



Projekt RADVOR-OP

**Radargestützte, zeitnahe Niederschlagsvorhersage
für den operationellen Einsatz
(Niederschlag-Nowcasting-System)**

Projektleiterin:

Hella Bartels

Bearbeiter:

**Elmar Weigl, Stefan Klink, Otfried Kohler,
Thomas Reich, Wolfgang Rosenow, Peter Lang,
Christian Podlasly, Tanja Winterrath,
Gerhard Adrian, Detlev Majewski, Jürgen Lang**

**Zusammenfassender Abschlussbericht
für die Projektlaufzeit von 2002 bis 2005**

Dezember 2005

Abschlussbericht zum Projekt RADVOR-OP

Deutscher Wetterdienst
Abteilung Hydrometeorologie

Dezember 2005

<http://www.dwd.de/de/wir/Geschaeftsfelder/Hydrometeorologie/Hydrometeorologie.htm>

Vorwort

In der Hochwasserwirkungskette „Niederschlagsvorhersage – Niederschlag-Abflussmodellierung – Hydraulisches Modell“ sind Unsicherheiten in allen Teilkomponenten der Wirkungskette enthalten. Für die Hochwasserfrühwarnung und –vorhersage ist aber die Vorhersagbarkeit des Niederschlags von herausragender Bedeutung. Vom Hochwasservorhersagedienst der Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder wird daher die Forderung an den Deutschen Wetterdienst (DWD) herangetragen, für seinen operationellen Betrieb eine möglichst genaue und zeitnah zu den Beobachtungen liegende Vorhersage der Niederschlagsfelder hinsichtlich Lage, Niederschlagshöhe und Niederschlagsintensität sowie Zugrichtung in einem kleinräumigen Raster zu erhalten. Unsicherheiten in diesen Faktoren wirken sich insbesondere bei Abflussberechnungen in kleinen Einzugsgebieten aus.

Wegen der zahlreichen Wechselwirkungen im atmosphärischen Wasserkreislauf ist die Niederschlagsvorhersage über numerische Wettervorhersagemodelle immer in die Beschreibung des chaotischen Zustands der Atmosphäre eingebettet. Während jedoch für die Güte einer Vorhersage z.B. von Temperatur, Windrichtung und Windstärke in den letzten Jahrzehnten im DWD deutliche Verbesserungen erzielt werden konnten, gestaltet sich die Verbesserung der Vorhersage von Starkniederschlagsereignissen selbst in den nächsten 24 Stunden mit der geforderten Genauigkeit als äußerst schwierig.

Aus diesem Grunde hat die Wasserwirtschaft im Jahre 2000 in Abstimmung und in Übereinstimmung mit der Zukunftsplanung im DWD das Projekt „Radargestützte, zeitnahe Niederschlagsvorhersage für den operationellen Einsatz (RADVOR-OP)“ mit einer 3-jährigen Laufzeit von 2002 bis 2005 initiiert und in die Förderung der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) eingebracht. Um dem Niederschlagsspektrum der jeweils diskret und lokal begrenzt auftretenden kurzzeitigen Starkniederschlagsereignisse (Schauer) und den flächenverteilten Langzeitniederschlägen (Dauerregen) in verschiedenen Zeit- und Raumskalen gerecht werden zu können, wird in RADVOR-OP differenziert zwischen dem „RADAR-Nowcasting“ auf der Basis stündlicher angeeichter Radarniederschlagsdaten (RADOLAN) einerseits und dem „LM-Kürzestfrist“ (LMK) auf der Basis des Lokalmodells mit reduzierten Gitterabständen und verkürzten Vorhersagezeiten, aber 3-stündlichen Neuberechnungen mit zeitnahen Radarniederschlagsfeldern andererseits.

Wegen der Komplexität des Gesamtvorhabens war die Unterstützung der verschiedensten Einheiten innerhalb des DWD für die Durchführung des Projekts RADVOR-OP – allen voran der Forschung und Entwicklung einschließlich des sog. „Aktionsprogramms 2003“, der Satelliten- und Radarmeteorologie, der Hydrometeorologie mit Zuarbeit durch eine Firma für meteorologische Beratung und Softwareerstellung sowie der fachlichen Begleitung der technischen Infrastruktur – notwendig. Die anwendungsbezogenen Entwicklungen wurden jeweils in Abstimmung mit Ländervertretern aus der LAWA vorgenommen. Bei allen Beteiligten möchte ich mich an dieser Stelle ganz herzlich für die fruchtbare Zusammenarbeit zur Erreichung des angestrebten Ziels bedanken.

Dass darüber hinaus noch erhebliche Anstrengungen unternommen werden müssen, die Niederschlagsvorhersage in den verschiedenen Skalenbereichen weiter zu verbessern, zeigen z.B. das Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Quantitative

Niederschlagsvorhersage (PQP)“ und das Förderprogramm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung „Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse (Rimax)“ sowie die internationalen Aktivitäten der kooperierenden nationalen Wetterdienste mit Ensemblerechnungen zur Quantifizierung der Unsicherheiten in der Niederschlagsvorhersage durch Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten (z.B. COSMO-LEPS) einerseits und Qualitätskontrollen und –korrekturen der Radarrohdaten (z.B. COST 717, 2005) andererseits. Nicht zu vergessen ist zudem der Einfluss des globalen und regionalen Klimawandels auf den sich verändernden Wasserkreislauf und das Auftreten damit verknüpfter Starkniederschlagsereignisse.

