfrontaler langlebiger Einzelzellen und konvektiver Systeme. Eine genaue raum-zeitliche Zuordnung einzelner Konvektionszellen ist allerdings nicht möglich. Hier ist die Vorhersagbarkeit naturgemäß äußerst begrenzt, da der Vorhersagezeitraum mit etwa 21 Stunden schon sehr viel größer ist als die Lebensdauer einzelner Zellen und auch sehr viel größer als die charakteristische Zeitskala für das Fehlerwachstum in konvektiven Situationen.

Ein weiteres Beispiel ist der 25. April 2008, der, wiederum anhand von Radarreflektivitäten, in Abbildung 11-4 dargestellt ist. Während der Nacht vom 24. zum 25. April 2008 überquerte eine Frontalzone Deutschland, deren Niederschlagsbänder in den Radarreflektivitäten von 3 UTC klar erkennbar sind. Diese Front und die einzelnen Niederschlagsbänder werden von COSMO-DE in Intensität und Struktur sehr gut erfasst. Erkennbar ist eine leichte Überschätzung der Radarreflektivitäten, was jedoch im Rahmen der Modellfehler beziehungsweise -annahmen der Reflektivitätsberechnung liegt. Am folgenden Tag führte die Advektion kalter Nordseeluft in weiten Teilen Deutschlands zur Entwicklung von relativ kleinskaligen Konvektionszellen, die aber durchaus etwas Niederschlag ergaben und so auch im

Radarbild sichtbar sind. Prinzipiell läuft genau dies auch im Modell ab, es bildet sich im Tagesverlauf Konvektion aus, allerdings sind die einzelnen Zellen in ihrer horizontalen Skala deutlich zu groß. Dies ist sehr wahrscheinlich durch die für diese Phänomene doch relativ grobe Maschenweite begründet, die nicht ausreicht, um die Dynamik dieser kleinskaligen Konvektionszellen korrekt aufzulösen. Dies führt dazu, dass die Prozesse auf die kleinste im Modell darstellbare Skala transferiert werden.

Generell zeigt COSMO-DE häufig gute Vorhersagen konvektiver System, insbesondere wenn die hochreichende Konvektion durch größerskalige Systeme, wie z.B. Fronten, ausgelöst wird. Auch prä- oder postfrontale Konvergenzlinien werden oft gut erfasst.

5 Verifikation der COSMO-DE-Vorhersagen

Modelle mit einer horizontalen Auflösung des COSMO-DE erfordern neben den traditionellen Verifikationsmethoden (DAMRATH 2002) erweiterte Verfahren, die insbesondere bei meteorologischen Variablen mit hoher zeitlicher und räumlicher Variabilität von Bedeutung sind. Der Grund hierfür ist darin zu sehen, dass die bei grob aufgelösten Modellen üblichen Verfahren, bei denen Vorhersagen an einzelnen Gitterpunkten mit den korrespondierenden Beobachtungen oder Analysewerten verglichen werden, für fein aufgelöste Modelle mitunter versagen, weil beobachtete und vorhergesagte Ereignisse zwar in unmittelbarer Nähe lokalisiert sein können, wegen der hohen Modellauflösung jedoch auch um nur wenige Gitterpunkte auseinander liegen. Es kann in einem solchen Fall davon ausgegangen werden, dass die Vorhersage ein brauchbares Signal für das interessierende Phänomen geliefert hat, das auch praktisch verwertet werden kann, obwohl die Vorhersage nicht „Gitterpunkts"- genau gewesen ist. Das beste Beispiel hierfür ist das Auftreten konvektiven Niederschlags. Die stochastische Komponente der Konvektion kann von einem deterministischen Modell generell nicht erfasst werden. Immerhin gelingt aber mit dem COSMO-DE, die aus der Konvektion resultierenden Strukturen in vielen Fällen realitätsnah zu modellieren. Im Fall der nicht exakt übereinstimmenden Lage des vorhergesagten und des beobachteten Ereignisses wird bei der traditionellen Vorgehensweise das Modell doppelt bestraft. Dort, wo das Ereignis stattgefunden hat und nicht vorhergesagt wurde und dann - vielleicht nur 40 km entfernt - wo es vorhergesagt aber nicht beobachtet wurde (vergleiche MICHAELIDES, 2008, Seiten 429 ff.). Um das hierbei sinnvoll zu verwertende Signal zu verifizieren, wurde eine Vielzahl von Methoden entwickelt (EBERT 2008). Das Prinzip dieser Methoden besteht darin, ausgehend von der kleinsten möglichen Schrittweite (ein Gitterpunkt) schrittweise immer größere Gebiete zu betrachten, über diese Gebiete geeignete Mittelungen vorzunehmen oder Gebietsanteile des interessierenden Ereignisses zu berechnen und diese dann in einem Gütemaß auszudrücken. Mittelt man Vorhersagen und Beobachtungen über eine gewisse Anzahl von Gitterboxen - dieses Verfahren wird als „upscaling" bezeichnet -, so kann man die daraus resultierenden Werte wie kategorische Wetterelemente behandeln und sie mit den dabei üblichen Methoden verifizieren. Neben der Abhängigkeit vom Schwellenwert kann dann aber auch die Abhängigkeit von der Größe der jeweiligen Schrittweite festgestellt werden. Häufig wird dazu der „**e**quitable **t**hreat **s**core" (ETS)

$$ETS = \frac{H - H_{REF}}{H + M * F - H_{REF}} \tag{3}$$

verwendet. Ein ETS von 1 beschreibt eine ideale Vorhersage. Den Wert 0 erhält man, wenn die Vorhersage mit der Zufallsprognose identisch ist.

Die Bedeutung von H, M und F ist in der folgenden Tabelle 11-2 dargestellt. H (Hits) sind die richtigen Vorhersagen für das "JA"-Ereignis, Z die richtigen Vorhersagen für das "NEIN"-Ereignis. M sind die verpassten Ereignisse, F die falschen Alarme.

Als Referenzwert für die Hits H_{REF} kann das Klima, die Persistenz oder der Stichprobenzufallswert verwendet werden. Dieses Stichprobenklima ist gegeben durch.

$$H_{REF} = \frac{(H + M) * (H + F)}{H + Z + M + F} \tag{4}$$

Betrachtet man dagegen die Häufigkeit, mit der das interessierende Ereignis in Gitterboxen unterschiedlicher Größe auftritt, so lässt sich das folgende Gütemaß (ROBERTS und LEAN 2008) definieren:

$$FSS = 1 - \frac{\sum (p(f) - p(o))^2}{\sum (p(f)^2 + p(o)^2)} \tag{5}$$

p(f) ist die vorhergesagte Häufigkeit des Ereignisses in der Gitterbox, p(o) die des beobachteten. Ein FSS von 1 kennzeichnet eine ideale Vorhersage. Sowohl aus dem upscaling als auch bei Verwendung des FSS (**f**ractions **s**kill **s**core) lässt sich dann feststellen, für welchen Schwellenwert bzw. für welche Boxgröße die Vorhersagen typische Fehler aufweisen.

Aus der Vielzahl der operationell erzeugten Verifikationsergebnisse können hier nur einige Beispiele gezeigt werden. In der Abbildung 11-5 ist der zeitliche Verlauf des mittleren Fehlers der Temperatur für unterschiedliche Höhenbereiche für die 12-Stunden-Vorhersage im Zeitraum März 2007 bis Juni 2009 dargestellt. Man erkennt im Höhenbereich zwischen 150 hPa und 300 hPa

	Beobachtung "JA"	Beobachtung "NEIN"
Vorhersage "JA"	*H*	*F*
Vorhersage "NEIN"	*M*	*Z*

Tab. 11-2: Kontingenztafel.

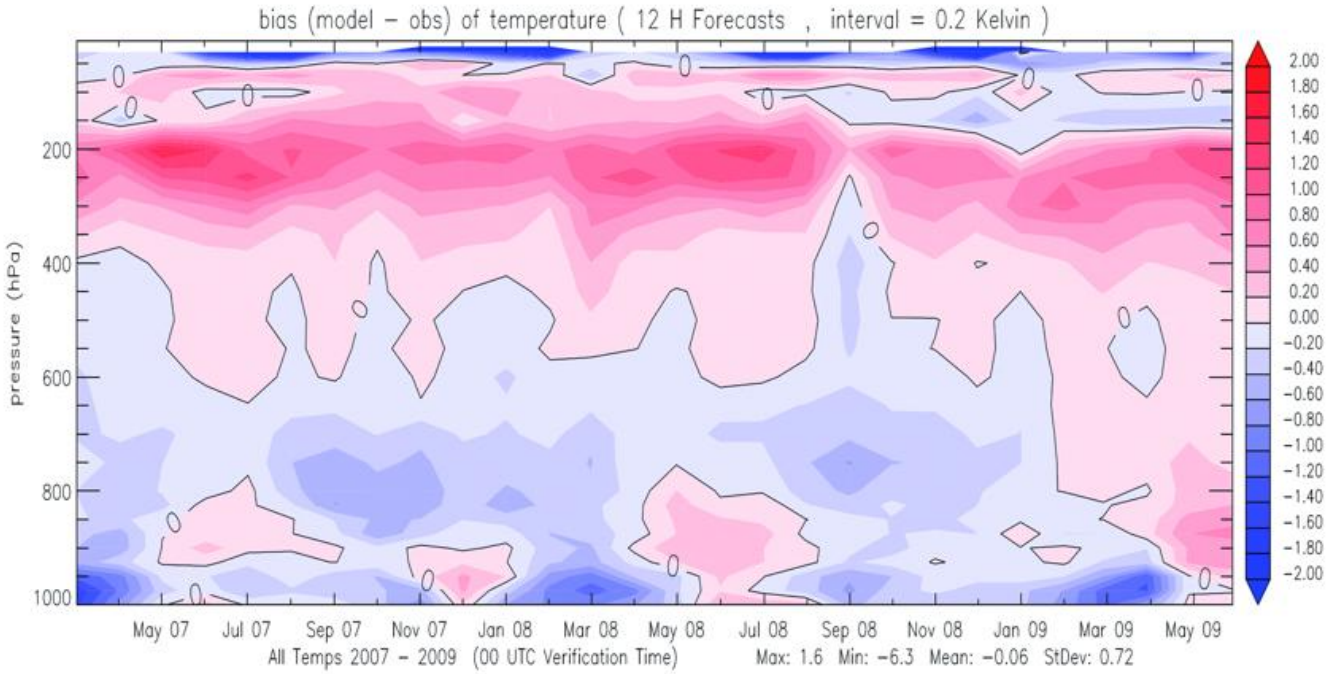


Abb. 11-5: Zeitlicher Verlauf des mittleren Fehlers der Temperatur für unterschiedliche Höhenbereiche für die 12-Stunden-Vorhersage für den Zeitraum März 2007 bis Juni 2009.

einen ausgeprägten positiven mittleren Fehler (Bias), der einen Jahresgang aufweist, mit Maximalwerten in den Sommerhalbjahren bis +1,6 K, in den Winterhalbjahren werden etwa +0,8 K erreicht.

Im Höhenbereich von 300 hPa bis etwa 800 hPa treten bis Anfang 2009 nur relativ kleine, überwiegend negative Werte des mittleren Fehlers auf, im Jahr 2009 dagegen bis Juni fast nur kleine positive Werte, das heißt dieser Höhenbereich wird vom Modell im Monatsmittel hinsichtlich der Temperatur gut erfasst.

In der Grenzschicht ist der Jahresgang im mittleren Fehler wieder ausgeprägter, hier fallen vor allem die Minimalwerte unter -1 K im März/April auf, dies deutet auf eine Überschätzung der nächtlichen Abkühlung im Frühjahr hin. Insgesamt wird das Verhalten des Modells hinsichtlich der Vertikalstruktur der Temperatur überwiegend vom übergeordneten COSMO-EU beeinflusst.

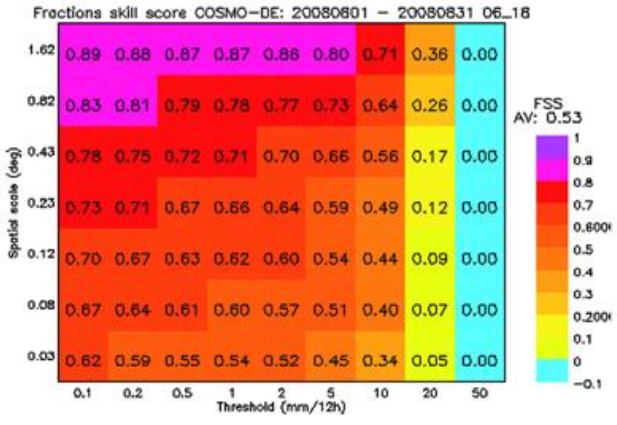


Abb. 11-6: „Fractions skill score" für Vorhersagen des COSMO-DE im August 2008, Vorhersagezeit 06 bis18 Stunden.

Die Abbildungen 11-6 und 11-7 zeigen den fractions skill score und den ETS nach der Upscaling-Methode für Vorhersagen im August 2008. Aus beiden Abbildungen geht hervor, dass die Vorhersagequalität des Modells bei großen Gitterboxen und kleinen Niederschlagssummen am besten ist, für Niederschlagswerte bis zu 10 mm $(12h)^{-1}$ selbst für eine Gitterboxgröße von 0.4° sinnvoll zu interpretierende Vorhersagen erzeugt werden können (FSS > 0.5) und für Niederschlagswerte über 20 mm $(12h)^{-1}$ die Grenzen der Vorhersagbarkeit erreicht sind.

6 Experiment zur Grenzschichtparametrisierung

Die Erfahrung im ersten Jahr des operationellen Einsatzes von COSMO-DE zeigte sehr schnell, dass es, obwohl COSMO-DE in vielen Fällen gute Vorhersagen lieferte, auch immer wieder zu eklatanten Fehlvorhersagen kam.

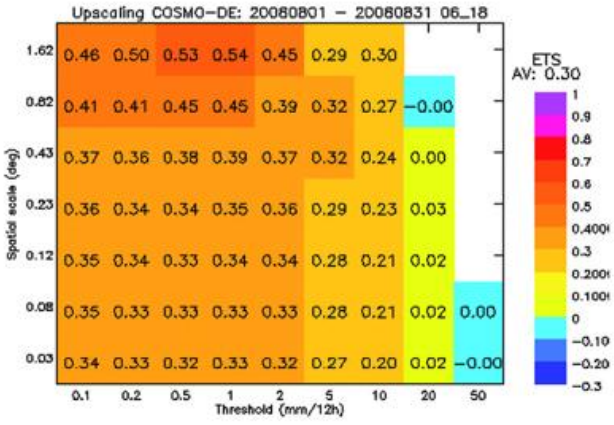


Abb. 11-7: „Equitable threat score" nach dem „upscaling"-Verfahren für Vorhersagen des COSMO-DE im August 2008, Vorhersagezeit 06 bis18 Stunden.

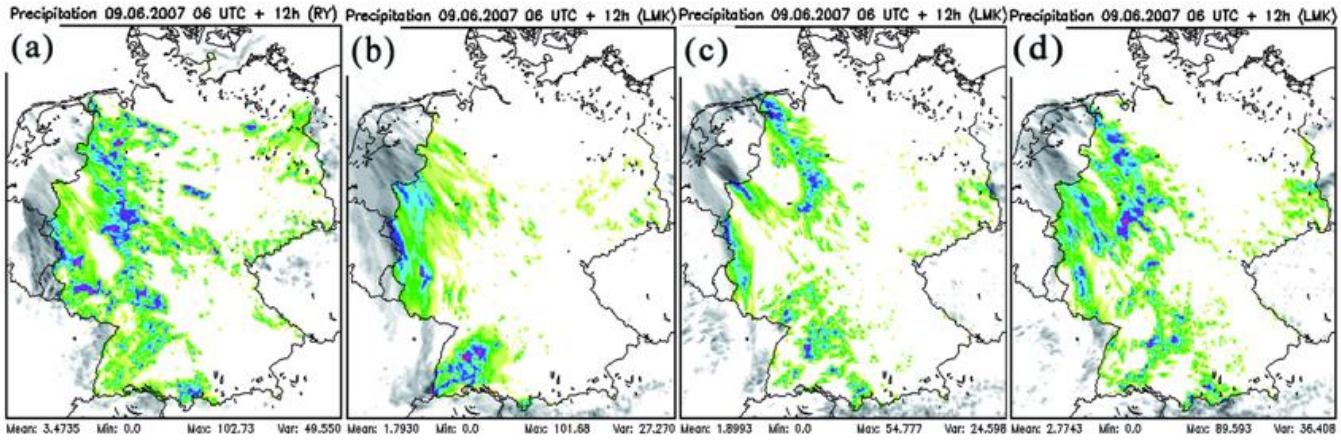


Abb. 11-8: Akkumulierte Niederschlagshöhe für den 9. Juni 2007, 06 UTC bis 18 UTC. DWD-Radarkomposit (a), 00 UTC + 18 h COSMO-DE Vorhersage (b), COSMO-DE mit reduzierter Längenskala l_∞ (c), COSMO-DE mit reduzierter Längenskala l_∞ und subskaligem Wolkenschema nach SOMMERIA und DEARDORFF (1977) (d).

Meist waren dies Situationen, in denen die Auslösung der Konvektion nicht richtig erfasst wurde, was dann zu einem völligen Fehlen der entsprechenden konvektiven Systeme und deren Niederschlag in COSMO-DE führte. Besonders häufig trat dies in Situationen mit nur schwachem synoptischen Antrieb auf. Ein Beispiel für eine derartige Fehlvorhersage aus dem Jahr 2007 ist der 6. Juni: An diesem Tag führte eine Konvergenzlinie über Nordwestdeutschland, die sich mehrere hundert Kilometer vor einer über Belgien liegenden Frontalzone bildete, zur Entstehung intensiver konvektiver Zellen. Diese linienhaft organisierten Konvektionszellen ergaben lokal über 100 mm Niederschlag in 12 Stunden. In Abbildung 11-8 sind die 12-stündigen Niederschlags-akkumulationen des DWD-Radarverbundes und des damals operationellen COSMO-DE dargestellt. Gezeigt sind außerdem die Resultate zweier COSMO-DE Simulationen mit geänderter Grenzschichtparametrisierung, die im Folgenden diskutiert werden.

Gerade bei Wetterlagen mit schwachem synoptischem Antrieb ist die Struktur der atmosphärischen Grenzschicht und deren zeitliche Entwicklung von größter Bedeutung für die Auslösung hochreichender Konvektion. Im Vergleich zu den bisherigen Wettervorhersagemodellen, wie z.B. dem gröbermaschigen COSMO-EU, stellt ein Modellsystem wie COSMO-DE dabei sehr viel höhere Anforderungen an eine gute Simulation der Grenzschichtentwicklung, da es die Auslösung der Konvektion explizit simulieren muss, und nicht wie COSMO-EU parametrisiert. Während COSMO-EU auch in einer stabil geschichteten Grenzschicht konvektiven Niederschlag simulieren kann, da Konvektionsschema und Grenzschichtschema nur schwach interagieren, ist dies in COSMO DE nicht möglich. Eine korrekte Vorhersage hoch reichender Konvektion ist in COSMO-DE nur möglich, wenn auch die Grenzschichtprozesse gut simuliert werden.

Das COSMO-Modell verwendet eine Grenzschichtparametrisierung, die auf einer prognostischen Gleichung für die **t**urbulente **k**inetische **E**nergie (TKE) basiert. Wie z.B. von SKAMAROCK und KLEMP (2008) diskutiert wird, bestehen prinzipielle Probleme bei Modellen mit 1 bis 4 km Maschenweite, da einige Annahmen der Grenzschichtparametrisierung nicht mehr gut erfüllt sind. Außerdem kommt hinzu, dass das im COSMO-Modell implementierte Grenzschichtschema nicht speziell für die konvektive Skala entwickelt, sondern im Gegenteil, seit etwa 10 Jahren kontinuierlich an die Anforderungen eines größerskaligen Modells (LM beziehungsweise COSMO-EU) angepasst wurde.

Prinzipiell muss in jeder Grenzschichtparametrisierung, die nur eine TKE-Gleichung verwendet, eine charakteristische Längenskala der Turbulenz spezifiziert werden, die sowohl zur Parametrisierung diverser Terme in der TKE-Gleichung notwendig ist, als auch zur Berechnung der Diffusionskoeffizienten selbst. Im COSMO-Modell wird für diese Längenskala ℓ der Ansatz nach Blackadar-Deardorff verwendet:

$$\ell = \frac{\chi z \ell_\infty}{\chi z + \ell_\infty} \tag{6}$$

Dabei ist z die Höhe über Grund, χ die von-Karman-Konstante und ℓ_∞ die sogenannte asymptotische Mischungsweglänge. Letztere ist im COSMO-Modell üblicherweise auf 200 m gesetzt. Reduziert man die turbulente Längenskala, so ergeben sich sowohl kleinere Diffusionskoeffizienten als auch niedrigere Werte für die TKE. Abbildung 11-8 (c) zeigt den akkumulierten Niederschlag einer COSMO-DE Simulation mit $\ell_\infty = 60m$. Dieser Wert kann z.B. durch das klassische Leipziger Windprofil motiviert werden (DETERING und ETLING 1985). Offensichtlich führt die Änderung der Grenzschichtparametrisierung dazu, dass nun tatsächlich eine ausreichend starke Konvergenzlinie entsteht, die dann hoch reichende Konvektion auslösen kann.