Projektleiterin Hella Bartels

Deutscher Wetterdienst
Abteilung Hydrometeorologie

Offenbach am Main im Dezember 2005

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	7
2 Datengrundlagen	9
2.1 Messnetze	9
2.1.1 Bodenniederschlagsmessnetze/Ombrometer	9
2.1.2 Radarverbund	12
2.1.3 Weitere Eingangsdaten	17
2.2 RADOLAN-Analysen	20
2.3 Numerische Wettervorhersage (GME / LM bzw. LME / LMK)	23
2.3.1 Globalmodell GME	23
2.3.2 Lokalmodell LM bzw. LME	24
2.3.3 LM-Kürzestfrist (LMK)	26
3 Nowcasting und Kürzestfristvorhersagen	29
3.1 Überblick	29
3.2 Projekt RADVOR-OP: Planung und Realisierung	30
3.3 Möglichkeiten und Grenzen der quantitativen Niederschlagsvorhersagen	32
4 Projektbearbeitung	39
4.1 Teilprojekt 1: LM-Kürzestfrist	39
4.1.1 Stand der Entwicklung des LM-Kürzestfrist	39
4.1.2 Datenassimilation mit dem Latent Heat Nudging	40
4.1.3 Radardaten für das Latent Heat Nudging	43
4.1.4 Wechselwirkungen zwischen dem prognostischen Niederschlag und dem Latent Heat Nudging	47
4.1.5 Fallstudien zum Latent Heat Nudging	50
4.1.6 Zusammenfassung und Ausblick	56
4.2 Teilprojekt 2: RADAR-Nowcasting	59
4.2.1 Übersicht der Arbeitsschritte und zeitlicher Ablauf	59
4.2.2 Charakterisierung von Niederschlagsfeldern	59

4.2.3	Entwicklung von Niederschlagsfeldern	63
4.2.4	Verlagerung konvektiver Niederschlagsfelder	65
4.2.5	Verlagerung stratiformer Niederschlagsfelder	70
4.2.6	Verschneidung der unterschiedlichen Verlagerungen zu einer Vorhersage	73
4.2.7	Quantifizierung der Verlagerung	79
4.2.8	Unterscheidung der Vorhersage in flüssigen und festen Niederschlag	85
4.3	Teilprojekt 3: RADAR-Verifikation	86
4.3.1	Aneichung hochwasserrelevanter Niederschlagsereignisse	86
4.3.2	Methoden der Niederschlagsverifikation	89
4.3.3	Verifikation der Niederschlagsvorhersagen aus dem LMK und dem RADAR-Nowcasting mit angeeichten quantitativen Radarniederschlagsdaten	90
5	Ausblick auf zukünftige Arbeiten	91
5.1	Entwicklungen im Bereich der LM-Kürzestfrist	91
5.2	Entwicklungen im Bereich des RADAR-Nowcasting	93
5.2.1	Weiterentwicklung des konvektiven Moduls	93
5.2.2	Weiterentwicklung des stratiformen Moduls	94
5.2.3	Verlagerung mittels LM-Windfeldern	96
5.2.4	Niederschlagsentwicklung auf der Basis des dreidimensionalen Radarproduktes	102
6	Schlussfolgerungen	103
7	Zusammenfassung	105
8	Anhang	107
8.1	Niederschlagsregelwerk	107
8.2	Überblick über operationell eingesetzte Nowcasting-Verfahren	109
8.3	RADVOR-OP-Schautafel	112
8.4	Abkürzungsverzeichnis	113
8.5	Literaturverzeichnis	115
8.6	Abbildungsverzeichnis	118
8.7	Tabellenverzeichnis	121
8.8	Im Rahmen des Projektes RADVOR-OP genutzte Radarprodukte	122

1 Einleitung

Mit der Überführung der Radar-Online-Aneichung in den operationellen Routinebetrieb beim Deutschen Wetterdienst (DWD) im Juni 2005 sind die Voraussetzungen für eine auf quantitativen Radarniederschlagsdaten basierende Niederschlagsvorhersage geschaffen worden. Die Analyse des Niederschlags mittels der Kombination von Daten moderner Radarsysteme und des automatisch fernmeldenden Ombrometermessnetzes wird als Aneichung bezeichnet.

Radar daten liefern zunächst nur Informationen über die Intensität der Reflexion des vom Radargerät ausgesandten Impulses durch Wolken- bzw. Niederschlagspartikel. Zwar lassen sich in Abhängigkeit von der Häufigkeitsverteilung des Durchmessers dieser Partikel, dem sogenannten Tropfenspektrum, Relationen zwischen der Niederschlagsintensität und der Rückstreuung der Energie des Radarimpulses an den Niederschlagsteilchen (der Radarreflektivität Z) bestimmen, aber diese sogenannten Z - R -Beziehungen unterliegen sehr starken räumlichen und zeitlichen Variationen, so dass ein Abgleich mit Niederschlagsmesswerten aus dem bodengebundenen Messnetz erforderlich ist.

Die in Echtzeit ermittelten angeeichten stündlichen quantitativen Radarniederschlagsdaten stellen vor allem im Zusammenhang mit dem Hochwasser-Warnmanagement der zuständigen Länderbehörden für die Wasserwirtschaft eine wichtige Basis dar. Darauf aufbauend wird im Rahmen des vorliegenden Projekts RADVOR-OP ein sog. Niederschlag-Nowcasting-System eingerichtet, das radargestützte, zeitnahe Niederschlagsvorhersagen für den operationellen Einsatz liefert.

Der nachfolgend vorgelegte zusammenfassende Bericht gibt einen Überblick über die Arbeiten an dem Projekt während der Jahre 2002 bis 2005. Die Bearbeitung wird durch die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) gefördert und soll bis 2005 abgeschlossen sein. Mit der im Mai 2002 angesetzten ersten Projektsitzung, an der die Ziele für RADVOR-OP und die Aufgabenverteilung zwischen der Abteilung Hydrometeorologie, der Abteilung Meteorologische Analyse und Modellierung sowie dem Meteorologischen Observatorium Hohenpeissenberg beim Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung und dem Referat Fernerkundung des Geschäftsbereiches Basisdienste vorgestellt worden sind, konnten die Arbeiten aufgenommen werden.

Durch das nur ein Jahr später begonnene Aktionsprogramm 2003 (AP2003) des DWD, das vor allem neue und optimierte Verfahren zur Verbesserung der Wettervorhersage und Warnungen bis Ende 2006 entwickeln und operationalisieren soll, bekam RADVOR-OP nicht unwe sentliche Verstärkung. So werden in den beiden Arbeitsgebieten „Radardatenqualität“ und „Verlagerung von Radarniederschlagsfeldern“ zusätzliche Aufgaben, die auch für RADVOR-OP von Bedeutung sind, durchgeführt.

In den folgenden Kapiteln werden zunächst grundlegende Fakten zu den Datengrundlagen und zu den Nowcasting- und Kürzestfristvorhersagen vermittelt. Danach folgt die ausführliche Beschreibung der in drei Teilprojekten geleisteten Arbeiten mit Fallbeispielen von hydrometeorologisch herausragenden Starkniederschlagsereignissen. Mit einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten wird der Bericht abgerundet.

2 Datengrundlagen

2.1 Messnetze

2.1.1 Bodenniederschlagsmessnetze/Ombrometer

Zur Online–Aneichung der Radarniederschlagsdaten findet im DWD vorrangig der Niederschlagssensor PLUVIO der Firma Ott Verwendung. Er dient zur automatischen Ermittlung der Niederschlagshöhe und Niederschlagsintensität und entspricht im Wesentlichen der Bauform nach „HELLMANN“ (nationales Referenzmessgerät im WMO–Standard). An allen DWD–Standorten mit automatischen Ombrometergeräten wird der konventionelle Niederschlagsmesser nach HELLMANN zur Qualitätsprüfung der Automatenwerte parallel betrieben.

Im Gegensatz zu konventionellen Niederschlagssensoren arbeitet der PLUVIO nach dem Wägeprinzip. Jedes Niederschlagsereignis, sowohl Flüssig– als auch Festniederschlag, wird durch eine Gewichtsbestimmung erkannt. Durch das Fehlen eines Auffangtrichers mit Kippwaageneinrichtung benötigt der PLUVIO einen verhältnismäßig geringen Wartungsaufwand.

Als Sensorelemente dienen hochpräzise, langzeitstabile Dehnungsmessstreifen, die gegen Umwelteinflüsse hermetisch abgedichtet sind. Eine speziell entwickelte „Querlenkerkonstruktion“ sorgt für eine spannungsfreie Krafteinleitung auf den Sensor. Weiterhin verhindert eine mechanische Überlastsicherung Beschädigungen der Wägezelle durch Überlast. Ein Außentemperaturfühler an der Bodenplatte (Aluminium) des PLUVIO dient zur Temperaturkompensation des Wägemechanismus und zur Ermittlung der Umgebungstemperatur für die Steuerung der Auffangringheizung. Auf Grund der gewünschten mechanischen Kopplung zur Bodenplatte können die Temperaturwerte von denen eines Standard–Lufttemperaturfühlers abweichen. Weiterhin beinhaltet der Niederschlagssensor eine Heizungsregelung zur Beheizung des Auffangringes bei Winterbetrieb (separate Spannungsversorgung).

Alle Messwerte sind über die serielle RS–485–Schnittstelle abrufbar (RS–232 optional). Eine selbständige und kontinuierliche Überwachung aller Messwerte ermöglicht eine sichere Selbstdiagnose des gesamten Messsystems. Nach Anschluss der Versorgungsspannung und Schließen des Rohrgehäuses nimmt der PLUVIO automatisch den Messbetrieb auf (Rohrgehäuse–Schalter). Alle Geräte sind werkseitig kalibriert. Vor Ort sind keine weiteren Tarier– oder Kalibriermaßnahmen notwendig. Alle elektrischen Kontakte erfolgen durch galvanische Verbindungen. Die Zuleitungen sind steckbar ausgeführt (Ausnahme: Potentialausgleich). Der Niederschlagssensor ermittelt alle sechs Sekunden das Gewicht des Auffangbehälters einschließlich des Inhalts mit einer Auflösung von 0.01 mm. Aus der Differenz zwischen diesem Messwert und dem Gewicht des leeren Auffangbehälters ergibt sich der momentane Behälterinhalt.