Eine weitere Verbesserung der Simulationsergebnisse für diesen Termin erzielt man durch eine Änderung der subskaligen Bewölkung im Grenzschichtschema. Das COSMO-Modell verwendet hier ein statistisches Wolkenschema nach SOMMERIA und DEARDORFF (1977), jedoch wurden nicht die dort vorgeschlagenen Parameterwerte verwendet, sondern eine Konfiguration, die deutlich mehr subskalige Wolken ergibt. Reduziert man dies auf die ursprünglichen Parameter-

werte nach SOMMERIA und DEARDORFF (1977), so erhält man das in Abb. 11-8 (d) dargestellte Ergebnis. Insbesondere im Vergleich mit der operationellen Vorhersage ist damit insgesamt eine dramatische Verbesserung erzielt. Dies zeigt sehr deutlich die Wichtigkeit der Grenzschichtparametrisierung für eine gute Simulation der hoch reichenden Konvektion in COSMO-DE. Die hier an nur einem Fall demonstrierten Sensitivitäten konnten auch in längeren Tests mit COSMO-DE und voller Datenassimilation über zwei Sommerperioden 2007 und 2008 bestätigt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit COSMO-DE hat der Deutsche Wetterdienst als einer der ersten nationalen Wetterdienste ein konvektionsauflösendes numerisches Modell operationell eingeführt. Wie bereits von Anfang des Entwicklungsprojekts an abzusehen war, genügte dabei nicht einfach die Abschaltung der Parametrisierung für hoch reichende Konvektion. Wie in den vorigen Abschnitten dargestellt, waren Neuentwicklungen in den Bereichen Numerik, Wolkenphysik, flache Konvektion und Datenassimilation von Nöten. Selbst bei der Verifikation des Modells stellte sich heraus, dass die konventionellen Verfahren mittels punktweiser Scores nicht mehr ausreichend waren.

Die in Kapitel 5 diskutierten Änderungen an der Grenzschichtparametrisierung waren jedoch nicht von vornherein absehbar, sondern deren Notwendigkeit konnte erst nach einiger Zeit im operationellen Betrieb erkannt werden. Sie wurden nach etwa eineinhalb Jahren am 9. September 2008 operationell eingeführt. Erste Erfahrungen izeigen eine deutliche Verbesserung der Vorhersagen für hoch reichende Konvektion. Die Beispiele zeigen, dass der Ansatz, auf dieser Modellskala ganz auf eine Konvektionsparametrisierung zu verzichten, erfolgreich ist. Weitere Arbeiten an der Numerik, Datenassimilation und Modellphysik des COSMO-DE sind aber zwingend erforderlich, um das Potential des erst seit knapp zwei Jahren operationellen Modells voll auszuschöpfen. So wird am DWD derzeit eine neue Grenzschicht-parametrisierung entwickelt, die durch eine zusätzliche prognostische Gleichung für die Varianz der potentiellen Temperatur eine bessere Beschreibung insbesondere der konvektiven Grenzschicht erreichen soll.

Da COSMO-DE als deterministisches Modell nur eine Realisierung des stochastischen Prozesses „Konvektion" ergibt, ist es nicht überraschend, dass einzelne Simulationen für den gleichen Zieltermin durchaus deutliche Unterschiede ergeben können. Am Deutschen Wetterdienst wird daher seit einiger Zeit an der Entwicklung eines Ensemble-Vorhersagesystems auf Basis des COSMO-DE gearbeitet. Ab Ende 2010 sollen zunächst 20 Vorhersageläufe pro Starttermin dem Vorhersagemeteorologen damit Information über die Vorhersagbarkeit einer Wettersituation geben. Für den operationellen Einsatz ab voraussichtlich 2012 werden schließlich etwa 40 Ensemblemember jeweils parallel gerechnet werden. Eine Einführung in Ensemblevorhersagen geben THEIS und GEBHARDT in diesem Heft.

Da man, wie gezeigt, mit einer horizontalen Auflösung von 2,8 km die Feinstrukturen von konvektiven Zellen noch nicht simulieren kann, liegt es nahe, die Auflösung zu erhöhen. Dies führt aber bekanntlich zu einer enormen Steigerung des Rechenaufwandes: bei einer Verdopplung der horizontalen Auflösung ergibt das wegen der gleichzeitigen Reduzierung des Zeitschritts ungefähr einen Faktor 8 im Rechenaufwand. Beim DWD hat man der Einführung des Ensemblesystems daher Vorrang eingeräumt; die Erhöhung der horizontalen Auflösung auf etwa 1 km wird dagegen erst etwa 2015 erfolgen.

Literatur

ARAKAWA, A., 2004: The Cumulus Parameterization Problem: Past, Present, and Future. *J. Climate* **17**, 2493-2525.

BALDAUF, M., 2008: Stability analysis for linear discretisations of the advection equation with Runge-Kutta time integration. *J. Comp. Phys.* **227**, 6638-6659.

BALDAUF, M., FÖRSTNER, J., KLINK, S., REINHARDT, T., SCHRAFF, C., SEIFERT, A., STEPHAN, K., 2009: Kurze Beschreibung des Lokal-Modells Kürzestfrist COSMO-DE und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD, *Deutscher Wetterdienst* (siehe www.dwd.de/modellierung, Veröffentlichungen).

BOTT, A., 1989: A positive definite advection scheme obtained by nonlinear renormalization of the advective fluxes. *Mon. Wea. Rev.* **117,** 1006-1015.

DAMRATH, U., 2002: Verifikation von Wettervorhersagen. Promet **28**, Heft 1/2, 8-16.

DETERING, H. W., ETLING, D., 1985: Application of the ε-turbulence Model to the atmospheric boundary layer. *Boundary Layer Meteorol.* **33**, 113-133.

DOMS, G., STEPPELER, J., ADRIAN, G., 2002: Das Lokal-Modell LM. *Promet* **27**, Heft 3/4, 123-128.

DOMS, G., FÖRSTNER, J., 2004: Development of a kilometer-scale NWP-system: LMK. *COSMO Newsletter* **4**, 159-167.

DOMS, G., SCHÄTTLER, U., 2004: A description of the nonhydrostatic regional model LM. Part II: Physical parameterization. Technical report, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, available from www.cosmo-model.org/public/documentation.htm.

DONE J., DAVIS, C.A., WEISMAN, M.L., 2004: The next generation of NWP:Explicit forecasts of convection using the Weather Research and Forecast (WRF) model. *Atmos. Sci. Lett.* **5**, 110-177.

EBERT, E.E., 2008: Fuzzy verification of high resolution gridded forecasts: A review and proposed framework. *Meteorol. Appls.* **15**, 51-64.

FÖRSTNER, J., BALDAUF, M., SEIFERT, A., 2006: Courant Number Independent Advection of the Moisture Quantities for the LMK. *COSMO-Newsletter* **6**, 51-64.

HEYMSFIELD, A. J., KAJIKAWA, M., 1987: An impro-

ved approach to calculating terminal velocities of plate-like crystals and graupel. *J. Atmos. Sci.* **44**, 1088 -1099.

MAJEWSKI, D., RITTER, B., 2002: Das Global-Modell GME. *Promet* **27**, Heft 3/4, 111-122.

MICHAELIDES, S. (ed.), 2008: Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction. *Springer*, 540 pp.

RITTER, B. , GELEYN, J.-F., 1992: A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations. *Mon. Wea. Rev.* **120**, 303-325.

ROBERTS, N.M., LEAN, H.W, 2008: SCALE-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. *Mon. Wea. Rev.* **136**, 78-97.

RUTLEDGE, S. A., HOBBS, P.-V., 1984: The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cold-frontal rain bands. *J. Atmos. Sci.* **41**, 2949-2972.

SKAMAROCK, W. C., KLEMP, J.B., 2008: A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *J. Comp. Phys.* **227**, 3465-3485.

SOMMERIA, G., DEARDORFF, J., 1977: Subgrid-scale condensation in models of nonprecipitating clouds. J. *Atmos. Sci.* **34**, 344-355.

STEPPELER, J., DOMS, G., SCHÄTTLER, U., BITZER, H.-W., GASSMANN, A., DAMRATH, U., GREGORIC, G., 2003: Meso-gamma scale forecasts using the non-hydrostatic model LM. *Meteorol. Atmos. Phys.* **82**, 75-96.

STEPHAN, K., KLINK, S., SCHRAFF, C., 2008: Assimilation of radar derived rain rates into the convective scale model COSMO-DE at DWD. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **134**, 1315-1326.

TIEDTKE, M., 1983: A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.* **117**, 1779-1800.

WEISMAN, M. L., DAVIS, C., WEI WANG, MANNING, K.W., KLEMP, J.B., 2008: Experiences wit 0 36-h Explicit Convective Forecasts with the WRF-ARW Model. *Weather and Forecasting* **23**, 407-437.

WICKER, L. J., SKAMAROCK, W. C., 2002: Timesplitting methods for elastic models using forward time schemes. *Mon. Wea. Rev.* **130**, 2088-2097.

GERARD, L., PIRIOU, J.-M., BROZKOVA, R., GELEYN, J.-F., BANCIU, D., 2009 : Cloud and Precipitation Parameterization in a Meso-Gamma-Scale Operational Weather Prediction Model. *Mon. Wea. Rev.* **137**, 3960-3977

promet, Jahrg. 35, Nr. 1-3, 98-103
© Deutscher Wetterdienst 2010

B. K. REICHERT

12 AutoWARN – Automatische Unterstützung der Herausgabe von Unwetterwarnungen

AutoWARN – Automatic Support for Issuing Weather Warnings

Zusammenfassung
Die gesetzlich verankerte Aufgabe der Herausgabe von amtlichen Unwetterwarnungen ist für den Deutschen Wetterdienst von besonderer Bedeutung, die sich auch in dessen Strategie 2006-2015 wiederspiegelt. Durch Zentralisierung und Automatisierung des Warnprozess fügt sich das Verfahren AutoWARN in diese Strategie ein. AutoWARN trägt einerseits zu einer weiteren Steigerung der hohen Qualität von Vorhersageverfahren bei, auf deren Grundlage Warnungen des DWD ausgegeben werden. Andererseits bindet es verschiedenste Verfahren in einen automatisierten Warnprozess mit manueller Überwachungs- und Entscheidungsmöglichkeit durch den Forecaster ein. Es werden alle verfügbaren meteorologischen Informationen wie Beobachtungen, Radarprodukte, Nowcasting Produkte, Statistische Produkte und Modellvorhersagen mit dem Ziel zusammengeführt, automatisiert bestmögliche Warnungen vor Wettergefahren zu erstellen.

Abstract
The particular importance of issuing official weather warnings as a task specified by law is reflected by the strategy of the Deutscher Wetterdienst 2006-2015. The process AutoWARN fits in this strategy through centralization and automation of the warning process. On one hand, AutoWARN supports the improvement of high-quality forecast products as basis for warnings of DWD. On the other hand, it integrates various products in an automated warning process with manual monitoring and decision possibilities for the forecaster. It combines all available meteorological information such as observations, radar products, nowcasting products, statistical forecast products, and model forecasts with the aim of achieving an automated production of the best possible weather warnings.

1 Warum AutoWARN?

Die Herausgabe von amtlichen Warnungen vor Wettererscheinungen, die zu einer Gefahr für die öffentliche Sicherheit und Ordnung führen können, ist eine wichtige Aufgabe des Deutschen Wetterdienstes (DWD-GESETZ 2006). Wetter- und Unwetterwarnungen nehmen eine wichtige Stellung auch in der Fortentwicklung der Strategie des DWD 2006-2015 ein: „Der DWD wird die Produktion von Wettervorhersagen und Unwetterwarnungen automatisieren und in Offenbach zentralisieren. Seine Kunden berät er auch weiterhin an den regionalen Niederlassungen und setzt das Single Voice-Prinzip bei Unwetterwarnungen in Deutschland durch“ (DWD-STRATEGIE 2006). Das in den Jahren 2006-2009 entwickelte Verfahren AutoWARN unterstützt diese Strategie. Es verfolgt zwei Hauptziele:
1. Weitere Steigerung der hohen Qualität von Vorhersageverfahren, auf deren Grundlage Warnungen des DWD ausgegeben werden.
2. Einbindung der Verfahren in einen automatisierten Warnprozess mit manueller Überwachungs- und Entscheidungsmöglichkeit durch den Forecaster.

Trotz zunehmender Automatisierung im Warnprozess bleiben in AutoWARN zentrale Überwachungs- und Entscheidungsmöglichkeiten zur Ausgabe von Warnungen beim Forecaster. AutoWARN hilft dem Forecaster, die enorme Fülle zur Verfügung stehender Daten schnell genug verarbeiten zu können, um die maximale Qualität der Vorhersage zu erreichen. Es ermöglicht dem Forecaster, sich weg von vielen „technisch-administrativen“ Tätigkeiten voll auf die optimale Vorhersage im Warnwesen zu konzentrieren. AutoWARN stellt auch eine wichtige Grundlage für die Zentralisierung des Warnwesens und damit für die Bündelung der Warnkompetenz im „Nationalen Warnzentrum (NWZ)“ des DWD in Offenbach dar.

2 Übersicht Automatisiertes Warnverfahren AutoWARN

Im automatisierten Warnverfahren (Abb. 12-1) werden alle verfügbaren meteorologischen Informationen wie Beobachtungen, Radarprodukte, Nowcasting-Produkte, Statistische Produkte und Modellvorhersagen mit dem Ziel zusammengeführt, automatisiert bestmögliche Warnungen

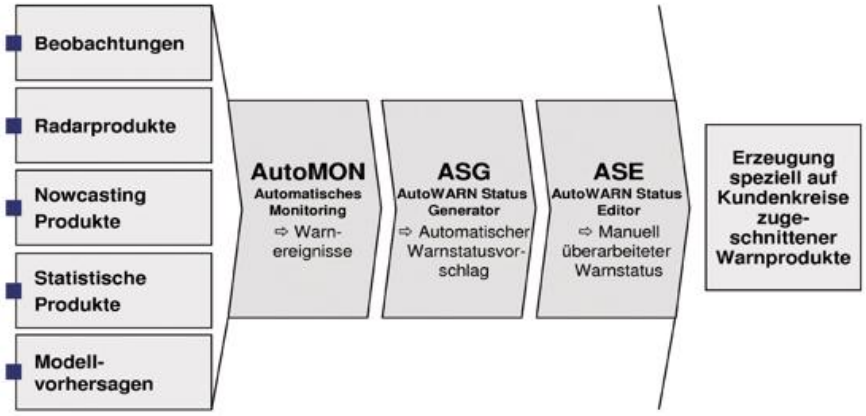


Abb. 12-1: Automatisiertes Warnverfahren AutoWARN: Zusammenführung und Verarbeitung der meteorologischen Eingangsdaten zu einem Warnstatus, manuelle Überarbeitung und Erzeugung von Warnprodukten.

vor Wettergefahren zu erstellen (REICHERT 2009). Dabei werden eingehende Daten in der Komponente AutoMON (**Auto**matisches **Mon**itoring) kontinuierlich auf warnwürdige Wetterereignisse überprüft. Anschließend bereitet die Komponente ASG (**A**utoWARN **S**tatus **G**enerator) einen Warnstatusvorschlag vor, der mit der Komponente ASE (**A**utoWARN **S**tatus **E**ditor) durch die Forecaster ständig manuell überwacht und gegebenenfalls überarbeitet wird, bevor speziell auf Kundenkreise zugeschnittene Warnprodukte erzeugt werden.

3 Eingangsdaten und -produkte für den automatisierten Warnprozess

AutoWARN ist vollständig in das meteorologische Datenverarbeitungs- und Visualisierungssystem NinJo (HEIZENREDER 2009; sowie Beitrag in diesem Heft) eingebunden. Daher kann es für die weitere Verarbeitung auf alle hier zur Verfügung stehenden Daten und Produkte zugreifen.

3.1 Beobachtungen

AutoWARN verarbeitet die dem Wetterdienst zur Verfügung stehenden Beobachtungsdaten wie SYNOP (Wettermeldungen von bemannten und automatischen Wetterstationen), METAR (Wetterbeobachtungen von Flughäfen), SPECI (Spezielle Wettermeldungen für die Luftfahrt), SWN (spezielles Sturmwarnnetzwerk), NSD (spezielles Niederschlagsdatennetz), u.a., sowie Blitzortungsdaten.

3.2 Radarprodukte

3.2.1 2d-Radarprodukte

Es werden die Radarreflektivitäten des DWD-Radarverbunds und anderer internationaler Radarstandorte (Komposits) direkt in Bezug auf warnwürdige Wetterereignisse ausgewertet. Auch die Ergebnisse des Verfahrens RADOLAN (Radargestützte Analysen stündlicher Niederschlagshöhen im Echtzeitbetrieb) können in AutoWARN eingehen. Außerdem gehen 2d-Radarprodukte indirekt über das WarnMOS-Verfahren (siehe unten) in AutoWARN ein.

3.2.2 3d-Radarprodukte

Mit dem Ziel, Hinweise auf mögliche Tornados automatisch erkennen und auswerten zu können, wurde im Rahmen des AutoWARN-Projekts ein Verfahren zur Erkennung von Mesozyklonen (hochreichend rotierende Aufwindfelder konvektiver (Gewitter-)Zellen) entwickelt (PREISS 2008). Mittels Mustererkennung werden dabei 3d-Doppler- und Reflektivitätsdaten des DWD-Radarverbunds ausgewertet. Die Qualität der zur Verfügung stehenden 3d-Radardaten konnte mit Hilfe neuer Fehlerkorrekturalgorithmen erheblich verbessert werden (HELMERT et al. 2008).

3.3 Nowcasting-Produkte

Innerhalb des AutoWARN-Projekts wurde das Zellerkennungs- und Tracking-Verfahren CellMOS (HOFFMANN 2008) im DWD eingeführt. Es handelt sich um ein statistisch abgeleitetes optimiertes Tracking-Verfahren (MOS-Verfahren). Als Datengrundlage dienen das Vorhersage-Modell GME, ein Radarkomposit, sowie Blitzortungsdaten. Es werden Wahrscheinlichkeitsfelder für die nächsten zwei Stunden zu Niederschlag, Maximale Windbö, Hagel, und Blitzrate erstellt. CellMOS dient indirekt auch der Verbesserung von Landkreiswarnungen (Gewitterwahrscheinlichkeit, Hagel, Windböen, Starkregen) durch in WarnMOS (siehe unten) integrierte Vorhersagen. Als ein robustes Gewitterortungs- und Warnprogramm steht außerdem KONRAD (KONvektionsentwicklung in RADarprodukten) in AutoWARN zur Verfügung. Zusätzlich gehen Informationen aus dem Nowcasting-Verfahren RADVOR-OP (Radargestützte, zeitnahe Niederschlagsvorhersage für den operationellen Einsatz) ein.

3.4 Statistische Produkte

Eine wichtige Grundlage für das AutoWARN-Verfahren ist das WarnMOS-System, das landkreisbezogene Wahrscheinlichkeiten für Warnereignisse auf Basis des MOS-Verfahrens (Model Output Statistics) berechnet. Es gehen SYNOP-, Radar-, und Blitzdaten sowie das GME-Modell des DWD ein. Zur weiteren Verbesserung der Qualität wurde WarnMOS im Rahmen des AutoWARN-Projekts um die Modellvorhersagen des EZMW (Europäisches Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage) erweitert.

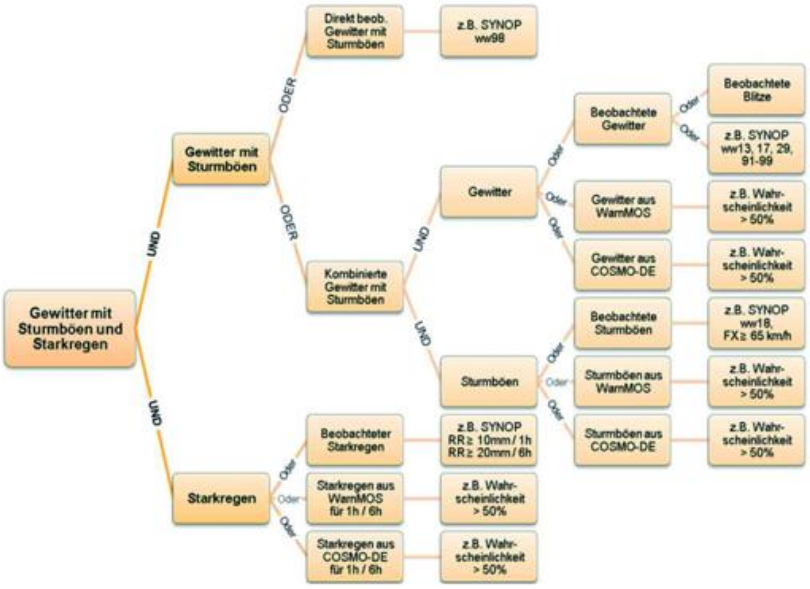


Abb. 12-2: Vereinfachte Darstellung von raumzeitlichen Verknüpfungen für das kombinierte Warnereignis „Gewitter mit Sturmböen und Starkregen" in der Komponente AutoMON.

Dieses Produkt wird als WarnMOS MIX (aus GME und EZMW-Modellvorhersagen) bezeichnet.