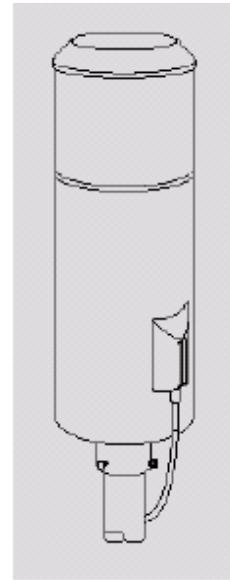


Abb. 2.1:
Niederschlags-
sensor PLUVIO

Zu jeder vollen Minute berechnet der PLUVIO aus mehreren Rohwerten einen gefilterten Behälterinhalt. Ein spezieller Filteralgorithmus verhindert hierbei eine Verfälschung der Messergebnisse, wie sie zum Beispiel durch Windeinfluss verursacht werden könnte (nicht zu verwechseln mit Überwehungseffekten, vgl. RICHTER 1995). Die Differenz aus dem aktuellen und dem vorhergehenden, gefilterten Behälterinhalt ergibt die Niederschlagsintensität in mm/min.

Diese Minutenwerte der Niederschlagsintensität addiert der PLUVIO zur „akkumulierten Niederschlagshöhe“ (maximaler Wert: 999.99 mm).

Die Umgebungstemperatur wird ebenfalls alle sechs Sekunden ermittelt.

Die Auswertung des Niederschlags beruht auf der Erfassung aller Gewichtszuwächse in einem bestimmten Zeitabschnitt. Gewichtszuwächse oberhalb der Intensitätsansprechschwelle werden mit einer Ausgabeverzögerung von 85 bis 400 Sekunden ausgegeben. Langsame Erhöhungen mit sehr geringen Zuwächsen können bis zu 40 Minuten angesammelt werden. Bei Erreichen der Intensitätsansprechschwelle erfolgt dann eine Niederschlagsausgabe. — Diese Intensitätsansprechschwelle des DWD–PLUVIO liegt bei 0.03 mm, bezogen auf 40 Minuten Sammelzeit. Der erfassbare Feinstniederschlag beträgt somit = 0.045 mm/h.

Die derart gewonnenen Niederschlagsdaten werden mit Hilfe der automatischen Messwerterfassungssysteme vom Typ AMDA für das Messnetz 2000 des Deutschen Wetterdienstes erfasst und dem zentralen Datenbestand zugeführt. In diesem Messnetz sind verschiedene Teilnetze zu unterscheiden, deren Melde– bzw. Abrufrhythmen unterschiedlich sind.

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die Anzahl der für die Radar–Online–Aneichung verfügbaren Ombrometermessstellen aus dem Messnetz 2000 des DWD und den Verdichtungsmessnetzen der Bundesländer.

Automaten	Anzahl / Messnetz	DWD
MIRIAM, AFMS–2 (Ersatz durch AMDA I/II) [hauptamtlich]	≈ 200 (einschl. NABAM)	DWD
AMDA III/S [nebenamtlich]	≈ 300 (Grundmessnetz Klima)	DWD
AMDA III/N [nebenamtlich]	≈ 500 (Grundmessnetz RR) ≈ 100 (Verdichtungsmessnetz)	DWD Land Bayern
RR–Fremdnetze Bundesländer	≈ 200 (Verdichtungsmessnetz)	Bundesländer

Tabelle 2.1: Überblick über die verwendeten Ombrometermessnetze

Die etwa 200 meteorologischen Hauptstationen, bei denen die Messwerterfassung derzeit zum Teil noch mit Hilfe älterer Anlagen vom Typ MIRIAM bzw. AFMS–2 erfolgt, und die auch das sogenannte nationale Basismessnetz umfassen, übertragen stündlich Messwerte an die Zentrale. Im Zuge der Umgestaltung des Netzes wird die Datenerfassung durch Anlagen vom Typ AMDA I bzw. II erfolgen.

Daneben stehen die etwa 300 Messstellen des DWD–Grundmessnetzes Klima, nebenamtliche Wetterstationen, die über Anlagen des Typs AMDA III ebenfalls stündlich Messwerte an die zentrale Erfassungseinheit melden.

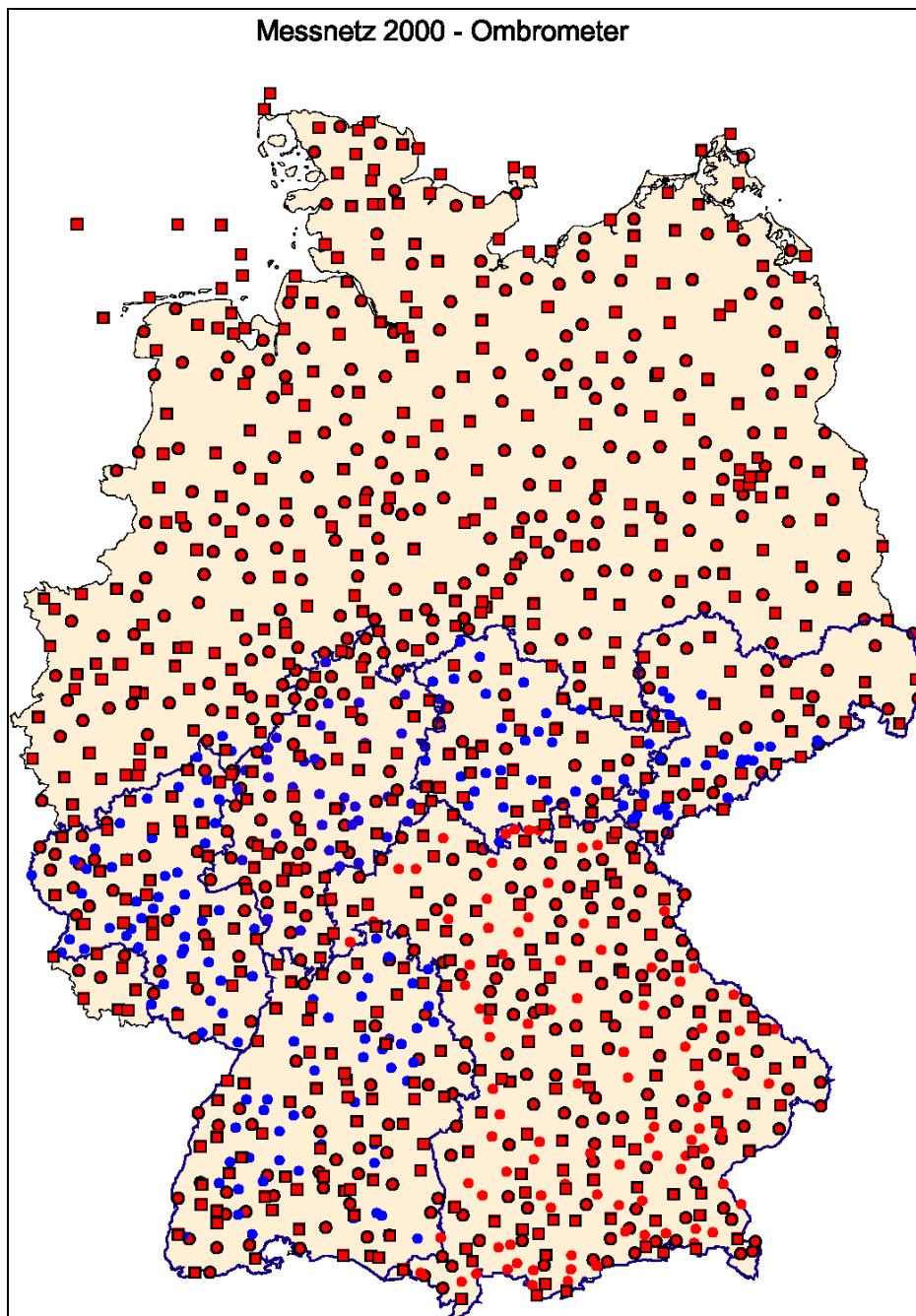


Abb. 2.2: Regionale Verteilung der Ombrometermessstellen
 Quadrate: DWD–Stationen mit stündlichem Abruf;
 Kreise: Stationen mit stündlichem Abruf im Ereignisfall
 rot: Datenerfassung durch AMDA III (ohne Rand: Land Bayern);
 blau: Verdichtungsmessnetze Bundesländer

Alle übrigen Stationen übertragen im normalen Melderhythmus nicht stündlich, sondern nur einmal täglich ihre Daten. Es handelt sich hierbei um weitere etwa 500 AMDA-III-Anlagen des DWD-Niederschlagsmessnetzes, sowie ergänzend um 300 Messstellen aus diversen Ländermessnetzen, den sogenannten Verdichtungsmessnetzen, von denen wiederum etwa 100 Ombrometer in Bayern bereits über Erfassungsanlagen vom Typ AMDA III abgerufen werden können. Abb. 2.2 gibt einen Überblick über die räumliche Verteilung der etwa 1300 Ombrometermessstellen in Deutschland.

Für den Fall, dass im Bereich des Messnetzes starke Niederschläge auftreten, lassen sich allerdings im sogenannten „Ereignisfall“ die Niederschlagsdaten dieser zusätzlichen etwa 800 Messstellen ebenfalls stündlich abrufen. Dadurch stehen für den Fall eines zu erwartenden Hochwasserereignisses insgesamt etwa 1300 Bodenniederschlagsmesswerte zur Aneichung der operationell gewonnenen Radardaten zur Verfügung. Nähere Angaben zur Definition dieses sogenannten Ereignisfalles finden sich in DWD, 2004a.

2.1.2 Radarverbund

Nachdem in den 60er und 70er Jahren durch den Deutschen Wetterdienst Analog-Radargeräte zur Wetterbeobachtung eingesetzt worden waren, die vom Nutzer eine interaktive Arbeit erforderten, begann nach dem Münchner Hagelunwetter am 12. Juli 1984 der Aufbau eines Wetterradarverbundes, der 1987 seinen ersten Meilenstein mit der Installation einer Wetterradaranlage in München fand.

Es handelte sich dabei um sogenannte C-Band-Radargeräte, deren Signalfrequenz etwa 5.6 GHz beträgt; das entspricht einer Wellenlänge der Größenordnung von 5 cm. Das Radarsystem stellt den Sensor dar, der die Radar-Rohdaten, d.h. die Seiten- und Höhenwinkel sowie die Schrägentfernung, die zur Berechnung der Wetterdaten benötigt werden, ermittelt. Ein Radar-Prozessor verknüpft alle gemessenen Werte und übergibt diese Daten dem Auswertesystem. In den ersten Jahren wurden zunächst fünf Radargeräte installiert. Vom Jahre 1994 an erfolgte die Installation weiterer elf Radargeräte eines anderen Typs (sog. Dopplerradargeräte), wobei die einzelnen Geräte in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Installation im Detail technische Verbesserungen aufweisen.

Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über den zeitlichen Ablauf der Inbetriebnahme.