3.5 Modellvorhersagen der Numerischen Wettervorhersage

Neben dem indirekten Eingang von GME und EZMW-Modellvorhersagen über das WarnMOS-Produkt gehen auch die Modellvorhersagen des hoch aufgelösten, nichthydrostatischen Vorhersagemodells COSMO-DE (Auflösung 2,8 km) für Deutschland ein. Innerhalb des AutoWARN-Projekts wurden direkte Gitterpunktsaussagen im Hinblick auf warnwürdige Wetterereignisse in Wahrscheinlichkeitsfelder interpretiert, die in dieser Form Eingang in das AutoWARN-Verfahren finden. Für die nahe Zukunft ist auch die Nutzung des Ensemble-Vorhersage-Systems COMSO-DE-EPS des DWD sowie PEPS (**P**oor Mans **E**nsemble **P**rediction **S**ystem), einem Ensemble aus Vorhersagen verschiedener Wetterdienste, geplant.

4 Automatisierter Warnprozess

Der gesamte AutoWARN-Prozess ist in das meteorologische Datenverarbeitungs- und Visualisierungssystem NinJo integriert. Die Komponenten AutoMON (Kapitel 4.1) und ASG (Kapitel 4.2) sind dabei auf hochverfügbaren Server-Systemen zentral in Offenbach installiert. Die große Menge ständig einlaufender Daten und Produkte stellt hohe Anforderungen an die Hardware, weshalb sehr leistungsfähige Systeme eingesetzt werden. Die Komponente ASE (Kapitel 4.3) ist die Schnittstelle zu den Forecastern und wird als sogenannte Client-Komponente auf geeigneten PC-Systemen im Nationalen Warnzentrum in Offenbach betrieben. Im Zuge erhöhter Ausfallsicherheit ist zusätzlich ein Backup-Zentrum in Potsdam vorgesehen.

4.1 Überwachung warnwürdiger Wetterereignisse – Automatisches Monitoring (AutoMON)

In einem ersten Schritt werden alle eingehenden Daten und Produkte (Kapitel 3) auf die im DWD definierten warnwürdigen Wetterereignisse hin geprüft. Alle Gitterpunktsprodukte (z.B. Vorhersagemodell COSMO-DE, Nowcasting-System RADVOR-OP), Bild-basierte (z.B. Radarreflektivität), landkreisorentierte (z.B. WarnMOS) sowie Punktbasierte Produkte (z.B. SYNOP-Beobachtungen) werden auf Schwellwerte hin überprüft. Die Schwellwerte können sich auf direkte Messungen oder auf abgeleitete Wahrscheinlichkeiten aus verschiedenen Verfahren beziehen und werden im Einklang mit den DWD-Warnkriterien in enger Absprache mit Forecastern und Fachleitung des Geschäftsbereichs Wettervorhersage festgelegt. Dabei sind auch beliebige logische Kombinationen von Datenarten und Parametern in Raum und Zeit möglich. Für viele Warnereignisse entstehen dabei recht komplexe Baumstrukturen (Abb. 12-2). Bei der Abarbeitung in AutoMON müssen für raumzeitliche Verknüpfungen enorme Datenmengen (z.B. aus den Gitterpunktsprodukten) vorgehalten und ausgewertet werden. Bei allen Vorhersageprodukten ist es in AutoMON zusätzlich möglich, Schwellwerte individuell in Abhängigkeit vom Vorhersagezeitpunkt zu definieren. So können z.B. Wahrscheinlichkeiten für ein Warnereignis aus dem WarnMOS-Verfahren für die Vorhersage +2 Stunden mit einem höheren Gewicht als für die +48 Stunden-Vorhersage eingehen.

Insgesamt existieren Definitionen für alle, das heißt einschließlich kombinierter Warnereignisse mehr als 50 Warnereignisse des DWD. In einer Excel-Arbeitsmappe zur Definition aller Warnereignisse ergeben sich etwa 160 gefüllte Blätter.

4.2 Automatische Warnstatusvorschläge – AutoWARN Status Generator (ASG)

Die Komponente AutoMON erzeugt bei warnwürdigen Wettersituationen automatisch eine große Anzahl einzelner Warnereignisse in Raum und Zeit. Um die Anzahl der Ereignisse zu reduzieren und sie für den Forecaster in einer übersichtlichen Form aufzubereiten, werden sie in einem nächsten Schritt vom **A**uto**W**ARN **S**tatus Generator (ASG) zu zusammenhängenden „Warnstatuseinheiten" in Raum und Zeit „homogenisiert". Eine Warnstatuseinheit besteht aus Warngebiet (beliebiges freies Polygon) mit Höhenbereich, Warnereignis und Gültigkeitsdauer. Es sind drei Schritte erforderlich (Abb. 12-3):

1. Ausdehnung: Einzelne Warnereignisse (rote Sternchen in Abb. 12-3) werden in Raum und Zeit ausgedehnt, d.h.

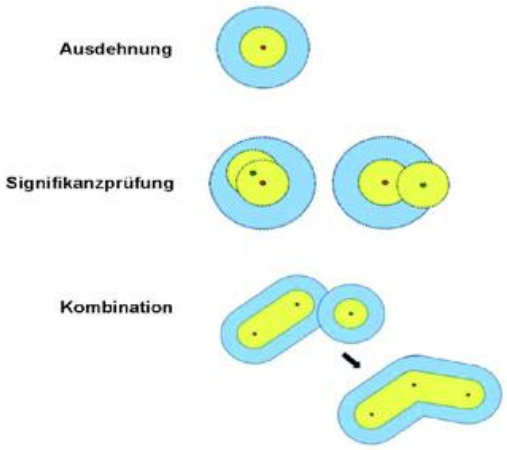


Abb. 12-3: Schematische 2d-Darstellung des Prozesses der Homogenisierung im AutoWARN Status Generator (ASG). Die Homogenisierung des Höhenbereichs und die zeitliche Homogenisierung sind nicht dargestellt.

sie sind dann für ein gesamtes ausgedehntes Gebiet (gelbe Fläche) in ihrem gesamten ausgedehnten Höhen- und Zeitintervall „gültig". Außerdem werden Toleranzbereiche für Gebiet (blaue Fläche), Höhen- und Zeitintervall festgelegt.

2. Signifikanzprüfung: Sie dient der Reduzierung der relevanten Ereignisse. Liegt ein Ereignis (grünes Sternchen) noch im Toleranzbereich eines anderen Ereignisses, dann ist es „insignifikant", das heißt es wird bereits durch das ursprüngliche Ereignis „mit abgedeckt" und braucht nicht mehr berücksichtigt zu werden. Dies ist. z.B. bei einer großen Blitzanzahl auf engem Raum von höchster Bedeutung.
3. Kombination: Überschneiden sich die Toleranzbereiche einzelner Warnstatuseinheiten (blaue Flächen), so werden sie in einem rekursiven Prozess zu einer zusammenhängenden Einheit kombiniert.

Dieser Prozess stellt dem Forecaster letztlich eine geringst mögliche Anzahl zusammenhängender Warnstatuseinheiten zur Verfügung. Das komplette Ensemble aller einzelnen Warnstatuseinheiten wird „Warnstatusvorschlag" genannt. Die erzeugten Warnstatusvorschläge aus ASG decken bei stündlicher Auflösung einen Vorhersagezeitraum von bis zu +72 Stunden ab. Ihre Qualität ist insgesamt so gut, wie es die eingehenden Verfahren (z.B. COSMO-DE Modell, Nowcasting-Verfahren, WarnMOS) mit ihren individuellen Stärken und Schwächen zulassen.

4.3 Manuelle Kontrolle und Überarbeitung der Warnstatusvorschläge – AutoWARN Status Editor (ASE)

Die durch ASG aufbereiteten Warnstatusvorschläge müssen manuell kontrolliert und ggfs. überarbeitet werden können. Dazu dient der AutoWARN Status Editor (ASE). In enger Zusammenarbeit mit Forecastern wurde eine grafische Benutzeroberfläche als ein „Layer" im Datenverarbeitungs- und Visualisierungssystem NinJo bereitgestellt (Abb. 12-4), das beliebig mit anderen in NinJo verfügbaren meteorologischen Layern kombiniert werden kann.

Rechts oben (derzeit rot markiert) befindet sich der immer aktive ASE-Indikator mit dem Zeitpunkt der letzten Aktualisierung des automatischen Wanstatusvorschlags aus ASG. Der ASE-Indikator alarmiert den Forecaster durch Rotfärbung nur dann, wenn sich der aktuelle Warnstatusvorschlag signifikant vom bereits ausgegebenen aktuellen Warnstatus unterscheidet. Wenn zum Beispiel bei einer Gewitterlage durch zusätzlich eintreffende Blitzbeobachtungen neue Warnstatuseinheiten erzeugt werden, die aber bereits durch den schon ausgegebenen Warnstatus innerhalb der Toleranzgrenzen vollständig in Raum und Zeit abgedeckt sind, so zeigt der Indikator lediglich eine Orangefärbung. Das bedeutet, es gibt zwar einen neuen, aber insignifikanten Warnstatusvorschlag.

Die Flächendarstellung des automatisch erzeugten Warnstatusvorschlags ist in der Kartendarstellung (rechte Seite) visualisiert. Der Höhenausdehnung und der Gültigkeitszeitraum der einzelnen Warnstatuseinheiten ist in einer getrennten Ansicht einsehbar (ohne Abbildung). Das Beispiel zeigt Sturmböen (gelb) sowie schwere Sturmböen (orange) in Teilen Deutschlands.

Über dem linken Teil der Kartendarstellung liegen die Filtereinstellungen. Der Forecaster kann z.B. zwischen Warnstatusvorschlag und aktuell ausgegebenem Warnstatus wechseln oder Warnstatuseinheiten, die er bereits zuvor ignoriert hat, ausblenden. Er hat die Möglichkeit, der Übersichtlichkeit halber nach Warnereignisgruppen (z.B. Böen, Gewitter, Regen), Warnkategorien (z.B. Un-

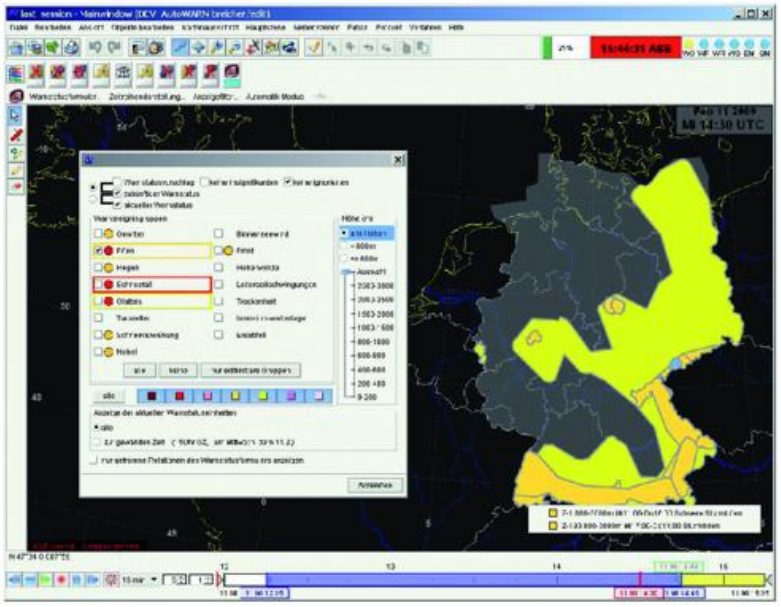


Abb. 12-4: AutoWARN Status Editor (ASE) als Layer in NinJo 1.3. Hier kann der aus ASG automatisch erzeugte Warnstatusvorschlag für ganz Deutschland vom Forecaster überwacht und gegebenenfalls verändert werden.

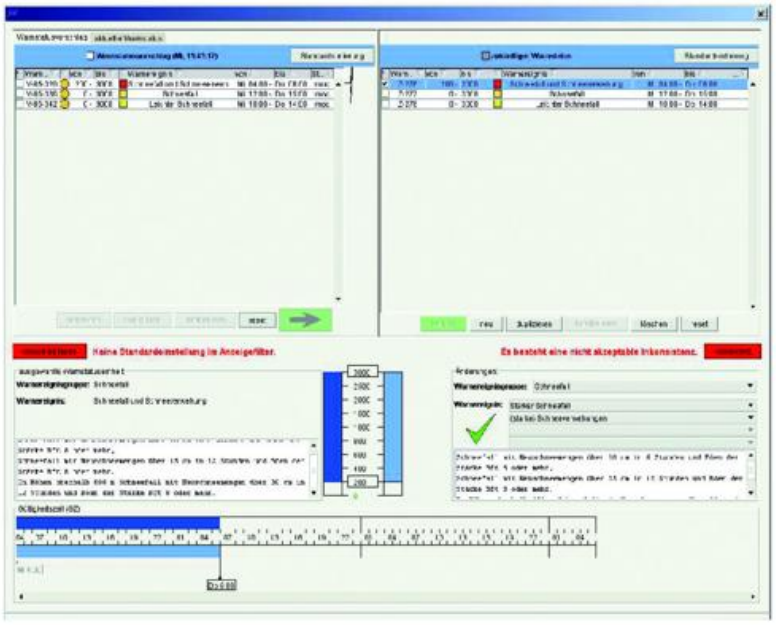


Abb. 12-5: Das Warnstatusformular im ASE erlaubt dem Forecaster weitere manuelle Eingriffe in den Warnprozess.

wetterwarnung, markante Wetterwarnung), Höhenstufen, oder Gültigkeitszeiträumen zu filtern.

Der Forecaster kann Warnstatuseinheiten in der Kartedarstellung mit verschiedenen Tools grafisch editieren. Zusätzlich steht ihm ein Warnstatusformular (Abb. 12-5) zur Verfügung, in dem er auf einen Blick die automatisch vorgeschlagenen Warnstatuseinheiten und den aktuell ausgegebenen Warnstatus erkennen kann. Es stehen Hilfsmittel zur Vereinigung, zum Löschen (das heißt ignorieren der vorgeschlagenen Einheiten) oder Duplizieren einzelner Warnstatuseinheiten bereit. Grafisch unterstützt wird auch das editieren der Zeit- und Höhenintervalle der Warnstatuseinheiten.

Wenn durch manuelle Eingriffe inkonsistente Warnstatuszustände entstehen, so wird der Forecaster durch eine ständig mitlaufende Konsistenzprüfung darauf hingewiesen. Viele entstehende Konsistenzprobleme können durch eingebaute Algorithmen bei Bedarf automatisch korrigiert werden.

4.4 Externe Erzeugung von Warnprodukten für Kunden

Ein vom Forecaster überwachter und gegebenenfalls überarbeiteter Warnstatus wird auf hochverfügbaren Datenbanken abgespeichert und steht dem außerhalb des AutoWARN-Projektes entwickelten System zur automatischen Produktion und Verteilung von Warnprodukten (PVW) zur Verfügung. Hier werden aus den Warnstatuseinheiten beliebige Kunden- und Anwendungsprodukte erzeugt und verteilt. Dadurch, dass die Warnstatuseinheiten in Raum und Zeit zunächst an keine feste Struktur gebunden sind, können über ein „Mapping"-Verfahren beliebige Gebietseinteilungen für Warnprodukte erreicht werden. Die räumliche und zeitliche Konsistenz der erzeugten Warnungen wird dabei sichergestellt. Den sogenannten Basiswarnungen des DWD, die auch im Internet veröffentlich werden (Abb. 12-6), liegt z.B. derzeit eine Gebietseinteilung in Landkreisen zugrunde.

5 Ausblick

Seit Abschluss des AutoWARN-Projekts im März 2009 befindet sich das AutoWARN-System im DWD in einer präoperationellen Testphase, in der Warnparameter weiter optimiert, unvollständige Eingangsdatenarten ergänzt und weitere Nutzerwünsche eingearbeitet werden. Dies geschieht innerhalb des Nachfolgeprojekts „WarnPROB", in dem derzeit Daten aus den Verfahren KONRAD, CellMOS und COSMO-DE ergänzt, WarnMOS als Eingangsdatenart durch objektive Verifikation verbessert und die Stabilität des Gesamtsystems für den Nutzer optimiert werden. Die geplante operationelle Nutzung von AutoWARN ist für Herbst 2011 vorgesehen.

Parallel dazu soll das AutoWARN-System im Projekt „WarnPROB" um die Analyse, Weiterverarbeitung und Ausgabe von Wahrscheinlichkeitsaussagen erweitert werden. Die Planung sieht vor, die derzeit kategorisch ausgegebenen Warnungen des Deutschen Wetterdienstes mit Wahrscheinlichkeitsaussagen zu verknüpfen, unter anderem auf Basis des Ensemble-Vorhersage-Systems COSMO-DE.-EPS. Unter Berücksichtigung der Kundenbedürfnisse könnten dann bei Bedarf Warnungen wie z.B.

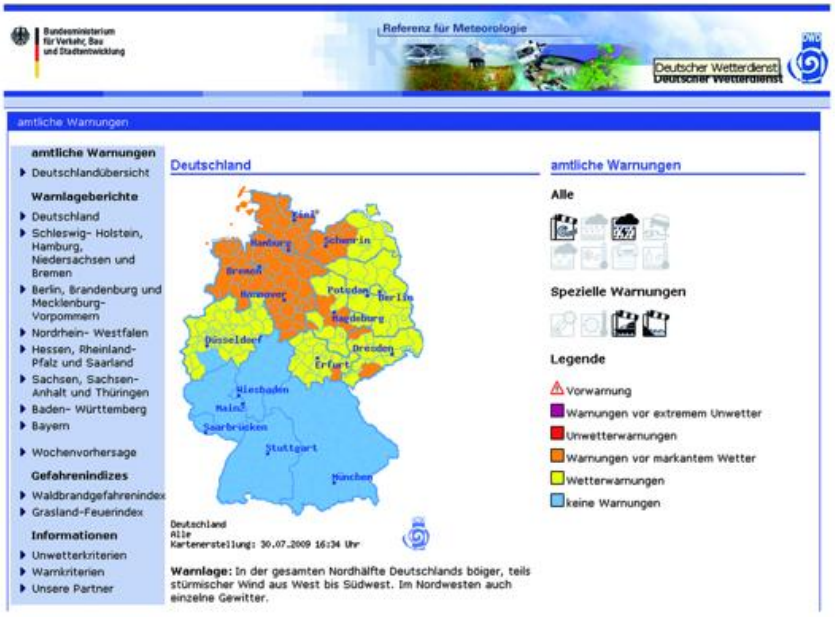


Abb. 12-6: Darstellung der ständig aktualisierten Basiswarnungen des DWD im Internet unter www.wettergefahren.de.

„Orkanböen möglich/wahrscheinlich/sehr wahrscheinlich“ erzeugt werden, die aus einem „Wahrscheinlichkeitsmix“ eingehender Produkte berechnet werden.

Danksagung

Der erfolgreiche Abschluss des AutoWARN-Projekts war nur mit Hilfe der Mitarbeiter des „Innovationsprogramms“ im DWD möglich, besonderer Dank geht daher an M. Gonder, K. Helmert, T. Hengstebeck, C.-J. Lenz, J. Paller, Z. Palmer, M. Preiss und P. Weilmünster. Aus Forschung und Entwicklung haben weiterhin D. Heizenreder, T. Hohmann, P. Joe, P. Lang, W. Peyinghaus, W. Raatz, T. Schleinzer, M. Stahlhacke, C. Stein und S. Theis beigetragen. Wertvolle Beiträge kamen auch von T. Kratzsch, R. Ullrich, H. Weingärtner und B. Zeuschner aus dem Geschäftsbereich Wettervorhersage.

Literatur

DWD-GESETZ, 2006: Gesetz über den Deutschen Wetterdienst, Bundesgesetzblatt Teil I, Jahrgang 1998 Nr. 63 (18.9.1998), S. 2871-2874, zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes vom 3. Mai 2005 (BGBl. I, S. 1224), zuletzt geändert durch Artikel 338 der neunten Zuständigkeitsanpassungsverordnung vom 31. Oktober 2006 (BGBl. I, S. 2407).

DWD-STRATEGIE, 2006: Deutscher Wetterdienst, Strategie 2006-2015, Ergebnisse. Vorstand des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, 27.11.2006.

HEIZENREDER, D., 2009: NinJo - Recent developments. 2009 EGOWS Conf., KNMI, DeBilt, Niederlande.

HELMERT, K., HENGSTEBECK, T. UND J. SELTMANN, 2008: DWD's operational tool to enhance radar data quality. 2008 ERAD Conf., Helsinki, Finnland, 30 June - 4 July 2008.

HOFFMANN, J., 2008: Entwicklung und Anwendung von statistischen Vorhersage-Interpretationsverfahren für Gewitternowcasting und Unwetterwarnungen unter Einbeziehung von Fernerkundungsdaten, Dissertation des FB Geowissenschaften, Freie Universität Berlin.

PREISS, M., 2008: Mesocyclone Detection With Doppler Radar. 2008 ERAD Conf., Helsinki, Finnland, 30 June - 4 July 2008.

REICHERT, B. K., 2009: Automatic Support for the Weather Warning Service - Introducing AutoWARN at DWD. 2009 EGOWS Conf., KNMI, DeBilt, Niederlande.

promet, Jahrg. 35, , 104-110 (März 2010)
© Deutscher Wetterdienst 2010

S. THEIS, C. GEBHARDT

13 Grundlagen der Ensembletechnik und Wahrscheinlichkeitsaussagen

Introduction to Ensemble Prediction and Probabilistic Forecasts

Zusammenfassung

Eine Wettervorhersage enthält stets Unsicherheiten. Da der Unsicherheitsgrad stark variieren kann, ist die Angabe der Vorhersageunsicherheit eine wichtige Zusatzinformation. Ensemblevorhersagesysteme haben sich als Standardmethode etabliert, um Vorhersageunsicherheiten zu schätzen und Wahrscheinlichkeitsaussagen zu erstellen. Vorgestellt werden Motivation und Grundprinzip der Ensembletechnik, aktuelle Methoden zur Ensemblegenerierung und Ensembleinterpretation, resultierende Wahrscheinlichkeitsaussagen und ihre Kommunikation.