Jahr der Inbetriebnahme (operationell)	Standort	Gerätetyp
1987 ¹	München	DWSR-88 C
1988	Frankfurt/Main	DWSR-88 C
1990	Hamburg	DWSR-88 C
1991	Berlin	DWSR-88 C
1991	Essen	DWSR-88 C
1994	Hannover	METEOR 360 AC
1994	Emden	METEOR 360 AC
1994	Neuhaus	METEOR 360 AC

¹ letzte Verlegung 1992

Jahr der Inbetriebnahme (operationell)	Standort	Gerätetyp
1995	Rostock	METEOR 360 AC
1996	Ummendorf	METEOR 360 AC
1997	Feldberg/Schw.	METEOR 360 AC
1997 ²	Eisberg	METEOR 360 AC
1997 ²	Flechtdorf	METEOR 360 AC
1998	Neuheilenbach	METEOR 360 AC
1998	Türkheim	METEOR 360 AC
2000	Dresden	METEOR 360 AC

Tabelle 2.2: Reihenfolge der Einrichtung der Radarstandorte des DWD

Ergänzend dazu ist die Tabelle 2.3 mit den Angaben zur geographischen Lage und zu den verwendeten Stationskennungen bzw. –kürzeln zu lesen. Schließlich vermittelt Abb. 2.3 einen Eindruck von der geographischen Verteilung der Radarstandorte und von der Abdeckung des Bundesgebietes anhand der jeweils eingezeichneten Reichweite der Messungen von derzeit 125 km, die für die quantitative Niederschlagsbestimmung herangezogen werden.

WMO- Nr.	Name	Stand- ort- kürzel	Breite [N]	Länge [E]	Antenne [m ü.NN]	Turm- höhe [m]
10147	Hamburg–Fuhlsbüttel	HAM	53° 37' 19"	09° 59' 52"	46	30
10169	Rostock–Warnemünde	ROS	54° 10' 35"	12° 03' 33"	36	35
10204	Emden–Knock	EMD	53° 20' 22"	07° 01' 30"	58	56
10338	Hannover	HAN	52° 27' 47"	09° 41' 54"	81	29
10384	Berlin–Tempelhof	BLN	52° 28' 43"	13° 23' 17"	80	30
10356	Ummendorf	UMD	52° 09' 39"	11° 10' 38"	185	24
10410	Essen	ESS	51° 24' 22"	06° 58' 05"	180	27
10440	Flechtdorf	FLD	51° 18' 43"	08° 48' 12"	623	72
10488	Dresden–Flughafen	DRS	51° 07' 31"	13° 46' 11"	262	38
10557	Neuhaus	NEU	50° 30' 03"	11° 08' 10"	873	26
10605	Neuheilenbach	NHB	50° 06' 38"	06° 32' 59"	585	34
10637	Frankfurt/Main	FRA	50° 03' 06"	08° 34' 05"	146	35
10780	Eisberg	EIS	49° 32' 29"	12° 24' 15"	799	28

² Verlegung 2004

WMO-Nr.	Name	Standortkürzel	Breite [N]	Länge [E]	Antenne [m ü.NN]	Turmhöhe [m]
10832	Türkheim	TUR	48° 35' 10"	09° 47' 02"	765	34
10871	München–Fürholzen	MUC	48° 20' 14"	11° 36' 46"	511	22
10908	Feldberg/Schwarzwald	FBG	47° 52' 28"	08° 00' 18"	1517	25

Tabelle 2.3: Stationskennungen und derzeitige Koordinaten der Radarstandorte

Der Einsatz der Radargeräte des DWD–Radarverbundes erfolgt in zwei verschiedenen Scanmodi — der Raumabtastung (*volume scan*) und der Niederschlagsabtastung (*precipitation scan*, auch: *precip scan*).

Im ersten Modus, dem *volume scan*, durchläuft die Antenne alle 15 Minuten 18 verschiedene Elevationswinkel von 0.5° bis 37.0°. Dabei wird die Atmosphäre bis in eine Höhe von 12 km abgetastet. Der *volume scan* besitzt wiederum zwei verschiedene Messmodi: Der *intensity mode* deckt die unteren Elevationswinkel von 0.5° bis 4.5° mit einer horizontalen Reichweite von 230 km ab, der *doppler mode* erfasst die Elevationswinkel darüber mit einer Reichweite von 120 km.

Der *precipitation scan*, der für die quantitative Niederschlagsbestimmung — u.a. für RADOLAN — von entscheidender Bedeutung ist, erfolgt alternierend zwischen den *volume scans* im Abstand von fünf Minuten. Der Elevationswinkel beträgt dabei — in Abhängigkeit von der Orographie des jeweiligen Radarstandortes — zwischen 0.5° und 1.8°. Diese *precipitation scans* sind letztlich der Ursprung aller im Folgenden besprochenen Radarniederschlagsprodukte.

Weitere, für wasserwirtschaftliche Anwendungen nützliche Radarprodukte sollen in diesem Rahmen nur genannt werden:

lokale „qualitative“ Produkte

- PL: Picture, Local — Lokales Radarbild (bodennahe Reflektivitäten)
- PE: Picture, Echotop — Bild der höchsten Echos
- PZ: Picture, Reflektivitäten in Höhen-(z)-schichten

lokale „qualitativ-quantitative“ Produkte

- PX: Picture, Extended — erweitertes lokales Radarbild
- PF: Picture, feine Auflösung — erweitertes PX-Bild
- PH: Picture, Rain over Hour — 1h–Niederschlagsverteilung
- PY: Picture, Rain over Day — mehrstündige Niederschlagsverteilung (1h – 24h)