Abstract

A weather forecast always contains uncertainties. Since the degree of uncertainty can be highly variable, the specification of forecast uncertainty is a fundamental information. Ensemble prediction systems have become a standard method in estimating forecast uncertainties and producing probabilistic forecasts. This paper introduces the motivation and principles of ensemble prediction, current methods for generating and interpreting ensembles, resulting probabilistic forecasts and their communication.

1 Ausgangslage: Unsicherheit in der Wettervorhersage

Seit über vierzig Jahren ist bekannt, dass die Atmosphäre ein chaotisches System ist, d.h. selbst kleine Unsicherheiten können rapide mit der Vorhersagedauer anwachsen und sich als deutliche Unsicherheiten in der Modellvorhersage auswirken. Unsicherheiten in der Vorhersage sind eine Tatsache, mit der die Meteorologie leben muss. Um eine perfekte Vorhersage zu erzielen, müsste jeder Prozess und jeder Zustand in der Atmosphäre genauestens bekannt sein und im Vorhersagesystem perfekt abgebildet werden.

In der Realität sind jedoch die verschiedenen Schritte im Vorhersageprozess stets mit inhärenten Unsicherheiten behaftet. Im ersten Schritt des Vorhersageprozesses wird unter Benutzung von Beobachtungen der aktuelle Zustand der Atmosphäre geschätzt und im zweiten Schritt wird die zeitliche Entwicklung dieses Zustandes mit Hilfe von numerischen Wettervorhersagemodellen berechnet. Für eine perfekte Vorhersage wäre schon bei der Schätzung des aktuellen Zustands eine Detailgenauigkeit erforderlich, die fern aller technischen Machbarkeit liegt. Außerdem müssen auch bei der Simulation der atmosphärischen Prozesse Vereinfachungen vorgenommen werden, um eine zeitkritische Berechnung der Vorhersage zu ermöglichen. Zum einen werden die zugrunde liegenden Gleichungen approximiert. Zum anderen wird die Gitterweite des Modells nicht beliebig klein gewählt. Auf Skalen kleiner als der Modellgitterweite spielen sich jedoch immer noch Prozesse ab, die einen Einfluss auf die Vorhersage haben können. Diese Prozesse beschreibt das Modell nicht mehr explizit, sondern empirisch. Dieses Vorgehen wird als Parametrisierung bezeichnet und bedeutet immer eine Vereinfachung, die von einer perfekten Prozessabbildung im Modell wegführt und Unsicherheiten einführen kann. Bei Ausschnittsmodellen wie z.B. dem COSMO-DE ist auch die Definition des seitlichen Modellrandes eine Quelle von Unsicherheiten. Die Randwertversorgung geschieht wiederum durch ein Vorhersagesystem, welches ebenfalls aus den genannten Gründen mit Unsicherheiten behaftet ist.

Die Verbesserung der Wettervorhersage ist selbstverständlich ein wichtiges Ziel von aktuellen Entwicklungstätigkeiten am DWD. In diesem Zusammenhang ist unter anderem die Entwicklung des Modells COSMO-DE zu nennen. An diesem Beispiel lässt sich erklären, wie eine signifikante Modellverbesserung nicht etwa zurück zur deterministischen Denkweise führt, sondern sogar um so stärker eine probabilistische Herangehensweise erfordert. Das neue Modell COSMO-DE wurde mit dem Ziel entwickelt, auf die generell problematische Parametrisierung von hochreichender Konvektion zu verzichten. Die explizite Simulation hochreichender Konvektion wird im we-

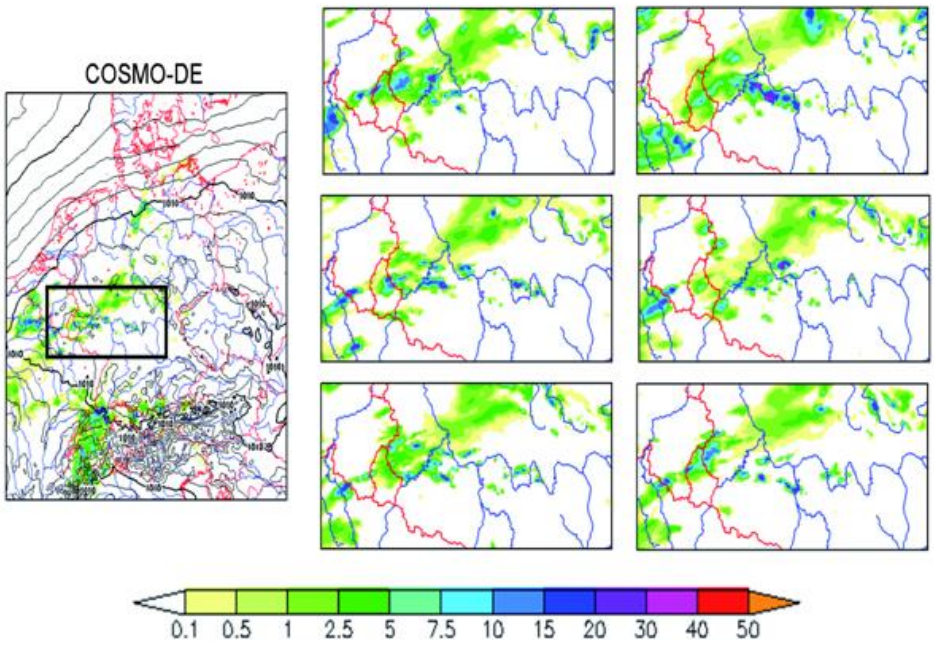


Abb. 13-1: Beispiel für sechs verschiedene Niederschlagsvorhersagen in mm/h. Die Vorhersagen wurden für den gleichen Vorhersagetermin erstellt (11.9.2005, 17-18 UTC) und basieren auf jeweils leicht geänderten Konfigurationen des Modells COSMO-DE (Vorhersagestart: 00 UTC). Die Vorhersagen können als Member eines Ensembles interpretiert werden. Das Beispiel zeigt, wie stark sich bereits geringfügige Änderungen im Vorhersagesystem auf die Vorhersagedetails auswirken können.

sentlichen durch eine Gitterverfeinerung ermöglicht. Die Verfeinerung des Gitters bringt aber wiederum solche Prozesse in die explizite Simulation hinein, deren Fehlerwachstum aufgrund ihrer nichtlinearen Eigenschaften besonders groß ist. Somit ist nicht etwa zu erwarten, dass die Niederschlagsvorhersage auf der Gitterpunktskala im deterministischen Sinne besser wird (MASS et al. 2002). Wird auf einen spezifischen Gitterpunkt in einer einzelnen COSMO-DE-Vorhersage fokussiert, ist sogar eine Steigerung der Vorhersageunsicherheit zu erwarten. Als Vorteil hingegen ist zu erwarten, dass die statistischen Eigenschaften der Niederschlagsfelder besser getroffen werden, z.B. dass die vorhergesagten Niederschlagsstrukturen zusammen mit dem Auftreten von Extremwerten wesentlich realistischer aussehen. Um diesen Vorteil für die Anwendung sichtbar zu machen, ist eine probabilistische Herangehensweise erforderlich (siehe auch Entwicklung eines COSMO-DE-Ensembles, GEBHARDT et al. 2008, GEBHARDT et al. 2010).

Hilfreich wäre beispielsweise ein Mittel zur Unterscheidung zwischen verlässlichen Vorhersageanteilen und weniger verlässlichen. Eine solche Unsicherheitsvorhersage kann in vielen verschiedenen Formen kommuniziert werden, z.B. als eine Reihe von denkbaren Vorhersageszenarien oder auch als Wahrscheinlichkeitsabschätzung für das Auftreten bestimmter Wetterereignisse. Dies bietet eine zusätzliche Unterstützung für das Warnmanagement und für Entscheidungsprozesse in Verkehrsbranche, Energiebranche, Privathaushalten und vieles mehr.

Ensemblevorhersagesysteme haben sich in den letzten fünfzehn Jahren als Technik etabliert, mit Hilfe derer die Vorhersageunsicherheiten geschätzt und Wahrscheinlichkeitsaussagen formuliert werden können. Motivation und Prinzip dieser Technik wird in Kapitel 2 dargelegt. Für den Aufbau eines Ensemblevorhersagesystems benötigt man in der Regel eine Technik zur Generierung des Ensembles (Kapitel 3) und eine statistische Nachbearbeitung zur Milderung systematischer Unterschiede zwischen Vorhersagen und Beobachtungen (Kapitel 4). Wesentlich für Nutzen und Erfolg eines Ensemblevorhersagesystems ist auch die Kommunikation der Wahrscheinlichkeitsaussagen, die aus den Ensemblevorhersagen gewonnen werden (Kapitel 5).

2 Motivation und Prinzip der Ensembletechnik

Vorhersageunsicherheit ist strömungsabhängig, so dass sie stark von der jeweiligen Wettersituationen abhängt. Daher ist es wünschenswert, auch die Vorhersageunsicherheit explizit für jeden Tag und jeden Ort vorherzusagen, ähnlich wie die Vorhersage selbst.

Für die Vorhersage selbst werden Differenzialgleichungen herangezogen, die sich als Funktion der Zeit darstellen lassen und in diskretisierter Form schrittweise in die Zukunft gerechnet werden. Analog dazu ließen sich auch Gleichungen für die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des atmosphärischen Zustands formulieren (Fokker-Planck-Gleichung, Liouville-Gleichung). Diese Gleichungen für eine Wahrscheinlichkeitsaussage in der Wettervorhersage einzusetzen, wäre theoretisch sogar denkbar, übersteigt jedoch die heutigen Grenzen des Machbaren bei weitem.

Daher wird die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion nicht explizit in ihrer zeitlichen Entwicklung berechnet, sondern anhand einer Stichprobe beschrieben. Diese Stichprobe wird generiert, indem nicht nur eine einzelne Vorhersage, sondern eine Vielzahl von Vorhersagen für den gleichen Vorhersagetermin erstellt wird. Die Vorhersagen werden jeweils mit geänderten Konfigurationen des Vorhersagesystems gerechnet, welche die bestehenden Unsicherheiten repräsentieren sollen (vergleiche Abb. 13-1).

Die Gemeinschaft dieser unterschiedlichen Vorhersagen wird Ensemblevorhersage genannt. Die einzelnen Vorhersagen selbst nennt man „Ensemble Member“ (Englisch für „Mitglied“). Sie repräsentieren eine Stichprobe aller aktuell möglichen Vorhersagen. Die aktuelle Vorhersa-

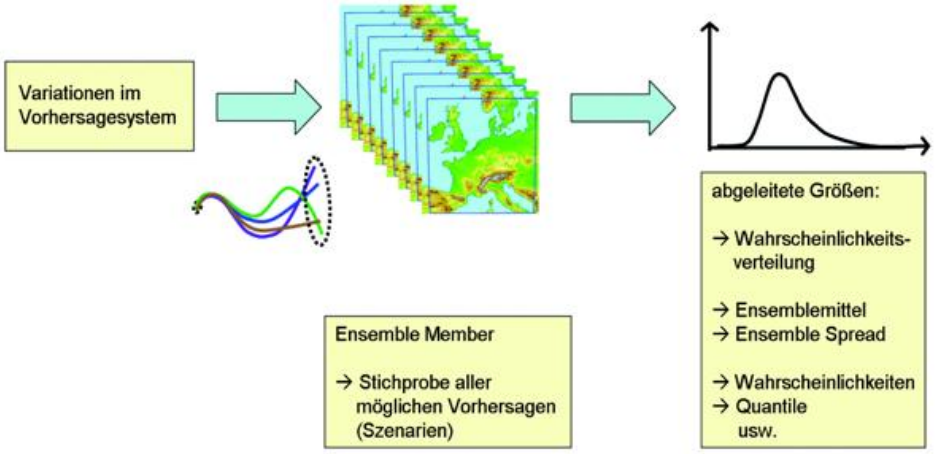


Abb. 13-2: Flussdiagramm zum Grundprinzip und den Grundbegriffen der Ensembletechnik.

geunsicherheit lässt sich anhand der Streuung der Ensemble Member („Ensemble Spread") abschätzen, z.B. durch Berechnung der Standardabweichung oder einem anderen statistischen Maß. Einen Überblick über die Grundbegriffe der Ensembletechnik zeigt Abbildung 13-2.

Als umfassendstes Ergebnis lässt sich aus den Ensemble Membern die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Vorhersagevariablen schätzen. Idealerweise soll diese Verteilung mit der statistischen Wahrscheinlichkeitsverteilung des tatsächlich eintretenden Wetters (der Beobachtung) übereinstimmen. Da das tatsächlich eintretende Wetter nur eine einzige Realisierung liefert, lässt sich diese Übereinstimmung nur über einen Langzeitvergleich von einer Vielzahl von Ensemblevorhersagen mit ihren entsprechenden Beobachtungen verifizieren (probabilistische Verifikation) (vergleiche JOLLIFFE und STEPHENSON 2003).

Zusätzlich zur Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung liefern die Ensemble Member auch Schätzungen von den statistischen Parametern, z.B. vom Erwartungswert („Ensemblemittel"), von der Varianz („Ensemble Spread"), von Überschreitungswahrscheinlichkeiten für feste Schwellenwerte und von Quantilen für feste Wahrscheinlichkeiten (vergleiche Abb. 13-2 und Abb. 13-3).

3 Generierung von Ensembles

Mittlerweile betreiben oder entwickeln alle großen Wettervorhersagezentren der Welt ein Ensemblevorhersagesystem. Die Erstellung von Ensembles ist ein fester Bestandteil geworden in der numerischen Wettervorhersage (vergleiche LEWIS 2005, NAS 2006).

Bestehende Ensemblesysteme lassen sich grob einteilen in „Single-Model"- und „Multi-Model"-Ensembles. Im Single-Model-Ensemble werden Varianten eines einzigen Vorhersagesystems erstellt, während im Multi-Model-Ensemble mehrere ohnehin existierende Vorhersagesysteme zu einem Ensemble zusammengestellt werden. Mischformen existieren ebenfalls.

3.1 Single-Model-Ensembles

Für die Generierung von Single-Model-Ensembles gibt es zahlreiche Herangehensweisen (vergleiche PALMER und HAGEDORN 2006, NAS 2006). Ausmaß und Art der Variationen im Vorhersagesystem orientieren sich an vorliegenden Erkenntnissen über Größe und Auswirkungen der bestehenden Ungenauigkeiten. Die Art, wie sich Ungenauigkeiten im System ausbreiten, kann wiederum von der betrachteten Skala abhängen. Außerdem spielen der Vorhersagehorizont (z.B. Mittel- oder Kurzfristvorhersage) und die Ausdehnung des Modellgebietes (Globalmodell oder Ausschnittsmodell) eine Rolle. Als wichtigste Quellen der Unsicherheit sind bekannt: Anfangszustand, Modellformulierung und bei Ausschnittsmodellen auch die Randdatenversorgung.

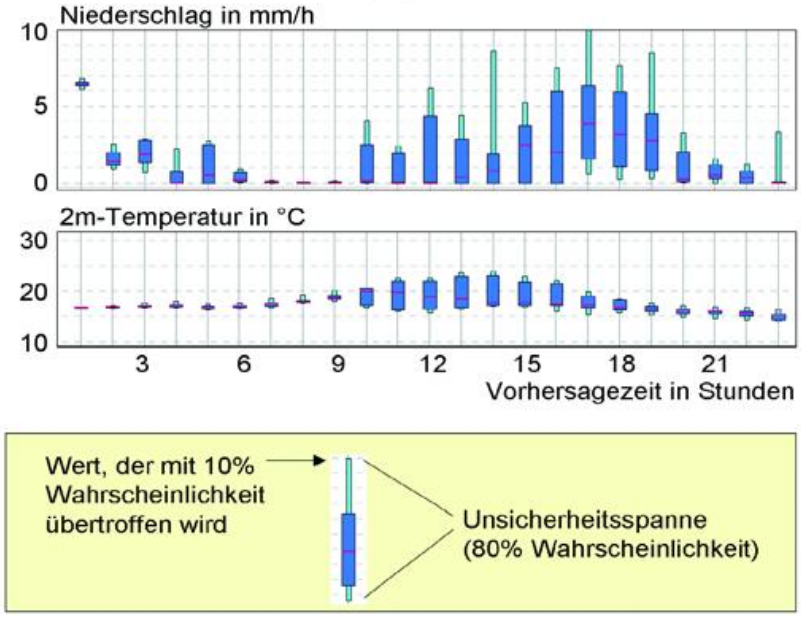


Abb. 13-3: Quantile als ein Beispiel für eine abgeleitete Größe aus einem Ensemble. Die Quantile basieren auf einer experimentellen Ensemblesimulation mit dem Modell COSMO-DE, 20 Member. Vorhersagestart: 12.8.2008, 00 UTC. Die Quantile beziehen sich auf den Gitterpunkt 46° 45' N, 7° 01' E. Dargestellt sind das 90 %-Quantil (oberer Rand dünne Linie), das 75 %-Quantil (oberer Rand dicke Linie), das 50 %-Quantil (rote Linie), das 25 %-Quantil (unterer Rand dicke Linie) und das 10 %-Quantil (unterer Rand dünne Linie). Zum Beispiel besagt das 90 %-Quantil, dass sein Wert mit 10 % Wahrscheinlichkeit von der Beobachtung noch übertroffen wird. Es ist für Kunden interessant, die schon bei niedrigen Eintrittswahrscheinlichkeiten entsprechende Präventionsmaßnahmen einläuten müssen. Der Abstand zwischen dem 90%- und 10 %-Quantil ist ein Maß für die Vorhersageunsicherheit. Die Vorhersage besagt, dass die Beobachtung mit 80 % Wahrscheinlichkeit in diesen Wertebereich fallen wird.

Im Allgemeinen wird eine Anzahl von 5 bis 50 Ensemble-Membern (Mitgliedern) pro Ensemblevorhersage gerechnet. Die Anzahl der Member ist nach oben beschränkt, um bei gegebener Rechnerleistung noch eine zeitkritische Berechnung der Ensemblevorhersage zu gewährleisten. Bereits die Berechnung einer einzigen numerischen Wettervorhersage in operationell erforderlicher Geschwindigkeit erfordert eine äußerst leistungsfähige Rechentechnik, so dass zur Erzeugung von Ensemblevorhersagen die schnellsten Computer der Welt eingesetzt werden. Bezüglich der Rechenzeit besteht der ständige Zielkonflikt zwischen der Memberanzahl und der Komplexität des Vorhersagemodells, insbesondere seiner Gitterweite. Im Verhältnis zur immens hohen Anzahl der Freiheitsgrade im System ist die derzeit erzeugte Größe der Stichprobe immer noch äußerst gering. Um den Wahrscheinlichkeitsraum trotzdem möglichst vollständig zu erfassen, werden die Variationen im Vorhersagesystem nicht rein zufällig erzeugt, sondern auch im Hinblick auf größtmögliche Auswirkungen auf die Vorhersage.

Hier sind zuallererst die Variationen der Anfangsbedingungen zu nennen. Unter der Annahme, dass Unsicherheiten in den Anfangsbedingungen ihre Ursache in der Benutzung fehlerhafter und nur begrenzt repräsentativer Beobachtungen haben, ist es naheliegend, mehrere Assimilationen mit jeweils im Rahmen ihrer Fehler gestörten Beobachtungen durchzuführen („perturbed observations"), so dass jedes Ensemblemember in der Vorhersage auf einem unterschiedlichen Anfangszustand basiert. Andere Verfahren suchen nach typischen atmosphärischen Störungsmustern, die aufgrund der aktuellen Wettersituation in einer vorgegebenen Periode zu maximalem Vorhersagefehlerwachstum führen. Hier ist das „Breeding" zu nennen, in dem solche instabilen Muster innerhalb eines kurzfristigen Analyse-Vorhersagezyklus bestimmt werden. Weiterhin gibt es den Ansatz der „singulären Vektoren", bei dem ein maximales Fehlerwachstum innerhalb der ersten Vorhersagestunden mit Hilfe einer linearisierten Version des Vorhersagemodells bestimmt wird. Jedes Member basiert dann auf einer Vorwärtsintegration des vollen Modells, bei dem die optimierte Schätzung des Anfangszustandes durch ein Störungsmuster überlagert wird. In einem weiteren Ansatz, dem „Ensemble Kalman Filter", assimiliert ein kontinuierlicher Analyse-Vorhersage-Zyklus die Beobachtungen und ein Ensemble von Kurzfristvorhersagen unter Berücksichtigung strömungsabhängiger Strukturen der Vorhersageunsicherheit. Die Assimilationsergebnisse dienen wiederum als Stichprobe von Anfangsbedingungen für weitere Ensemblevorhersagen. Schließlich ist noch der pragmatische Ansatz des „lagged average forecast" zu nennen. Dieser Ansatz nutzt mehrere Simulationen eines Modells mit verschiedenen Startzeitpunkten, aber überlappenden Gültigkeitszeiten der Vorhersage, so dass für einen festen Vorhersagezeitpunkt mehrere Simulationen vorliegen. Diese Simulationen werden als Ensemblemember interpretiert.