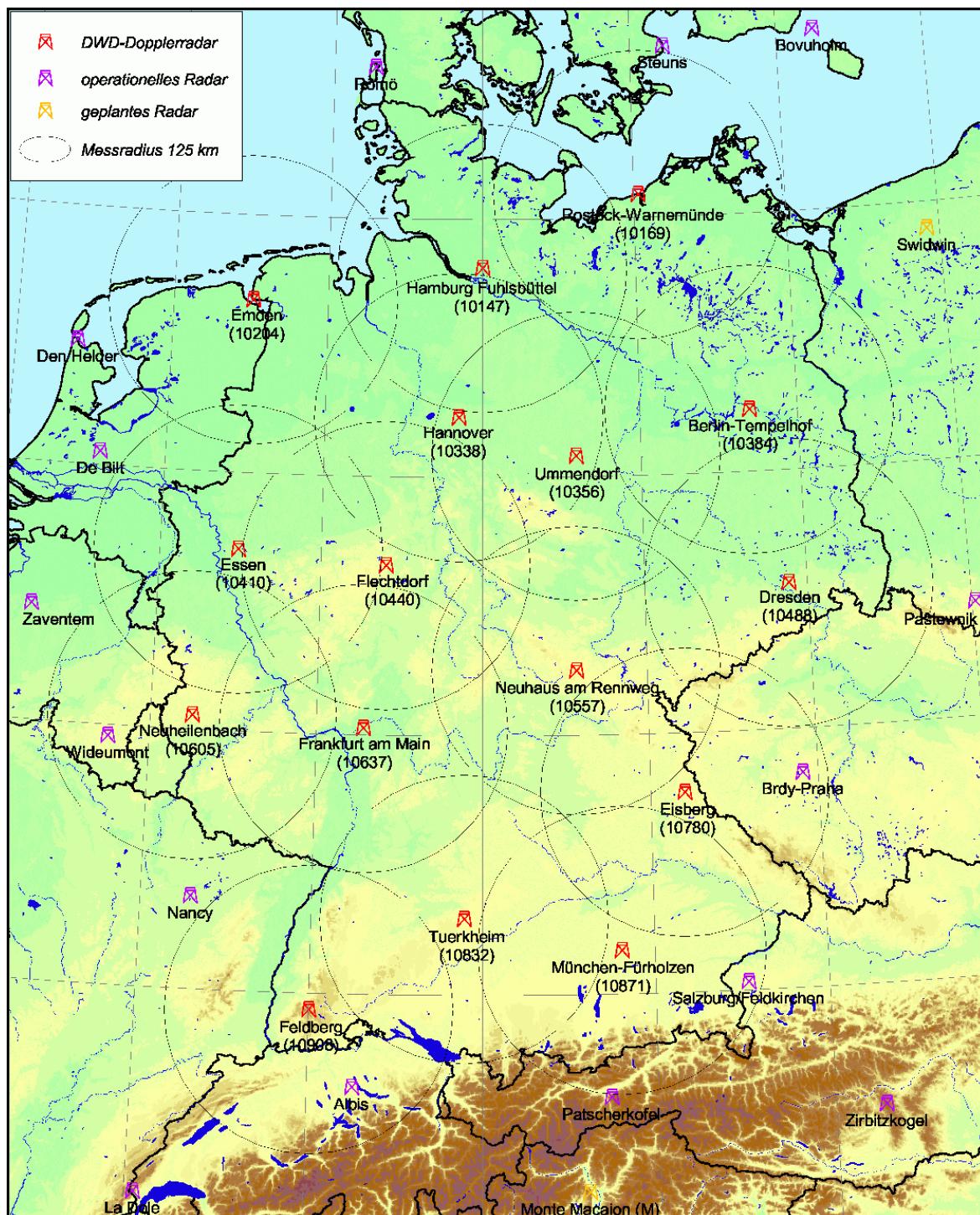


Abb. 2.3: Standorte der Wetterradargeräte des Deutschen Wetterdienstes

Warnprodukt

- DW: meteorologische Warnungen

Kompositprodukte

- PC: Picture Composite — Das PC–Bild stellt die Verteilung der Stärke von Niederschlagsechos auf der Fläche von Deutschland ($920 \text{ km} \times 920 \text{ km}$) mit einer Auflösung von $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ dar. Zur Erstellung des Komposit–Bildes werden die PL–Bilder aller Radarstationen des DWD–Radarverbundes zusammengeführt. Das PC–Bild wird alle 15 Minuten erstellt.
- PI: Picture Composite International — Dieses Bild enthält neben den Informationen des PC–Bildes die Beiträge anderer benachbarter europäischer Wetterdienste. Nähere Informationen zu den o.a. Radarprodukten sind dem Produktkatalog AKORD (DWD, 2002) zu entnehmen.

Das für die Erstellung angeeichter Radarniederschlagsdaten wichtigste Produkt ist das aus dem *precipitation scan* resultierende DX. Dieses Produkt beinhaltet die alle fünf Minuten gemessenen Momentanwerte der aktuellen Niederschlagsechos.

Bei den Daten des *precipitation scan* erfolgt seit Mitte 1998 operationell eine Clutterbehandlung durch statistische Clutterfilterung bzw. Dopplerfilter. Damit entfällt die frühere Anwendung eigener Cluttermaps zur Markierung der Festechos für die Bildprodukte des *precipitation scan*.