Bei der Quantifizierung von Unsicherheiten in der Modellformulierung geht es meist um die physikalischen Parametrisierungen der Modelle. Hier gibt es zunächst ein Verfahren, in dem diejenigen Teile der Modellgleichungen gestört werden, die die zeitliche Entwicklung der prognostischen Variablen aufgrund der Parametrisierungen beschreiben („gestörte Tendenzen"). In einem weiteren, vergleichsweise häufigem Ansatz werden in jedem Member die (empirischen) Parameter der physikalischen Parametrisierungen im Rahmen ihrer angenommenen Ungenauigkeiten gestört („gestörte Parameter"). Diese Störungen sind häufig stochastischer Natur. Neben diesen Störungsansätzen gibt es auch Verfahren, die mit variablen Schemata arbeiten. Zum Beispiel können sich hier die Member durch die Benutzung verschiedener Konvektionsschemata unterscheiden.

3.2 Multi-Model-Ensembles

Die Generierung von Multi-Model-Ensembles ist vergleichsweise pragmatisch. Das Multi-Model-Ensemble verwertet Vorhersagen, die ohnehin für das gleiche Gebiet und die gleiche Vorhersagezeit erstellt wurden, z.B. weil mehrere Modelle nebeneinander existieren oder weil die Modellgebiete von verschiedenen nationalen Wetterdiensten innerhalb Europas stark überlappen. Die Methode besteht also zunächst in der simplen Nebeneinanderstellung ohnehin existierender Vorhersagen und ist dadurch in ihrer Gestaltungsfreiheit eingeschränkt.

Eine Herausforderung für Wissenschaft und Praxis ist die Interpretation des Multi-Model-Ensembles. Jedes Member im Multi-Model-Ensemble besitzt eine individuell unterschiedliche Charakteristik in Bezug auf seine typischen Vorhersageschwächen und -stärken (z.B. bekannt aus der Verifikation). Hinzu kommt, dass die Vorhersagen einiger bestimmter Member typischerweise sich untereinander ähnlicher sind als andere, z.B. weil sie einen ähnlichen Modelltyp verwenden. Beides widerspricht dem ursprünglichen Grundgedanken der Ensembletechnik, weil die Member sicher nicht als zufällige und unabhängige Realisierungen derselben Zufallsvariablen angesehen werden können. Die daraus folgende komplexe Interpretation des Multi-Model-Ensembles ist gewissermaßen der Preis für seine simple Generierung.

Ob der Multi-Model- oder der Single-Model-Ansatz die besseren Ensemblevorhersagen erzielt, wird noch immer mit offenem Ausgang diskutiert. Das Multi-Model Ensemble hat einen schwächeren theoretischen Unterbau, jedoch profitiert das Vorhersageresultat von der ausgeprägten Repräsentation systematischer Modellfehler durch die unterschiedlichen Modelle im Ensemble. Das Single-Model Ensemble kann diesen Fehler allenfalls durch Variation der Modellphysik und durch eine statistische Nachbearbeitung der Ensemblevorhersage repräsentieren. Eine solche Nachbearbeitung wäre mit Hilfe einer Langzeitstatistik über den modellspezifischen systematischen Vorhersagefehler machbar (siehe auch Kapitel 4).

4 Interpretation und Nachbearbeitung von Ensembles

Der Schritt von der Stichprobe aus verschiedenen Vorhersagen bis hin zur geschätzten Wahrscheinlichkeitsverteilung ist nicht trivial. Der Schritt wird oft als „Interpretation des Ensembles", als „statistisches Postprocessing", als „Kalibrierung" oder auch als „Ensemble MOS (Model Output Statistics)" bezeichnet (vergleiche WILKS 2006). Die Notwendigkeit zur Ensembleinterpretation ergibt sich aus der Tatsache, dass das „Vorhersagesample" meist nur eine grobe Schätzung für die Wahrscheinlichkeitsverteilung des tatsächlich eintretenden Wetters liefert. Es zeigt sich, dass durch statistisches Postprocessing eine deutliche Verbesserung erreicht werden kann.

Die Nachbearbeitung kann auf bestimmte statistische Eigenschaften wie den Erwartungswert oder die Varianz abzielen, aber auch auf die einzelnen Member oder auf daraus generierte Ensembleprodukte bis hin zur gesamten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (vergleiche Abb. 13-2). Es gibt z.B. Ansätze, die einzelne Ensemble Member mit einem Unsicherheitsmaß versehen („kernel dressing") und dazu noch gemäß ihrer (oftmals systematisch unterschiedlichen) Qualität unterschiedlich stark wichten („Bayesian Model Averaging"). Auch ist es möglich, die Überschreitungswahrscheinlichkeiten direkt mittels einer Regression zu schätzen (z.B. „non-homogeneous Gaussian regression" oder „logistic regression").

Im Zusammenhang mit der statistischen Nachbearbeitung von Ensembles wird in den letzten Jahren die Erstellung und Nutzung von „Reforecasts" stark propagiert (HAMILL et al. 2006). Ein Reforecasting Datensatz umfasst (Ensemble-)vorhersagen für einen mehrjährigen Zeitraum in der Vergangenheit, erstellt unter möglichst gleichen Bedingungen wie heute eine Vorhersage erstellt wird. Der Datensatz ermöglicht die langzeitliche Gegenüberstellung von Beobachtungen und Ensemblevorhersagen, aus der die statistischen Gesetzmäßigkeiten für die Nachbearbeitung geschätzt werden können. Für einige Ensemblesysteme wurde ein solcher Reforecasting-Datensatz bereits erstellt und genutzt.

Im Zusammenhang mit Interpretationsverfahren ist zu ergänzen, dass auch Interesse an Vorhersagen besteht, die räumlich spezifischer sind als die Gittermaschenweite des Modells. Das Modell selbst kann diese Vorhersageinformation nicht liefern, auch nicht im Ensemblebetrieb. Jedoch existieren Interpretationsverfahren, die aus der Modellausgabe eine ortsspezifischere Information ableiten, z.B. ein statistisches Downscaling zur Herleitung von Punkt-Termin-Prognosen. Die Verfahren (z.B. „Model Output Statistics") wurden in der Regel nicht im Hinblick auf Ensembles, sondern im Hinblick auf eine einzelne Modellsimulation konzipiert. Für ein Ensemble wäre theoretisch denkbar, die bestehenden Verfahren auf die Ausgabe jedes einzelnen Ensemblemembers anzuwenden und die Ergebnisse anschließend wieder als Ensemble zu behandeln. Dabei ist allerdings Vorsicht geboten, weil diese Vorgehensweise eine Unterschätzung der Vorhersageunsicherheit begünstigen kann (WILKS 2006). Daher ist es empfehlenswert, existierende Verfahren zunächst auf ihre Eignung im Ensemblebetrieb zu untersuchen und dann eventuell neue Interpretationsverfahren für das Ensemble zu entwickeln.

5 Kommunikation von Wahrscheinlichkeitsaussagen

Der Begriff „Wahrscheinlichkeitsaussage" steht hier stellvertretend für jede Art von Unsicherheitsinformation, welche aus einem Ensemble generiert werden kann (vgl. Abb. 13-2). Dies umfasst beispielsweise die Information über Unsicherheiten und Risiken:

- ein Vertrauensmaß über die aktuelle Güte der Vorhersage,
- die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines zuvor definierten Ereignisses (z.B. Starkregen),
- Quantile (siehe Abb. 13-3).

Wahrscheinlichkeitsaussagen in der Wettervorhersage sind interessant für alle,

- deren Situation vom Wetter beeinflusst oder beeinträchtigt werden kann,
- die ihre Planung mit einer gewissen Vorlaufzeit auf das zu erwartende Wetter anpassen können,
- und denen eine Risikoabschätzung in der Entscheidungssituation hilft.

Als Beispiel seien hier einige potenzielle Nutzer genannt:

- Katastrophenschutz,
- Flughafenmanagement,
- Industrie (Lebensmittel, Transport, u.a.),
- Energiewirtschaft.

Wichtige Glieder in der Kette vom Vorhersageanbieter bis hin zum Kunden sind die passende Informationsauswahl, das Verständnis der Information und ihr nutzbringender Einbezug im Entscheidungsprozess (NAS 2006).

Bei der Informationsauswahl ist zum Beispiel die Balance zwischen der gewünschten Vorhersagespanne („lead time") und der resultierenden Vorhersageunsicherheit ein springender Punkt. Im Allgemeinen gilt: je weiter die Vorhersage in die Zukunft, desto größer die Unsicherheit. Hier muss kundenspezifisch abgewogen werden, welche Vorhersagespanne nötig ist und welcher Grad der Unsicherheit noch toleriert werden kann.

Für das Informationsverständnis und den Einbezug in Entscheidungen ist die Art der Kommunikation überaus relevant (NAS 2006). Hier eröffnet sich ein weites Feld von Möglichkeiten. Beispielsweise stellt sich die Frage, ob und wie viele Wahrscheinlichkeitsklassen oder ob kontinuierliche Werte übermittelt werden. Weiterhin stellt sich die Frage, ob über Abbildungen oder Texte kommuniziert wird. Wird über Abbildungen kommuniziert, dann ist nicht nur die generelle Aufbereitung ausschlaggebend, sondern sogar auch vermeintliche Details wie die Farbpalette. Wird über Texte kommuniziert, dann

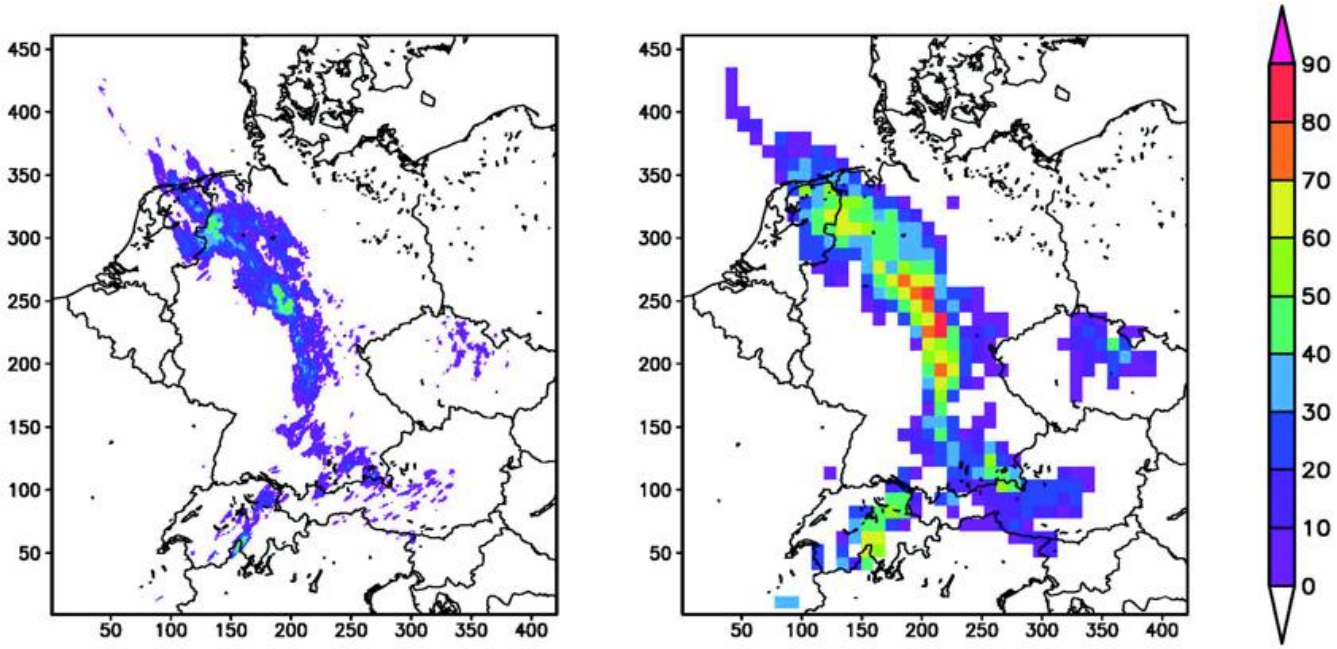


Abb. 13-4: Wahrscheinlichkeiten in Prozent für das Auftreten von Starkregen am 3.7.2008, 16-17 UTC. Links: Wahrscheinlichkeit für Starkregen in einer Gitterbox (2,8 km). Rechts: Wahrscheinlichkeit für Starkregen irgendwo auf einer Fläche aus 10 mal 10 Gitterboxen (28 km). Die Wahrscheinlichkeiten basieren auf einer experimentellen Ensemblesimulation mit dem Modell COSMO-DE, 20 Member. Vorhersagestart: 3.7.2008, 00 UTC. Die Wahrscheinlichkeiten wurden aus der gleichen Ensemblevorhersage abgeleitet, d.h. sie unterscheiden sich lediglich aufgrund der Definition ihres Raumbezugs. Die Wahrscheinlichkeiten im rechten Bild erreichen tendenziell höhere Werte als im linken Bild, weil sie sich auf größere Flächen beziehen.

ist die Bezeichnung der Wahrscheinlichkeitsklassen relevant („sicher", „höchstwahrscheinlich", „zweifelhaft", „unwahrscheinlich", etc) oder aber die Umschreibung der Wahrscheinlichkeitswerte („mit 30% Wahrscheinlichkeit", „in 3 von 10 Fällen", „mit einer Chance von 3 zu 7", o.a.). Wichtig ist, dass Intuition und Verständnis des Kunden optimal angesprochen werden. Dies ist nicht trivial, sondern erfordert eingehende Untersuchungen.

Wenn Wahrscheinlichkeiten in Form von Prozentzahlen übermittelt werden, spielt außerdem die Kenntnis des Wahrscheinlichkeitsbezugs eine Rolle (GIGERENZER et al. 2005). Wird 30% Regenwahrscheinlichkeit vorhergesagt, vermuten viele Kunden, dass es in 30 % der Fläche oder aber in 30 % der Zeit regnen wird. Gemeint ist allerdings meistens, dass es irgendwo in der angegebenen Fläche und irgendwann im angegebenen Zeitraum mit einem Risiko von 30 % regnen wird. Wichtig ist, dass auch der Vorhersageanbieter die Definition kennt und klar kommuniziert. Auch müssen Fläche und Zeitspanne immer angegeben werden. Es liegt auf der Hand, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Starkregen irgendwo in Deutschland eine andere Aussage beinhaltet als die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Starkregen irgendwo in Frankfurt (vergleiche Abb. 13-4).

Als quantitatives Modell für eine Entscheidungssituation kennt die meteorologische Literatur das Cost-Loss-Konzept. Es beschreibt eine Entscheidung zwischen den „Kosten" für eine Präventivmaßnahme und dem möglichen „Verlust" durch einen wetterbedingten Schaden, der bei Eintritt des Wetters ohne zuvor getroffene Präventivmaßnahme eintreten würde. Zur Minimierung der langzeitlich gemittelten Kosten und Verluste wird dem Kunden empfohlen, die Präventivmaßnahme immer dann vorzunehmen, wenn das Ereignis ab einer gewissen Wahrscheinlichkeit vorhergesagt ist. Dieser Schwellenwert berechnet sich aus dem Verhältnis von „Kosten" zu „Verlust". Demnach würde sich ein Kunde mit geringem Kosten-Verlust-Verhältnis bereits für geringe Wahrscheinlichkeiten interessieren und entsprechend reagieren.

Das Cost-Loss-Konzept ist vielleicht deshalb in der Meteorologie so beliebt, weil es ein quantitatives Modell ist. Das Konzept ist verbunden mit einer Maßzahl zur Bewertung von Ensemblesystemen, dem „Economic Value" (PALMER und HAGEDORN 2006). Dies ist eines von vielen Maßen in der Verifikation von Ensembles (vergleiche JOLLIFFE und STEPHENSON 2003).

Ob das Cost-Loss-Konzept als Entscheidungsmodell die komplette Bandbreite der real vorkommenden Entscheidungssituationen abbilden kann, ist fraglich. Schwierigkeiten können sich beispielsweise ergeben, wenn Kosten und Verluste nicht klar quantifizierbar sind. Auch kann es sein, dass die praxisrelevante Zielgröße nicht etwa die potenzielle Kostenminimierung ist, sondern z.B. das Vertrauen des Kunden in den Vorhersageanbieter. Hier wäre die Frage zu stellen, ob die Angabe einer Vorhersageunsicherheit das Vertrauen langfristig steigert oder verringert. Ist das Vertrauen beeinträchtigt, verliert die gesamte Vorhersageinformation womöglich an Relevanz im Entschei-

dungsprozess. Selbstverständlich ist diese Zielgröße mit dem Handwerkszeug der Mathematik allein nicht messbar. Sie erfordert einen interdisziplinären Forschungsansatz, der die Gesellschaftswissenschaften mit einbezieht, und somit die systematische und fachlich fundierte Untersuchung von Kundengruppen ermöglicht (vergleiche NAS 2006, MORSS et al. 2008).

Literatur

GEBHARDT, C., THEIS, S.E., KRAHE, P., RENNER, V., 2008: Experimental ensemble forecasts of precipitation based on a convection-resolving model. *Atmospheric Science Letters* **9**, 67-72.

GEBHARDT, C., THEIS, S.E., PAULAT, M., BEN BOUALLÈGUE, Z., 2010: Uncertainties in COSMO-DE precipitation forecasts introduced by model perturbations and variation of lateral boundaries. Submitted to *Atmospheric Research*.

GIGERENZER, G., HERTWIG, R., VAN DEN BROEK, E., FASOLO, F., KATSIKOPOULOS, K.V., 2005: A 30% chance of rain tomorrow: How does the public understand probabilistic weather forecasts? *Risk Analysis* **25**, 623-629.

HAMILL, T. M., WHITAKER, J. S., MULLEN, S.L., 2006: Reforecasts: An important new dataset for improving weather predictions. Bull. Amer. Meteor. Soc. 87, 33-46.

JOLLIFFE, I. T., Stephenson, D.B., (Eds.), 2003: Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Sciences. *Wiley and Sons*, Chichester, 240 pp.

LEWIS, J. M., 2005: Roots of ensemble forecasting. *Mon. Wea. Rev.* **133**, 1865-1885.

MASS, C. F., OVENS, D., WESTRICK, K., COLLE, B.A., 2002: Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? The results of two years of real-time numerical weather prediction over the Pacific Northwest. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **83**, 407-430.

MORSS, R. E., DEMUTH, J., LAZO, J.K., 2008: Communicating Uncertainty in Weather Forecasts: A Survey of the U.S. Public. *Wea. Forecasting* **23**, 974-991.

NAS, 2006: Completing the forecast: Characterizing and communicating uncertainty for better decisions using weather and climate forecasts. National Research Council of the National Academies. *The National Academies Press*, 124 pp.

PALMER, T. (Ed.), HAGEDORN, R. (Ed.), 2006: Predictability of Weather and Climate, *Cambridge University Press*, 718 pp.

WILKS, D. S., 2006: Comparison of ensemble-MOS methods in the Lorenz '96 setting. *Meteorol. Appl.* **13**, 243-256.

© Deutscher Wetterdienst 2010

Buchbesprechungen - Neuerscheinungen

KRAUS, Helmut: Grundlagen der Grenzschichtmeteorologie. Springer-Verlag, Berlin, 2008, 214 Seiten, 39,80 €.

Zwei Jahre nach der 2. Auflage von T. Fokens „Angewandte Meteorologie – Mikrometeorologische Methoden" ist im Springer-Verlag 2008 ein zweites Buch zur Atmosphärischen Grenzschicht (AGS) in deutscher Sprache erschienen – zwei Monographien zum Thema AGS innerhalb kurzer Frist, nachdem der deutschsprachige Markt (bis zu Foken's Erstauflage 2003) Jahrzehnte auf derartiges warten musste. Während T. Foken's Buch – basierend auf der über 30-jährigen experimentellen Erfahrung des Autors – schwerpunktmäßig Einführung und Handbuch für den (auch nichtmeteorologischen) Praktiker darstellt, hat H. Kraus eine Einführung in die Thematik vorgelegt, aus der die ebenfalls Jahrzehnte umfassende und insbesondere auch die theoretischen Schwerpunkte der Meteorologieausbildung abdeckende Lehrerfahrung des ehemaligen Ordinarius für Meteorologie an der Bonner Universität spricht. Das Werk knüpft bewusst an seine 2004 ebenfalls bei Springer erschienene Monographie „Die Atmosphäre der Erde – eine Einführung in die Meteorologie" an, die dort ausführlich behandelten Inhalte, u. a. zur Dynamik und Thermodynamik, werden im vorliegenden Buch nicht wiederholt. Es wendet sich an „… Leser, die an der Meteorologie und vor allem an der bodennahen Atmosphäre interessiert sind…", sowie „ … an alle, die die Herausforderung sehen, sich mit der … (Wechselwirkung zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre) … auseinanderzusetzen, so an Bodenkundler, Pflanzenökologen, Land- und Forstwirte, Geographen, Glaziologen und Umweltwissenschaftler …".

Das Buch ist in zwei Teile gegliedert, der erste Teil („Physik der atmosphärischen Grenzschicht") umfasst die Kapitel 1-10 und behandelt die physikalischen Grundlagen der Grenzschicht-Meteorologie. Teil II widmet sich in den Kapiteln 11 – 14 der ausgewählten Fragen der Mikrometeorologie.

In den Kapiteln 1 und 2 werden zunächst wesentliche Begriffe und Konzepte der Grenzschichtmeteorologie eingeführt (u. a. Grenzschicht, Skalen- und Dimensionsanalyse) und die Bedeutung der turbulenten Flüsse als wesentliche Prozesse der Wechselwirkung zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre herausgestellt. Dem Grenzschichtbegriff nähert sich der Autor nach einer kurzen phänomenologischen Beschreibung aus der Sicht der Hydrodynamik, in die er ja auch durch Prandtl (1904) erstmals eingeführt wurde.

In den Kapiteln 3-5 behandelt H. Kraus die hydrodynamischen Grundgleichungen, die Gleichungen für die turbulente kinetische Energie und für weitere Turbulenzgrößen und erörtert das Schließungsproblem einschließlich grundlegender Parametrisierungsansätze zu dessen Lösung. Hierbei beschränkt er sich allerdings im Wesentlichen auf Mischungsweg- und K-Ansatz, nichtlokale Schließungsansätze finden keine Erwähnung. Hervorzuheben ist die didaktische Herangehensweise des Autors, in diesem Zusammenhang immer wieder auf die in den einleitenden Abschnitten des Buches eingeführten Konzepte und Methoden (an Beispielen) zurückzugreifen (z.B. die Skalenanalyse einzelner Terme in den Gleichungen im Hinblick auf mögliche Vereinfachungen durch Vernachlässigung kleiner Größen) und damit an das physikalische Verständnis des Lesers zu appellieren, diesem also nicht nur Fakten-Wissen sondern insbesondere auch methodische Kenntnisse zu vermitteln.

Die Kapitel 6-8 sind grundlegenden Konzepten zur Beschreibung der Struktur der atmosphärischen Grenzschicht gewidmet. Zunächst werden die Ekman-Gleichungen abgeleitet und verschiedene sich hieraus ergebende Konsequenzen diskutiert – neben der Ekman-Spirale u. a. die Profile der Wind- und Schubspannungskomponenten, der Ablenkwinkel und die Reibungshöhe. Des Weiteren werden die wichtigen Skalierungshöhen für die *Constant Flux Layer* und für die Ekman-Schicht als Funktion von u_*/f eingeführt. Der Abschnitt über die Ekman-Spirale im Ozean stellt einen zwar aus historischer und theoretischer Sicht interessanten Ausflug in die Ozeanologie dar, wäre aber in einem Buch über Grenzschicht-Meteorologie auch verzichtbar. Das vom Seitenumfang her umfangreichste Kapitel des Buches ist der Prandtl-Schicht gewidmet, es umfasst u. a. Abschnitte zum logarithmischen Windprofil, zur Richardson-Zahl als Stabilitätsmaß und behandelt natürlich die Monin-Obukhov'sche Ähnlichkeitstheorie und die hieraus resultierenden Ansätze zur Beschreibung der Profile mittlerer Größen in der Bodenschicht. Dabei wird die Monin-Obukhov-Länge im Gegensatz zum sonst oft üblichen Vorgehen zunächst über die Ri-Zahl eingeführt und veranschaulicht und erst in einem zweiten Schritt aus der Dimensionsanalyse abgeleitet. Das kurze Kapitel zum Thema Rossby-Ähnlichkeit erscheint vorrangig aus historischer Sicht von Interesse.

Die beiden abschließenden Kapitel des ersten Teiles sind einer kurzen Charakterisierung der beiden Haupttypen der AGS, der konvektiven und der stabilen Grenzschicht, gewidmet. Ihre Struktur wird anhand der Beispiele von gemessenen Profilen atmosphärischer Zustands- und Prozessparameter aus den klassischen Publikationen der 1970er Jahre beschrieben, die Diskussion dieser experimentellen Befunde fällt allerdings recht knapp aus. Insbesondere für den stabilen Fall wird eine Diskussion verschiedener möglicher Strukturtypen, wie sie sich je nach relativer Größenordnung der an der Entwicklung einer stabilen Grenzschicht beteiligten Prozesse ausbilden können, vermisst. Die konvektive Geschwin-

digkeitsskala wird unter Nutzung des bewährten Werkzeuges der Dimensionsanalyse abgeleitet. Für die stabile Grenzschicht ist ein eigener Abschnitt dem nächtlichen Grenzschicht-Strahlstrom gewidmet.

Teil II des Buches trägt die Überschrift „Mikrometeorologie", sein Schwerpunkt ist die Betrachtung von Vorgängen und Phänomenen in der Prandtl-Schicht unter Berücksichtigung der Wechselwirkung von Atmosphäre und Unterlage (Boden, Vegetation, Wasser, Eis). Dieser Teil umfasst insgesamt vier Kapitel. Deren erstes (Kapitel 11) ist der Energiebilanz an der Erdoberfläche gewidmet: Ihre Betrachtung bildet den Schlüssel für das Grundverständnis zahlreicher mikrometeorologischer Phänomene und Prozesse. Anschaulich ist die Auflistung von Beispielen für Situationen, in denen jeweils nur einzelne Terme der Energiebilanzgleichung eine relevante Größenordnung erreichen. Ausführlich wird insbesondere die Gleichung für die Wärmeleitung im Boden behandelt und diskutiert. In einem kurzen Abschnitt wird auf Methoden zur Messung der Energieflüsse am Boden hingewiesen. Dem überwiegend deskriptiven Kapitel 12 mit einer exemplarischen Diskussion von Mikroklimaten auf verschiedenen Skalen (von Waldlichtungen und Mulden bis zu den klimatischen Besonderheiten von Städten oder Seen) inklusive der Charakterisierung interner Grenzschichten folgt in Kapitel 13 unter der Überschrift „Bestandsklima" eine ausführlichere Behandlung der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Vegetation. Einen Schwerpunkt bildet hierbei die Diskussion von potenzieller und aktueller Verdunstung. Das abschließende 14. Kapitel schließlich ist mikrometeorologischen Phänomenen und Prozessen über Schnee- und Eisflächen gewidmet und konzentriert sich, an frühe wissenschaftliche Arbeiten des Autors anknüpfend, auf die Erörterung von Ablationsprozessen, wobei hier nochmals Betrachtungen der Energiebilanz anschaulich zur Anwendung gelangen.

Das Buch schließt in einem Anhang mit Bemerkungen zur „Geschichte der Grenzschicht-Meteorologie" sowie mit dem Literatur- und Sachverzeichnis.

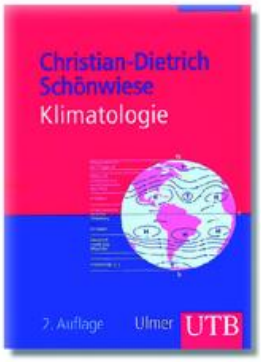
Die Monographie behandelt, wie es der Titel verspricht, die „Grundlagen der Grenzschichtmeteorologie". Dabei wird Wert gelegt wird auf logisch entwickelte und nachvollziehbar dargelegte Ableitungen und Gedankengänge ebenso wie auf die Vermittlung von in der Grenzschichtmeteorologie gebräuchlichen Methoden und Konzepten. Inhaltlich entspricht das Buch im Wesentlichen dem Stand der Wissenschaft von vor 20-25 Jahren, das wird auch in dem informativen historischen Anhang deutlich, der im Prinzip in den 1970er Jahren endet. Anerkennend, dass die „Grundlagen der Grenzschicht-Meteorologie" in der Tat im Wesentlichen bis in die 1970er Jahre gelegt worden sind, mag dies zu akzeptieren sein, in einigen Abschnitten wäre aber nach Ansicht des Rezensenten die Einbeziehung aktueller Themen und Forschungsergebnisse doch angemessen gewesen, und sei es nur als Ausblick auf derzeit bearbeitete Fragen. Die zurückhaltende Berücksichtigung neuerer Forschungsergebnisse wird auch aus dem Literaturverzeichnis ersichtlich, von den mehr als 200 aufgeführten Quellen stammen weniger als 15 % aus den letzten 20 Jahren und auch hiervon umfasst ein erheblicher Anteil noch Monographien und nicht Originalarbeiten.

Das Buch erweist sich als gut lesbar, es ist didaktisch sehr zweckmäßig aufgebaut.

Zahlreiche interne Querverweise sowie Hinweise auf Abschnitte in Kraus (2004) ermöglichen auch beim Lesen einzelner Kapitel immer wieder das Nachschlagen von Grundlagen oder Anwendungen. Wichtige Definitionen, Gleichungen oder Gesetzmäßigkeiten werden ggf. auch mehrfach im Text wiederholt, um den einzelnen Abschnitten einen in sich geschlossenen Charakter zu geben. Das Buch ist außerordentlich sorgfältig editiert worden, es sind nur wenige Fehler oder Ungenauigkeiten aufgefallen, welche die Rezeption des Textes nicht beeinträchtigen. Fachbegriffe werden konsequent auch mit ihren in der Fachliteratur gebräuchlichen englischsprachigen Termini eingeführt, allerdings hätte es der Rezensent u. a. auch aus Gründen der besseren Lesbarkeit (vor allem im fließenden Text) für zweckmäßig gehalten, die englischsprachigen Begriffe durch abweichende Schriftgestaltung (z. B. Kursivdruck) hervorzuheben.

Auch wenn Interessenten aus angewandten Disziplinen den theoretischen Ansprüchen insbesondere im Teil I vielleicht nicht durchgängig folgen werden, sei der Hoffnung Ausdruck gegeben, dass das Werk vor allem unter den Meteorologie-Studenten zahlreiche Leser finden und die Renaissance deutschsprachiger Lehrbücher zur Physik der AGS in den kommenden Jahren auch zu einer Renaissance des Auftauchens gut ausgebildeter Grenzschicht-Wissenschaftler an den deutschen Universitäten und Hochschulen führen möge, an denen es derzeit spürbar mangelt.

Frank Beyrich



SCHÖNWIESE, Christian.-D.: Klimatologie. UTB Ulmer. 3. Aufl. 2008, 472 S., Preis 29,90 €.

Nach 1994 und 2002 erschien im Jahr 2008 die dritte Auflage des Lehrbuches „Klimatologie" von Christian-Dietrich Schönwiese. Der Autor lehrte und forschte viele Jahre an der Universität Frankfurt am Main und ist einer der profiliertesten deutschen Klimatologen. Er stellt seine Expertise auf 472 Seiten vor. Insgesamt 173 Abbildungen, 31 Tabellen und 147 Formeln illustrieren und vertiefen den Text. Angesprochen werden neben Studenten und Wissenschaftlern ebenfalls Lehrer, Schüler sowie die interessierte Öffentlichkeit. Besonderes Anliegen des Autors ist es, den interdisziplinären Charakter der Klimatologie fundiert und verständlich darzustellen.

In 14 Kapiteln werden die Grundlagen der Klimatologie, die Komponenten des Klimasystems sowie die internen und externen Wechselwirkungen vorgestellt. Eine Besonderheit des Buches ist die jedem Kapitel vorgestellte kurze Zusammenfassung. Das Buch ist flüssig lesbar, viele Querverweise und

hervorgehobene Schlagwörter ermöglichen einen schnellen Überblick. Sehr gut ist die Qualität der Abbildungen, die trotz des beschränkten Farbspektrums (blau und schwarz) eine zuverlässige Zuordnung der Legenden zum Inhalt gestatten. Dies gestattet es dem Verlag, den Preis bei moderaten 29,90 Euro zu belassen.

In der „Einführung“ wird das Klima als hoch aktuelles und interdisziplinäres Objekt der Forschung charakterisiert sowie seine Ausprägung in Raum und Zeit angerissen.

Im zweiten Kapitel werden „Grundbegriffe und Größenordnungen" im Klimasystem erläutert. Es wird betont und begründet, dass zum Klimasystem neben der Atmosphäre ebenfalls der Ozean, das Eis, der Boden und die Vegetation gehören. Die räumliche Größenordnung der Klimaprozesse erstreckt sich von der Mikro- bis zur globalen Skala, während der zeitliche Maßstab vom Hitzeflimmern bis hin zum Alter der Erde reicht. Interessant ist der kurze historische Abriss von Klimadefinitionen.

Der dritte Abschnitt „Grundlagen des empirischen Klimas" ist den physikalischen Definitionen der Klimaelemente gewidmet. Deren messtechnische Erfassung wird detailliert dargestellt. Einen breiten Raum nehmen statistische Analysemethoden ein, die mit Beispielen anschaulich erläutert werden.

Das Kapitel 4 behandelt die Grundlagen der Physik der Atmosphäre, angefangen vom Antrieb durch die Sonne, über den sich durch Form und Bewegung der Erde ergebenden Strahlungs- und Wärmehaushalt bis hin zu Hebungsprozessen und Wolkenbildung. Der globale Wasserkreislauf sowie eine kurze Übersicht zur Kryosphäre folgen.

Inhaltlich anschließend wird im fünften Abschnitt die atmosphärische Zirkulation behandelt. Deren dreidimensionaler Charakter sowie globale und regionale Aspekte, wie der Monsun oder die Land-Seewind-Zirkulation nehmen den größten Raum ein. Dem interdisziplinären Charakter des Buches entsprechend, folgen die Zirkulation des Ozeans (Kap. 6) sowie solcher Vorgänge in der Kryo- und Lithosphäre (Kap. 7). Deutlich herausgearbeitet werden die um viele Größenordnungen differierenden charakteristischen Geschwindigkeiten beziehungsweise Zykluszeiten (Tab. 13 auf S. 207).

Die beobachteten insbesondere globalen Verteilungen der Klimaelemente (neben Luftdruck und Temperatur u.a. auch Verdunstung und Wolkenbedeckungsgrad) sind Gegenstand des 8. Kapitels. Die bekannte Weltkarte der Naturgefahren der Münchner Rückversicherung (aktuelle Version von 2009 unter www.munichre.com/publications/302-05971_de.pdf) befindet sich in vereinfachter Darstellung auf der Seite 228. Hier ist anzumerken, dass tropische Wirbelstürme per Definition einen Mittelwind von 12 Bft und nicht von 8 Bft aufweisen müssen, wie es die Legende anzeigt.

Die Zusammenschau der verschiedenen Klimaelemente - die „Klimasynopsis“ - wird im Abschnitt 9 durchgeführt. Nach Klärung der thermisch-hygrischen Grundbegriffe erfolgt der Übergang zu globalen Klimaklassifikationen. Anschließend werden die Grundlagen numerischer und statistischer Klimamodelle erläutert.

Der Wirkung des Klimas auf die Biosphäre ist das 10. Kapitel gewidmet. Analog zu den Karten der Klimaklassifikationen werden Abbildungen der Vegetationszonen der Erde vorgestellt (S. 264 und 271). Problematisch erscheint nach wie vor die einfache schematische Darstellung der potenziellen natürlichen Vegetation in Abhängigkeit nur von der Jahresmitteltemperatur und der jährlichen Niederschlagshöhe. Nordostdeutschland würde sich demnach im Bereich der temperierten Steppen mit Gras- und Zwerggehölzen als Bewuchs befinden (z.B. Berlin: 8,9 °C, 581 mm, vgl. Klimatabelle S. 431). Ein Zustand, der sich – wie es einige Publikationen zeigen – im Zuge des Klimawandels (vgl. Kap. 12) künftig durchaus einstellen könnte. Kurze Ausführungen zur Phänologie und Humanbioklimatologie runden dieses Kapitel ab.

Klimaänderungen in ihren unterschiedlichen raumzeitlichen Ausprägungen werden in den letzten vier Kapiteln thematisiert. Die "Klimageschichte" (Kap. 11) beschreibt nach einer Begriffsklärung u.a. das Klima der Erde seit ihrer Entstehung. Zahlreiche Klimazeitreihen unterschiedlicher Länge zeigen deutlich, wie stark ein Trend vom gewählten Bezugszeitraum abhängt. Hier findet sich auch eine Übersicht zu den verschiedenen terrestrischen und extraterrestrischen natürlichen Ursachen von Klimaänderungen (komprimiert in Tab. 24, S. 328).

Die öffentliche Diskussion beherrschende "anthropogene Klimabeeinflussung" wird in Kap. 12 behandelt. Interessant ist die Darstellung der seit Jahrtausenden andauernden Veränderung der Erdoberfläche am Beispiel der Landnutzung in Deutschland. Ausgehend von 90 % Waldbedeckung im 7. Jh. kam es im 13. Jahrhundert zu einem Minimum von 15 %, aktuell sind es wieder 30 % (Tab. 25 auf S. 337). Der anthropogene Treibhauseffekt wird ausführlich beschrieben, wobei besonderer Wert auf die Fehlerspanne des Beitrags der einzelnen Treibhausgase gelegt wird. Ein wichtiges Ergebnis ist, dass nur die parallele Berücksichtigung natürlicher und anthropogener Einflüsse die rezenten Klimaänderungen erklären können. Für die Zukunft werden die verschiedenen IPCC-Szenarien sowie die Auswirkungen für Natur und Gesellschaft (Klimaimpakt) diskutiert.

Dem stratosphärischen Ozonabbau und dem Klimaschutz sind abschließend eigene, kurze Kapitel (13 und 14) gewidmet. Während sich beim Ozonabbau erste messbare Erfolge (Stagnation/Abnahme der Konzentration der FCKW's in der Atmosphäre) als Folge der internationalen Politik zeigen, ist dies beim Klimaschutz noch nicht der Fall. Hier sind noch weitere Anstrengungen notwendig und gleichzeitig rücken Anpassungsmaßnahmen an den bereits unvermeidbaren Klimawandel zunehmend in den Vordergrund.

Der Anhang beginnt mit einem strukturierten und umfangreichen Literaturverzeichnis. Es folgen u.a. Klimatabellen und die Chronologien von El-Niño-Ereignissen, Vulkanausbrüchen und den größten Naturkatastrophen seit 1900.

Dem Autor ist für das sehr lesenswerte Buch zu danken. Es ermöglicht dem Leser, sich einen fundierten Überblick über die Klimatologie und die verwandten meteorologischen Teilgebiete zu erlangen. Es wird sicher einen breiten Leserkreis finden.

Birger Tinz

LOTHAR EISSMANN: Die Erde hat Gedächtnis. 50 Millionen mitteleuropäischer Erd- und Klimageschichte. Zweite, aktualisierte und erweiterte Auflage. Sax-Verlag, Beucha, 2008, 160 S., Format 28,5 x 25 cm; Preis: 39,80 Euro.

Bei aller Spezialisierung der verschiedenen geowissenschaftlichen Disziplinen kann man seit einigen Jahrzehnten auch ein Zusammenrücken feststellen – ein Vorgang, der vor allem mit der Komplexität der modernen Klimaforschung zusammenhängt. So ist die Paläoklimatologie, die früher eine Domäne von nur wenigen Spezialisten war, unentbehrlich für die Beurteilung des rezenten Klimaproblems geworden. Eingedenk der Erkenntnis, dass weder die gegenwärtige noch die zukünftige Klimaentwicklung zutreffend erkannt werden können, wenn man nicht die Grundzüge und Eigenschaften vergangener Klimate kennt, gehören heute paläoklimatologische Methoden und Ergebnisse auch für Meteorologen in den Kreis der Interessen.

Der bekannte Leipziger Geologe gibt in diesem sehr ansprechend und reich bebilderten Band einen fundierten Überblick über die geologischen Befunde, die er in zahlreichen Tagebauen der mitteldeutschen und Lausitzer Reviere gewonnen hat. Die einmalige Chance der unmittelbaren komplexen Untersuchung mächtiger zutage liegender Schichten hat er schon lange vor 1990 auf sich gestellt, nur unterstützt von Angehörigen und vom Anliegen überzeugter Kollegen und Schüler, danach auch auf der Grundlage geförderter Projekte wahrgenommen. Bis Ende 1990 gab es in den mitteldeutschen Revieren nicht weniger als 21 aktive Großtagebaue, die zum Teil weit über 100 m tief reichten. Unter Berücksichtigung von über 200 000 Erkundungsbohrungen verschiedener Zielstellung gehört der Raum nicht nur zu den am besten erkundeten und aufgeschlossenen Gebieten der Erde, sondern ist auch eine Fundgrube für Klimaspuren seit dem Tertiär. Im Buch werden die grundlegenden Zeugen der mitteleuropäischen Erd- und Klimageschichte nicht nur beschrieben, sondern auch in Form von sehr anschaulichen Karten und Schnitten wiedergegeben. Sie belegen in einer großen Zahl von Befunden den natürlichen Wandel des Klimas von subtropischen bis subarktischen Verhältnissen in der Region.

Der Leser erfährt Grundlegendes über die allgemeine Geologie Mitteleuropas, das erstmalige Auftreten des Menschen in der mitteldeutschen Landschaft vor 350 000 Jahren und über die Entwicklung des Braunkohlenbergbaus. Dort befindet sich die ursprüngliche, durch den menschlichen Eingriff stark in Mitleidenschaft gezogene Landschaft in rascher Umwandlung in reizvolle Seengebiete, in denen der direkte Einblick in die Erdgeschichte wieder zugedeckt ist und sein wird. Diese Landschaftstransformation wird das Mikroklima und in gewissem Umfang auch das Mesoklima des Gebietes verändern.

Für den klimageschichtlich interessierten Leser ist das Kapitel 3 „Gespeicherte Zeit, erstarrte Bewegung" am aufschlussreichsten. Hier wird vor allem der Ablauf des quartären Eiszeitalters, die Folge von Kalt- und Warmzeiten, behandelt. Von allgemeiner, überregionaler Bedeutung für die Klimarekonstruktion sind auf Pollenanalysen, dem Sauerstoffisotopenverhältnis, vielseitigen paläontologischen Funden u.a. beruhende Befunde. So wurde festgestellt, dass es zwischen Saaleeiszeit und der Gegenwart nur eine Warmzeit (die Eem-Warmzeit) gegeben hat und – im Gegensatz zu den Ergebnissen der grönländischen Eisbohrkernanalysen stehend – dass das Klima in dieser Warmzeit relativ gleichförmig war, d.h. keine größeren Kälterückfälle nachgewiesen werden können.

Das Buch besticht durch zahlreiche sehr gute, ausdrucksstarke Fotos, die eine zumindest in Mitteldeutschland zu Ende gehende Epoche dokumentieren. Insgesamt ist es eine gelungene Synthese zwischen ästhetisch ansprechender Gestaltung und der für einen breiten Leserkreis geeigneten Vermittlung hochinteressanter wissenschaftlicher Erkenntnisse.

Peter Hupfer

Habilitationen, Promotionen und Diplomhaupt- sowie Master- und Bachelorprüfungen im Jahr 2008

Universität Bayreuth

Dissertation

DE MATTOS ZERI, Luis Marcelo: Investigation of high nighttime CO_2-fluxes at the Wetzstein pruce forest site in Thuringia, Germany.

Diplomarbeiten

SMACZNY, Johanna: Dynamics of exchange processes of CO_2 and ^{222}Radon between forest floor, forest canopy and atmosphere.

EIGENMANN, Rafael: Investigation of conditions initiating free convection using energy exchange measurements.

GERKEN, Tobias: Multilevel investigation of subcanopy respiration flux by REA conditional sampling above and within a spruce forest.

Freie Universität Berlin

Dissertationen

BINDER, Uta: Untersuchung des Einflusses realer atmosphärischer Bedingungen auf die Ausbreitung von Fluglärm.

BÖSCHE, Eyk: Influence of aerosols on polarization of skylight in gaseous absorption bands.

HOFFMANN, Jan: Entwicklung und Anwendung von statistischen Vorhersage-Interpretationsverfahren für Gewitternowcasting und Unwetterwarnungen unter Einbeziehung von Fernerkundungsdaten.

Diplomarbeiten

BAUMGART, Sonja: Evaluierung des chemischen Transportmodells REM-CALGRID unter besonderer Betrachtung der Aerosolkomponenten.

BESCH, Ulrike: Feinstaubmodellierung aus landwirtschaftlichen Nutzflächen in Berlin-Brandenburg.

BÜCHNER, Matthias: Auswirkungen einer modifizierten indonesischen Ozeanpassage und SST-Anomalien im Indischen Ozean auf das Klima Ostafrikas simuliert mit einem gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modell.

DIETZ, Steffen: Analyse der Schneedecke von Berlin-Dahlem und der klimatologische Zusammenhang mit Lufttemperatur, Niederschlag und Zirkulationsmustern.

HERRMANN, Kai: Trend im Wasserdampf aus MERIS- und MODIS-Daten über Landflächen.

KÖRPER, Janina: Über das Klima in Klimaänderungsszenarien und anschließender Stabilisierung von Treibhausgaskonzentrationen.

LINDEMANN, Jens: metINFO – Eine modulare und erweiterbare Webanwendung zur Analyse meteorologischer Daten aus relationalen Datenbanken.

MÜLLER, Sevim: Atmosphärische Wechselwirkungen in tropischen Breiten am Beispiel der thermosphärischen Dichte.

NEUMANN, Paul: Bewertung der Vorhersagegüte des Modells COSMO-EU an Windkraft-Standorten im Umkreis Berlins.

NIEMAND, Monika: Nebel auf dem Mars – Mars Express Datenauswertung und Modellstudien für das Valles Marineris.

Bachelorarbeiten

BECKER, Nico: Analyse unterschiedlicher Konvektionsschemata und deren Einfluss auf den Niederschlag in Ostafrika.

HANSEN, Felicitas: ENSO-Telekonnektion und Klimaänderung.

KRUSCHKE, Tim: Zusammenhang zwischen Intensität, Fläche und Dauer von Windstürmen mit resultierenden Schäden (Storm Severity Index).

SCHUSTER, Mareike: Der Zusammenhang zwischen Zirkulationsklasse und Niederschlag in Südaustralien – heute und unter Klimaänderung .

WEIHER, Stefan: Untersuchung der Beziehung zwischen Großwetterlagen und Niederschlag an der Station Berlin-Dahlem.

WILD, Simon: Windspektren in Regionalmodellen im Vergleich zum großskaligen Antrieb.

Universität Bonn

Dissertationen

AMENT, Ariane: Quantifizierung von Aggregationseffekten in Bodenfeuchte-Retrievalalgorithmen.

KELLER, Jan D.: Ensemble initialization using the breeding technique in a new ensemble forecasting system based on the numerical weather prediction model GME.

MASBOU, Matthieu: LM-PAFOG - a new three-dimensional fog forecast model with Parametrised microphysics.

WINKELNKEMPER, Timo: Ensemble Simulations of Atmospheric Angular Momentum and its Influence on the Earth's Rotation

Diplomarbeiten

BRÖMLING, Christoph**:** Blockierende Hochdruckgebiete auf der Nordhemisphäre: eine statistische Analyse von ERA40-Re-Analyse-Daten und ECHAM-Simulationen.

HORWAT, Miriam: Untersuchungen zum Transport von Spurenstoffen mit Hilfe des COSMOS-Modells des Deutschen Wetterdienstes.

KAISER, Nils: Die Thermohaline Zirkulation: stochastische Analyse eines dynamischen Systems.

KOCH, Friederike: Relations between lightning and meteorological parameters.

KRAMPITZ, Rebekka: Extremwertanalyse nordatlantischer Druckdaten der ERA-40 Reanalyse.

LENZ, Anne: Probabilistische Windböenanalyse.

RUSTEMEIER, Elke: Snow measurement with disdrometers.

THIELE-EICH, Insa: Perceived temperatures obtained from the application of the Klima Michel model to the regional climate model CLM.

Universität Frankfurt

Dissertation

LAUBE, Johannes: Determination of the distribution of halocarbons in the tropical upper troposphere and stratosphere.

Diplomarbeiten

BÜHNER, Bertram: PADDY – Integration und Inbetriebnahme eines Tau- und Frostpunkthygrometers für die Messkampagne CIRRUS III.

HEIL, Andrea: Bestimmung der Aufnahme von molekularem Wasserstoff in verschiedenen Bodentypen und Klimazonen.

SALA, Stephan: Entwicklung und Einsatz eines gaschromatographischen Systems zur Messung von N2O, CO2 und CH4 auf dem Kleinen Feldberg im Taunus.

SÖHL, Dennis: Normalwellenmoden und meteorologische Lärmfilterung im rotierenden barotropen Flachwassermodell.

Technische Universität Bergakadamie Freiberg

Dissertation

HÄNSEL, Stephanie: Changes in Saxon precipitation characteristics. Trends of extreme precipitation and drought.

Diplomarbeiten

HOLLANDS, Thomas: Quality assessment of Digital Surface Models (DSM) extracted from very high resolution satellite imagery.

FOLTYN, Maria: SODAR-Signalinterpretation am Standort Oberbärenburg.

Bachelorarbeit

GRUND, Franz: Stoffkonzentrationen in der sommerlichen nassen Deposition am Standort Oberbärenburg.

Universität Freiburg

Diplomarbeiten

GUNDLACH, Hans-Christof: Untersuchungen zu biegemechanischen Eigenschaften und dem Schwingungsverhalten von Waldkiefern.

HARSCH, Jürgen: Respiration von Wäldern.

KUPPE, Stefanie: Auswirkungen von Straßenbegleitgrün auf den thermischen Komfort für Menschen.

Magisterarbeiten

NEUMCKE, Robert: Thermisches Bioklima in Österreich unter Klimawandelbedingungen – Quantifizierung und Validierung anhand der Klimanormalperiode 1961-1990.

KÖRNER, Susanne: Klimawandel und Tourismus an der deutschen Nordseeküste – Quantifizierung der klimatischen Komponenten durch tourismus-klimatische Methoden.

Bachelorarbeiten

THOMSEN, Finn: Langzeitliche Entwicklung der Heiz- und Kühlgradtage in Freiburg auf der Grundlage von Messungen und REMO-Modellierungen.

GRUBER, Günter: Strahlungsflussdichten als Einflussfaktoren auf den thermischen Komfort von Menschen in der Stadt im Sommer: Fallstudien in Freiburg.

EDELMANN, Katharina: Trends von SO2 und NO2 in Baden-Württemberg.

HÄMMERLI, Kathrin: Langzeitliche Entwicklung der klimatischen Wintersportbedingungen am Flumserberg/Schweiz.

Universität Göttingen

Dissertation

RAKKIBU, Golam: Biophysical characterization of tropical vegetation – field and model investigations.

Diplomarbeit

RAUCH, Eleonore: Potential Evapotranspiration in Germany during the 21st Century (SRES A1B an B1) – Trends and Geographical Distribution.

Universität Hamburg

Dissertationen

BENDUHN, Francois: mplications of aerosol growth dynamics and aerosol-cloud interaction to the sun-cloud-climate hypothesis.

BLESSING, Simon: Adjoint modelling for assimilation and diagnosis on climate time scales.

BUNGERT, Ursula: Einfluss der Nestung auf die Ergebnisse meteorologischer Modelle.

GÖTTEL, Holger: Einfluss der nichthydrostatischen Modellierung und der Niederschlagsverdriftung auf die Ergebnisse regionaler Klimamodellierung.

GUGLIELMO, Francesca: Global cycling of semivolatile organic compounds in the marine and total environment: a study using a comprehensive model.

HOBE, Hendrik: Analyse der hochreichenden konvektiven Bewölkung über dem Nordatlantik für den Zeitraum von 1982-2001.

KUNZ, Torben: The role of breaking synoptic scale Rossby waves fort he North Atlantic oscillation and its coupling with the stratosphere.

PETERMANN, Susann: Atmosphärische Streuphänomene im nahen Infrarot – abgeleitet aus OASIS-Messungen und vergleichenden Berechnungen.

PUNGE, Heinz Jürgen: The quasi-biennial oscillation: Representation in numerical models and effects on stratospheric transport and trace gases.

SANTOS, Gabriela Sousa: The effect of Halogens an global tropospheric ozone.

SEIFERT, Rita: Impact of small-scale fluctuations on climate sensitivity and its stochastic analysis

SONG, Guitong: Statistical analysis of global ocean wave and wind parameters retrieved with empical SAR algorithms.

SCHULTZ, Merike: Systematische Windkanaluntersuchungen zur Evaluierung von Parameterisierungsansätzen für die städtische Rauigkeitsschicht.

VALDEBENITO, Alvaro: Extension of a Large-Eddy Simulation Model to Aerosol Optical Properties.

ZAHN, Matthias: Trends and variability in extratropical mesoscale cyclones – development of a climatology of North Atlantic polar lows.

Diplomarbeiten

DALLMEYER, Anne: Simulation des Nordafrikanischen Sommermonsuns in ECHAM5 – Analyse der Modellempfindlichkeit.

DEICHNIK, Kristina: Modellierung der Ausbreitung von Emissionen aus einem Stall.

FRENGER, Ivy: Untersuchung der Auswirkungen von Landoberflächenänderungen in Westafrika auf das regionale Klima: Simulation mit dem Klimamodell REMO.

KELLER, Martin: Investigation of low-frequency variability in the tropical mesosphere of the chemistry-climate model HAMMONIA.

KLOCKE, Daniel: Vergleichende Analyse des globalen Wasserhaushaltes aus HOAPS3 mit ERA40 und ECHAM5/IPCC.

PETERS, Karsten: Untersuchung des direkten Aerosoleffekts von Aerosolen über Wolken mit Hilfe von Satellitendaten.

UPHOFF, Malte: Parametrisierung flugzeuginduzierter Vermischung in einem mesoskaligen Modell.

Universität Hannover

Dissertationen

STEINFELD, Gerald: Die Beurteilung von Turbulenzmess- und Analyseverfahren der Mikrometeorologie durch virtuelle Messungen innerhalb von Grobstruktursimulationen.

WEUSTHOFF, Tanja: Studies on the Characteristics of Post-Frontal Precipitation Structures in the Mid-Latitiudes.

Diplomarbeiten

KNIGGE, Christoph: Laborexperimente zur Entstehung von Gebirgsrotoren.

KÖCKRITZ, Michael: Untersuchungen der Fehlercharakteristiken der automatischen Wettermeldungen von Verkehrsflugzeugen (AMDAR).

KOOS, Svenja: Observations and Numerical Simulations of Meteorological Wind Phenomena near Hong Kong International Airport Induced by Terrain-disrupted Airflow.

KRANE, Martina: Grobstruktursimulation des turbulenten Windfeldes und Ausbreitung von Schadstoffen in Straßenschluchten.

KRAUSE, Andrea: Der Klimawandel in Niedersachsen, Analyse der Daten und modelltechnischen Parameter für eine regionalisierte Prognose.

LEIDING, Tina: Analyse der Mastdaten der Offshore-Plattform FINO 1 und Vergleich mit den Landstationen Lindenberg und Jülich.

LUKASSEN, Dana: Numerische Simulationen zum Wachstum landwirtschaftlicher Kulturen unter verschiedenen Klimabedingungen.

MARTIN, Sabrina: On the Use of Satellite Data for In-flight Icing Diagnosis.

MATUSE, Candy: Optimum tilt angles of photovoltaic devices for different meteorological conditions.

RIECHELMANN, Stefan: Messung von spektraler Bestrahlungsstärke und Strahldichte mit CCD-Array Geräten.

WEINREIS, Carolin: Hochaufgelöste Grobstrukturensimulationen von Stadtvierteln in HongKong.

Universität Karlsruhe

Dissertationen

MEISSNER, Cathérine: High-resolution sensitivity studies with the regional climate model COSMO-CLM.

PETERS,Tim: Ableitung einer Beziehung zwischen der Radarreflektivität, der Niederschlagsrate und weiteren aus Radardaten abgeleiteten Parametern unter Verwendung von Methoden der multivariaten Statistik.

RINGS, Jörg: Monitoring the water content evolution of dikes.

RINKE, Rayk: Parametrisierung des Auswaschens von Aerosolpartikeln durch Niederschlag.

SCHMIDT, Andreas: Zeitreihen der Landoberflächentemperatur abgeleitet aus METEOSAT-7 Satellitendaten.

STANELLE,Tanja: Wechselwirkungen von Mineralstaubpartikeln mit thermodynamischen und dynamischen Prozessen in der Atmosphäre über Westafrika

Diplomarbeiten

BANGERT, Max. Berücksichtigung des Einflusses von anthropogenem Aerosol auf warme Wolken in COSMO-ART.

GRAMS, Christian: The Atlantic Inflow: atmosphere-land-ocean interaction at the south-western edge of the Saharan heat low.

HOFHEINZ, Peggy: Auslösebedingungen und tageszeitliche Entwicklung von Konvektion während des westafrikanischen Monsuns 2006.

KELLER, Julia Henriette: Die Messung von Wasserdampf in der Tropopausenregion an Bord eines Passagierflugzeugs (Projekt CARIBIC)

LANG, Simon T.K.: Die Struktur singulärer Vektoren bei der Umwandlung von tropischen Wirbelstürmen in außertropische Tiefdruckgebiete.

MOHR, Susanna: Änderungen der Häufigkeit und Intensität von Winterstürmen in Deutschland auf Grundlage regionaler Klimasimulationen.

TRÖNDLE, Tobias Wolfgang: Parametrisierung der subskaligen Konvektion für Spurenstoffe mittels des Tiedtke-Schemas in COSMO-ART.

TRUCKENMÜLLER, Meike: Mesoskalige konvektive Systeme während des Westafrikanischen Monsuns: Analyse der Messdaten und Modellergebnisse der AMMA-Episode SOP2.

Universität Kiel

Diplomarbeiten

JAHNKE, Inger: „Broken Cloud Effect" aus Beobachtung und Modell.

LENGFELD, Katharina: Parametrisierung solarer Einstrahlung aus Modellen und Beobachtungen.

METZNER, Doreen: Der Einfluss von ENSO auf den NH Winter im ECHAM5 und die Rolle der Stratosphäre.

WASSMANN, Andreas: Mikrowellenradiometrie auf See.

ZOLL, Yann: Bestimmung des Flüssigwasserpfades aus Mikrowellenradiometer- und Wolkenkameramessungen.

Bachelorarbeit

STEPANSKI, Christin: Die Rolle von Schwerewellen bei großen Stratosphärenerwärmungen.

Universität Köln

Dissertationen

BRÜCHER, Tim: Verbesserung der Simulation des westafrikanischen Klimas durch die Implementierung

eines einfachen dynamischen Vegetationsmodells (SVege) in das Klimamodell ECHAM5.

FRIESE, Elmar: Ein temperaturabhängiges thermodynamisches Modell für das System H+ - NH4+ - Na+ - SO42- - NO3- - Cl- - H2O.

MECH, Mario: Potential of millimeter- and submillimeter-wave satellite observations for hydrometeor studies.

STEUER, Annika: Joint application of ground-based transient electromagnetics and airborne electromagnetics.

TÜRK, Matthias: Ermittlung designrelevanter Belastungsparameter für Offshore-Windkraftanlagen.

Diplomarbeiten

AUDENRIETH-KERSTEN, Iris Maria: Detektion von archäologischen Tunnelstrukturen mit geophysikalischen Methoden an zwei Fallbeispielen:

BREININGER, Veronika: Evaluierung von COSMO-DE- und COSMO-EU-Ensemble-Niederschlagsprognosen unter Berücksichtigung von objektiven Wetterlagen.

EIKENBERG, Sonja: Water vapour transport and precipitation in tropical West Africa on interannual to hourly time scales.

FRÖMMEL, Sascha: Inversion für Transientelektromagnetik unter Einbeziehung von Tschebyscheff Reihenentwicklungen und Lateral Constraints.

HAHN, Matthias: Großskalige Variationen der Sonnenkorona in 2004 und 2006.

KIRCHHÜBEL, Lars: Identifizierung von schadenträchtigen meteorologischen Parametern im Zusammenhang mit Stürmen.

KOTTHAUS, Simone: Einfluss synoptischer Umgebungsbedingungen auf Bodenenergiebilanzmessungen im tropischen Westafrika in der Trocken- und Regenzeit.

LIPPERT, Klaus: Anwendung geophysikalischer Methoden auf geomorphologische Fragestellungen.

LUDWIG, Patrick: Statistisches Postprocessing des Niederschlags von FOOT3DK für die Regenzeit 2002 in Benin (Westafrika).

MOLLIDOR, Lukas: Central-Loop-TEM auf dem Holzmaar, Eifel. Eine Machbarkeitstudie.

PETER, Kerstin: Beobachtungen der Ionosphären- und Ionopausenstrukturen des Mars mit dem Radio Science Experiment MaRS auf Mars Express.

PSCHERER, Martin: Das zeitliche Verhalten des schauerartigen und nicht-schauerartigen Niederschlags.

RAPPENHÖNER, Timo: Erstellung einer flächendeckenden Windpotenzialanalyse für die Region Shanghai (China) mithilfe des dynamisch-statistischen Programms WIEN.

SCHMALZ, Thilo: 1D-Laterally Constraint Inversion radiomagnetotellurischer Daten aus Messgebieten in Dänemark und Rumänien.

SELBACH, Christoph: Langzeitevaluierung von Kurzfristvorhersagen mit einem Ceilometermessnetz.

SEUFERT, Mario: Dynamische Wechselwirkung von Alfvénwellenpaketen:

WIEBE, Heiko: 1D-Joint Inversion von Geoelektrik und Radiomagnetotellurik.

WULMS, Veit: Energetic Neutral Atoms from Titan.

Universität Leipzig

Dissertationen

HEINOLD, Bernd: Regional modeling of Saharan dust in the framework of the SAMUM (SAharan Mineral dUst experiMent) field project.

KNIFFKA, Anke: Einfluss der Inhomogenitäten von Aerosol, Bodenalbedo und Wolken auf das aktinische Strahlungsfeld der Atmosphäre.

Diplomarbeiten

ACHTERT, Peggy: Klassifizierung der hygroskopischen Wachstumsfaktoren von atmosphärischen Aerosolen in der nordchinesischen Tiefebene.

BERGHOF, Maria: Variation des Mischungszustandes nicht flüchtiger Aerosolbestandteile in stark verschmutzten Regionen in China.

FISCHER, Gabi: Invertierungsalgorithmen für die akustische Laufzeittomographie in der Atmosphäre.

HIEBSCH, Anja: Lichtstreuung an nichtsphärischen Teilchen, speziell Chebyshev-Teilchen, und deren Anwendung in der Fernerkundung.

KÖPPE, Martin: Charakterisierung der Submikrometer-Aerosolpartikel in der oberen Troposphäre und unteren Statosphäre.

KOPKA, Kristin: Variabilität des Aerosols und Partikelneubildung in und an Wolken.

KROLL, Katja: Simulation des Einflusses einer Schallschutzwand auf die Schallausbreitung in der Atmosphäre.

MAERCKER, Cordelia: Die Wirkung von Wolkenschatten auf die Energiebilanz in ariden Gebieten bei verschiedener Obenflächenabdeckung.

PÄTZOLD, Thomas: Wolkenmessungen mit dem mobilen LIDAR.

PLACKE, Manja: Analyse kurzperiodischer Windschwankungen im Mesopausenbereich.

PREISSLER, Jana: Geometrische und optische Eigenschaften von Aerosolschichten aus verschiedenen Quellregionen Europas.

SABATH, Daniel: Modellierung von atmosphärischen Wellen mit dem COMMA-LIM.

SCHLEICHARDT, Anja: Kombination von akustischer Laufzeittomographie und FTIR-Messungen zur Bestimmung turbulenter Austauschkoeffizienten.

WALTER, Jörg: Aufbau und Charakterisierung einer kleinen Nebelkammer.

Universität Mainz

Habilitation

KNIPPERTZ, Peter: Tropical-Extratropical Interactions and their Influence on Clouds, Precipitation, Moisture Transports and Dust Emissions..

Dissertation

HOOG, Ines: Laboruntersuchungen zur Aufnahme von NH3 durch Eiskristalle bei Gleichgewicht und beim Wachstum.

Diplomarbeiten

BRÖTZ, Björn: Sensitivitätsstudien mit dem COSMO-Modell zu einem Fall von hochreichender Konvektion während einer Hochdruckwetterlage.

BURROWS, Susannah: Modeling global transport of bacterial aerosol in EMAC.

DEUTSCHER, Carmen: Climatology of Density Currents In The South-

ern Foothills of The Atlas Mountains.

FASSNACHT, Ralf: Der Zusammenhang zwischen CAPE / CINE und Niederschlag in Deutschland.

FRICK, Claudia: Südhemisphärische Tiefdruckgebiete und ihre Wechselwirkung mit antarktischen Windsystemen.

HOHBERGER, Esther: Entwicklung einer objektiven Methode zur Identifikation tropischer Wolkenfahnen mit Hilfe von Infrarot-Satellitendaten.

KUNKEL, Daniel: Ultrafine Particles in the Upper Troposphere and Lower Stratosphere during the 2006 Monsoon Season over West Africa.

MÜLLER, Andreas: Die Tropopauseninversionsschicht in einem hochaufgelösten balancierten Modell.

SPEICHER, Christina: Einfluss von diabatischen Prozessen auf die Intensivierung von Zyklonen.

VON DER WEIDEN, Sarah-Lena: Development and Characterization of the Aerosol Inlet System for the Mobile Laboratory 'MoLa'

WIEGAND, Lars: Der Transport stratosphärischer Luftmassen in die tropische Troposphäre – Klimatologie und Einfluss auf das Ozonbudget.

Technische Universität München

Diplomarbeit

GLONING, Philipp: Spatial and temporal sensivity of long-term phonological time series to North Atlantic Oscillation and temperature in Europe:

JOCHNER, Susanne: Untersuchungen zur Phänologie urbaner und ruraler Gebiet in Deutschland.

Masterarbeit

KLEMENSSON, Valur: Effects of geothermal utilization on the groundwater systems north of Þeistareykir and Gjástykki.

Universität Potsdam

Dissertation

keine

Diplomarbeit

keine

Universität Graz

Dissertation

BORSCHE, Michael: Global Atmospheric Climatologies from Radio Occultation Data and Derivation of Diagnostic Parameters for Climate Monitoring.

Diplom-Hauptprüfungen

HUBINGER, Bernhard: Aerosolklimatologie des östlichen Mittelmeerraumes basierend auf Daten des AERONET (Aerosol RObotic NETworks).

KRASSER, Christine: Evaluierung von Schneeparametern in regionalen Klimasimulationen des Alpenraums mittels Satellitendaten.

SCHÖNGASSNER, Thomas: Validation of MSU tropospheric and stratospheric temperature records with GPS radio occultation climatologies.

SINKOVIC, Tanja: Evaluierung von Wolkenparametern in Klimasimulationen für den Alpenraum mit Fernmessdaten von Satelliten.

Universität Innsbruck

Diplomarbeiten

MEINGASSNER, Andreas: Modellierung des Wasserhaushalts von vier kalkalpinen Einzugsgebieten für verschiedene Klimaszenarien.

BACHER, Michael, Franz: Modellierung der Wasserhaushaltskomponenten im Einzugsgebiet des Pegels Krössbach für verschiedene Klimaszenarien.

NICOLADONI, Oliver: Alpine Wetterlagen und deren Manifestierung in meteorologischen Parametern in und über Innsbruck.

MORAK, Simone: Similarity of Temporal Change in Ice Velocity and Mass Balance of Alpine Glaciers.

KOLAR, Gunther: Anwendung des Schneedeckenmodells CROCUS am Standort der automatischen Wetterstation Teufelsegg im Firngebiet des Hintereisferners.

ASCHAUER, Helmut: Measurement and Simulation of the Energy and Mass Balance of Snow at an Aline Valley Site.

STASZEVSKI, Martin: Verteilung von Feinstaub und meteorologischen Parametern aus PKW-gestützten Messfahrten im Winter 2005/2006 im Raum Schwaz.

RASTNER, Lukas: Modellierung des Abflusses der Ahr im Tauferer Ahrntal für verschiedene Klimaszenarien.

GROSSE, Christian, Peter: Die Modellierung der Wasserhaushaltskomponenten im Einzugsgebiet des Pegels Töll für den Zeitraum 1990 – 2002.

SCHÄFLER, Andreas: Tropospheric Water Vapor Transport in a Preconvective Environment.

LEHNER, Manuela: Idealized Sensitivity Study of Pollution Transport over Alpine Terrain.

MAIR, Johannes: Untersuchung eines Eisfalls am Beispiel der „Kerze“ im Pinnistal.

BURGSTALLER, Michael: Weather Forecasting for a large Sporting Event: World Sailing Games 2006.

THALER, Klaus, Martin: Analyse der Temperaturverhältnisse in der Eisriesenwelt-Höhle im Tennengebirge anhand einer 12 jährigen Messreihe.

SCHAAF, Tobias: Application of Two-layer Reduced-gravity Hydraulic Theory to Bora Winds.

KOLLMANN, Johannes: Investigation of mixing height parametrisation in an alpine valley during winter 2005/06.

LANGHANS, Wolfgang: Cloud-resolving simulations of the August 2005 Alpine flood.

Universität Wien

Dissertationen

BRUGGER, KATHARINA: Globale Erwärmung und neu auftretende Infektionskrankheiten am Beispiel der Usutu Virus Epidemie in Österreich.

LOTTERANER, CHRISTOPH: Synoptisch-klimatologische Auswertung von Windfeldern im Alpenraum.

STEINHEIMER, MARTIN: Der konvektive Anteil am globalen Energiekreislauf.

Diplomarbeiten

BICA, BENEDIKT: Aspekte der hochaufgelösten Niederschlagsanalyse in Gebirgsregionen mit Hilfe eines Variationsansatzes.

BREZOVITS, LEO: Analyse natürlicher und künstlicher im Klima-Wind-Kanal erzeugter Niederschlagsformen.

CHIODO, GABRIEL: Decactal changes in the global surface energy and water budget.

DOS SANTOS CARDOSO, ELSA MARIA: Distanzmaße beim statistischen Downscaling.

FITZKA, MICHAEL: Etablierung eines automatischen Messnetzes mit Ultraschall-Anemometern zur Messung der atmosphärischen Turbulenz.

GRESAK, RICHARD: Windanalysen im Großraum Linz Rückschluss vom Deformationsfeld auf die Topografie.

HOFER, LILIANE: Klimatologie der Schneefallgrenze.

HOFSTÄTTER, MICHAEL: Eine Methode zur Berechnung von Beschneiungszeiten.

HOHENWARTER; GERHARD: Absinken der Schneefallgrenze im Gailtal durch den Entzug von Schmelzwärme.

JURKOVIC, ANITA: Gesamtschneehöhe - vergleichende Zeitreihenanalyse.

MAYER, KLAUS: Application of 3D tomography methods on a seismic 3D data set.

MAURER, RAFFAEL: Mixed Phase Clouds.

PFLEGER, ARIANE: Klimatologie des Cumuluskondensationsniveaus.

Universität Basel

Dissertation

LEHNER, Irene: Carbon Balance of a rain-fed maize field.

Diplomarbeit

LIETZKE, Björn: The role of horizontal CO2-advection in and above a maize-canopy.

Masterarbeiten

ATEYA, Omar: Development of a digital urban elevation model of Cairo for improved estimation of the spatial distribution of radiation.

KLEIBER,Thomas: Bestimmung und Vergleich der Strahlungs- und Energieflüsse auf einem begrünten Dach und einem Kiesdach.

KOLLER, Sara: On the energy balance of a long grass steppe in the kazakh Altai mountains.

MICHEL, Dominik: Flux measurements using optical scintillometry and eddy-covariance over inhomogeneous terrain.

Universität Zürich

Dissertationen

ASCHWANDEN, Andreas; Mechanics and Thermodynamics of Polythermal Glaciers.

BUZZI, Matteo; Challenges in Numerical Weather Prediction at High Resolution in Complex Terrain.

CUI, Junbo; Long-term northern hemispheric tropospheric ozone trends: Contributions of stratosphere inflow and changing emission of anthropogenic ozone precursors.

HOOSE, Corinna; Aerosol processing and its effect on mixed-phase clouds in a global climate Model.

JAUN, Simon; Towards operational probabilistic runoff forecasts.

LANZ, Valentin; Atmospheric transformation and source attribution of reactive organic compounds.

MÜHLBAUER, Andreas; Aerosol-Cloud-Precipitation Interactions in Moist Orographic Flows.

NICOLET, Mathieu; Characterization of ice crystals and water droplets with the ice optical detector device IODE) using depolarization measurements.

NOWAK, Daniela; Radiation and Clouds: Observations and Model Calculations for Payerne BSRN Site.

SANDRADEWI, Jisca; A Study of Wood burning versus Traffic Aerosols using a multiwavelength Aethalometer.

SCARNATO, Barbara; Stratospheric Ozone trend analysis making use of Swiss long term series.

SCHRANER, Martin; Untersuchung über den Einfluss natürlicher und anthropogener Forcings auf das stratosphärische Ozon mit einem globalen Klimamodell.

VOLKEN David; Mesoklimatische Temperaturverteilung typischer Alpentäler.

WEIMER, Silke; Particle Emission of Traffic Emissions and Wood Combustion and its Impact on Spatial Distributions of submicron particulate matter.

Corrigenda

Die im Heft 3/4 des Jahrganges 34 nachgetragene Mainzer Habilitation aus dem Jahr 2006
„ LAWRENCE, Mark G.: Tropospheric Transport Processes and Their Effects on Trace Gases and Aerosols“
wurde fälschlicherweise unter Universität Leipzig gedruckt.

Autoren dieses Heftes

DIPL.-MET. BERNHARD ANGER
Vorhersage- und Beratungszentrale
Geschäftsbereich Wettervorhersage
Bernhard.Anger@dwd.de

DIPL.-MET. KLAUS BÄHNKE
Vorhersage- und Beratungszentrale
Geschäftsbereich Wettervorhersage
Klaus.Baehnke@dwd.de

DR. MICHAEL BALDAUF
Referat Numerische Modelle
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Michael.Baldauf@dwd.de

DR. ULRICH DAMRATH
Referat Verifikation und Interpretation
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Ulrich.Damrath@dwd.de

DIPL.-MET. ANSGAR ENGEL
Vorhersage- und Beratungszentrale
Geschäftsbereich Wettervorhersage
Ansgar.Engel@dwd.de

DR. CHRISTOPH GEBHARDT
Referat Verifikation und Interpretation
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Christoph.Gebhardt@dwd.de

DR. MARTIN GÖBER
Referat Zentrale Fachleitung
Geschäftsbereich Wettervorhersage
Martin.Goeber@dwd.de

DIPL.-MET. DIRK HEIZENREDER
Leitung Referat Zentrale Entwicklung
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Dirk.Heizenreder@dwd.de

DIPL.-MET. JENS HOFFMANN
Vorhersage- und Beratungszentrale
Geschäftsbereich Wettervorhersage
Jens.Hoffmann@dwd.de

DIPL.-MET. THOMAS KRATZSCH
Leitung Zentrale Fachleitung
Geschäftsbereich Wettervorhersage
Thomas.Kratzsch@dwd.de

DIPL.-MET. SABINE KRENOVSKY
Leitung Vorhersage- und Beratungszentrale
Geschäftsbereich Wettervorhersage
Sabine.Krenovsky@dwd.de

DIPL.-MET. DETLEV MAJEWSKI
Leitung Referat Numerische Modelle
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Detlev.Majewski@dwd.de

DIPL.-MET. ULRICH PFLÜGER
Referat Verifikation und Interpretation
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Ulrich.Pflueger@dwd.de

DR. BERNHARD K. REICHERT
Referat Zentrale Entwicklung
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Bernhard.Reichert@dwd.de

DR. MICHAEL ROHN
Referat Zentrale Entwicklung
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Michael.Rohn@dwd.de

DIPL.-MET. THOMAS SCHUMANN
Vorhersage- und Beratungszentrale
Geschäftsbereich Wettervorhersage
Thomas.Schumann@dwd.de

DR. AXEL SEIFERT
Referat Numerische Modelle
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Axel.Seifert@dwd.de

DR. GERHARD STEINHORST
Leitung Geschäftsbereich Wettervorhersage
Gerhard.Steinhorst@dwd.de

DR. KLAUS STEPHAN
Referat Datenassimilation
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Klaus.Stephan@dwd.de

DR. SUSANNE THEIS
Referat Verifikation und Interpretation
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Susanne.Theis@dwd.de

DR. RALF THEHOS
Referat Zentrale Entwicklung
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Ralf.Thehos@dwd.de

DR. SEBASTIAN TREPTE
Referat Zentrale Entwicklung
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Sebastian.Trepte@dwd.de

DR. ANDREAS WALTER
Referat Zentrale Entwicklung
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Andreas.Walter3@dwd.de

DIPL.-MET. ELMAR WEIGL
Referat Niederschlagsüberwachung
Geschäftsbereich Klima und Umwelt
Elmar.Weigl@dwd.de

DIPL.-MET. HARALD WEINGÄRTNER
Leitung Abteilung Basisvorhersagen
Geschäftsbereich Wettervorhersage
Harald.Weingaertner@dwd.de

DR. TANJA WINTERRATH
Referat Niederschlagsüberwachung
Geschäftsbereich Klima und Umwelt
Tanja.Winterrath@dwd.de

sämtliche:
Deutscher Wetterdienst
Frankfurter Str. 135
63067 Offenbach am Main

DIPL.-INFORM. SIBYLLE HAUCKE
Referat Zentrale Entwicklung
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung
Deutscher Wetterdienst
Michendorfer Chaussee 23
14473 Potsdam
Sibylle.Haucke@dwd.de

DIPL.-MET. UWE SCHICKEDANZ
Leitung Regionalzentrale Stuttgart
Deutscher Wetterdienst
Plieninger Straße 70
70794 Filderstadt-Bernhausen
Uwe.Schickedanz@dwd.de

DIPL.-MET. WOLFGANG SEIFERT
Leitung Regional- und Seewetterzentrale
Deutscher Wetterdienst
Bernhard-Nocht-Straße 76
20359 Hamburg
Wolfgang.Seifert@dwd.de

promet Vorschau auf die nächsten Hefte

- Anwendungen von „E-Learning“ in der Meteorologie
  (Fachredaktion: Dr. W. Jacobs, Dipl.-Met. H. Bauer)
- Fernmessung von Wasserdampf und Wolken
  (Fachredaktion: Prof. Dr. S. Crewell, Prof. Dr. C. Simmer)
- Meteorologische Aspekte regenerativer Energien
  (Fachredaktion: Dr. D. Heinemann)

Übersicht der bisher herausgegebenen Hefte

pro*met* - Meteorologische Fortbildung

Archiv der vollständigen Ausgaben (pdf-Dokumente): www.dwd.de/promet

1 (1971) 1/2 Mikro- und Makroturbulenz

2 (1972) 1 Numerische Vorhersage
2 (1972) 2 Satellitenmeteorologie 1
2 (1972) 3 Satellitenmeteorologie 2
2 (1972) 4 Wolkenphysik

3 (1973) 1 Das barotrope Modell
3 (1973) 2 Geschichte der meteorologischen Strahlungsforschung
3 (1973) 3 Messtechnik und Automation
3 (1973) 4 Technoklimatologie

4 (1974) 1 Die Grenzschicht der Atmosphäre
4 (1974) 2 Medizinmeteorologie
4 (1974) 3 Instrumente und Methoden
4 (1974) 4 Vorhersageprüfung

5 (1975) 1 Agrarmeteorologie heute
5 (1975) 2 Die chemische Zusammensetzung der unteren Atmosphäre - Teil 1: Gase
5 (1975) 3 Die chemische Zusammensetzung der unteren Atmosphäre - Teil 2: Aerosole
5 (1975) 4 GATE 1

6 (1976) 1 GATE 2
6 (1976) 2 Die Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre
6 (1976) 3 Das barokline Modell
6 (1976) 4 Die Energetik der Allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre

7 (1977) 1 Radioaktivität der Atmosphäre
7 (1977) 2 Luftelektrizität 1
7 (1977) 3 Luftelektrizität 2
7 (1977) 4 Klimaschwankungen

8 (1978) 1 Aktuelle Probleme der Flugmeteorologie
8 (1978) 2/3 Anthropogene Klimamodifikation
8 (1978) 4 Sturmuten und Seegang 1

9 (1979) 1 Sturmuten und Seegang 2
9 (1979) 2/3 Zirkulationsmodelle
9 (1979) 4 Stadtklima

10 (1980) 1/2 Klimamodelle
10 (1980) 3 Klima und Planung 1
10 (1980) 4 Klima und Planung 2

11 (1981) 1 Meso-scale Modelle
11 (1981) 2/3 Transport und turbulente Diffusion von Luftbeimengungen
11 (1981) 4 Flugmeteorologische Probleme der planetarischen Grenzschicht

12 (1982) 1/2 Synoptische Meteorologie heute – Zentraler synoptischer Dienst
12 (1982) 3/4 Biometeorologie

13 (1983) 1/2 Statistische Methoden der Klimatologie
13 (1983) 3/4 Neuere Ergebnisse der Satellitenmeteorologie

14 (1984) 1 Das Europäische Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage (EZMW)
14 (1984) 2/3 Maritime Meteorologie
14 (1984) 4 Klima und Volkswirtschaft 1

15 (1985) 1 Klima und Volkswirtschaft 2
15 (1985) 2/3 Strahlungstransporte in der Atmosphäre
15 (1985) 4 Klimarelevante Spurenstoffe 1

16 (1986) 1 Klimarelevante Spurenstoffe 2
16 (1986) 2/3 Hydrometeorologie
16 (1986) 4 Ozon 1

17 (1987) 1/2 Ozon 2 & 3
17 (1987) 3/4 Mesoskaliges Klima

18 (1988) 1-3 Das Max-Planck-Institut für Meteorologie
18 (1988) 4 Meteorologie und Klimatologie der Antarktis 1

19 (1989) 1/2 Meteorologie und Klimatologie der Antarktis 2&3
19 (1989) 3/4 Reaktive Spurenstoffe in der Atmosphäre

20 (1990) 1/2 Spezielle geophysikalische Verfahren
20 (1990) 3/4 Fernerkundung in der Meteorologie 1

21 (1991) 1/2 Fernerkundung in der Meteorologie 2
21 (1991) 3/4 ALPEX - das Alpine Experiment 1

22 (1992) 1 ALPEX - das Alpine Experiment 2
22 (1992) 2-4 Meteorologie der Mittleren Atmosphäre

23 (1993) 1/2 Wolkenphysik und Wolkendynamik 1
23 (1993) 3 Wolkenphysik und Wolkendynamik 2
23 (1993) 4 Allgemeine Themen

24 (1995) 1-3 Wettervorhersagedienst 1
24 (1995) 4 Wettervorhersagedienst 2

25 (1996) 1/2 Wettervorhersagedienst 3
25 (1996) 3 Beiträge zu Grundfragen der Meteorologie
25 (1996) 4 Das Meteorologische Observatorium Hohenpeißenberg 1

26 (1997) 1/2 Das Meteorologische Observatorium Hohenpeißenberg 2

26 (2000) 3/4 Photosmog 1

27 (2001) 1/2 Photosmog 2
27 (2002) 3/4 Die neue Modellkette des DWD 1

28 (2002) 1/2 Die neue Modellkette des DWD 2
28 (2002) 3/4 Numerische Klimamodelle - Was können sie, wo müssen sie verbessert werden? Teil 1: Das Klimasystem der Erde

29 (2003) 1-4 Numerische Klimamodelle - Teil 2: Modellierung natürlicher Klimaschwankungen

30 (2003) 1/2 Umweltmeteorologie
30 (2004) 3 Numerische Klimamodelle - Teil 3, 1. Teilheft
30 (2004) 4 Numerische Klimamodelle - Teil 3, 2. Teilheft

31 (2005) 1 Mittlere und obere Atmosphäre
31 (2005) 2-4 100 Jahre Atmosphärensondierung am Meteorologischen Observatorium Lindenberg

32 (2006) 1/2 Atmosphäre und Gebirge
32 (2006) 3/4 Klima und Wetter in den Tropen

33 (2007) 1/2 Phänologie
33 (2007) 3/4 Biometeorologie des Menschen

34 (2008) 1/2 Meteorologie und Versicherungswirtschaft
34 (2008) 3/4 Die Nordatlantische Oszillation (NAO)

35. (2009) 1-3 Moderne Verfahren und Instrumente der Wettervorhersage im DWD