Die Verschlüsselung der Niederschlagswerte erfolgt in sogenannten „RVP–6–Units“. Das Auflösungsvermögen dieser Units beträgt 0.5 dBZ. Der für das DX–Produkt verwendete Messbereich erstreckt sich von 0 bis 255 RVP–6–Units. Das entspricht einem Reflektivitätsbereich von –32.5 dBZ bis +95 dBZ. Durch die Verwendung von RVP–6–Units werden nicht nur die bei geringen Reflektivitäten auftretenden negativen dBZ–Werte vermieden, sondern es bleiben in dem DX–Datensatz auch mehr Informationen erhalten als bei der direkten Umwandlung in dBZ– oder mm/h–Werte. Die räumliche Auflösung der Momentanwerte beträgt 1° Azimut und 1 km Entfernung. Das Datenvolumen des DX–Produktes beträgt zwischen ca. 25 KByte im Mittel und ca. 50 Kbyte maximal.

Basierend auf den zwölf fünfminütigen Momentanwerten (DX–Produkte) wird die stündliche Niederschlagshöhe DH für den Zeitraum HH:30 bis HH+1:25 ermittelt. Nach Umrechnung der im Ausgangs–DX–Produkt vorliegenden RVP–6–Units in Niederschlagsintensitätswerte (in mm/h) erfolgt die Summierung dabei intern in Schritten von 0.0125 mm bis zu einem Maximalwert von 409.6 mm. Jeder gespeicherte Niederschlagswert selbst wird als 16–Bit–Wort mit einer Auflösung von 1/10 Millimeter verschlüsselt.

Die räumliche Auflösung beträgt auch bei diesem Datensatz 1° Azimut und 1 km Entfernung; die Speicherung erfolgt wie beim DX–Produkt in $r\text{--}\varphi$ –Koordinaten. Das Datenvolumen des DH–Produktes beträgt zwischen ca. 30 KByte und maximal ca. 60 KByte.

Unter der Produktbezeichnung Niederschlagskontrollwerte DP sind lokal die stündlichen Niederschlagshöhen (in mm) von ausgewählten Orten innerhalb des 100–km–Radius um jeden Radarstandort abrufbar, um „quasi–online“ einen Vergleich der

Radar niederschlagshöhe mit den an synoptisch-klimatologischen Stationen gemessenen Niederschlagswerten zu ermöglichen.

Durch Summation der stündlichen Niederschlagshöhen (DH–Produkte), die im Radarrechner intern als Zwischensummenprodukt DS für das Bildprodukt PY vorgehalten werden, erfolgt die Erstellung der täglichen Niederschlagshöhe (DD). Auf Grund der Verschlüsselung in 16–Bit–Worte sind wiederum Niederschlagshöhen von 409.6 mm als Maximalwert speicherbar. Auch das Datenvolumen des DD–Produktes beträgt zwischen ca. 30 KByte und maximal ca. 60 KByte. Die Ableitung der aus den DX–Produkten generierten Komposit–Produkte ist Gegenstand des Projektes RADOLAN (DWD, 2004a). Im Rahmen des Projektes RADVOROP – vor allem beim RADAR–Nowcasting – sind weitere RADOLAN–Kompositprodukte von Bedeutung (s. Abschnitt 2.2).

2.1.3 Weitere Eingangsdaten

In diesem Abschnitt werden in kurzer Form der Dateninput und die Datenassimilation für die numerische Wettervorhersage (NWV) beschrieben (vgl. auch DWD, 2005b und Wergen, 2002).

In der NWV versteht man unter Datenassimilation die Angleichung eines Modelllaufes an die wirkliche Entwicklung der Atmosphäre, wie sie durch die vorhandenen Beobachtungen beschrieben wird. Sinn des Assimilationsprozesses ist es, ein dreidimensionales Bild der Atmosphäre und deren Unterlage für einen festen Termin zu entwerfen, das z.B. als Anfangszustand für eine Vorhersage genutzt werden kann. Dieses Abbild der Atmosphäre, das auch als Analyse bezeichnet wird, spiegelt nicht nur die Beobachtungen des aktuellen Termins wider, sondern auch zeitlich zurückliegende Messwerte, die bereits früher in das Modell assimiliert wurden. Mathematisch gesehen stellt die NWV ein Anfangswertproblem dar. Für alle prognostischen Variablen eines Modells wird an allen Gitterpunkten ein Anfangswert benötigt.

Zur Bestimmung des Ist-Zustandes der Atmosphäre wird ein weltweites Beobachtungssystem unterhalten, dessen Messungen unter den nationalen Wetterdiensten ausgetauscht werden. Die Beobachtungen stammen von Landstationen, von Schiffen und Bojen, von Flugzeugen und von Satelliten. Teilweise liefern sie Werte nur zu fest vorgeschriebenen Zeitpunkten (sog. „synoptische“ Termine), teilweise laufen aber die Messungen auch kontinuierlich ein. Leider reichen diese Daten bei weitem nicht aus, um den Anfangszustand genügend genau festzulegen. Vor allem über den Ozeanen klaffen große Datenlücken. Die dreidimensionale Vermessung des Windfeldes ist besonders unvollständig. Die numerische Wettervorhersage ist daher ein unterbestimmtes Anfangswertproblem. Das ist auch einer der Gründe, warum die Wettervorhersagen manchmal nicht zutreffen.

Um die Unterbestimmtheit des Anfangszustands zu reduzieren, muss versucht werden, zusätzliche Informationen, sowohl statistischer als auch dynamischer Art, zu nutzen. Als erstes ist hier die Vorgeschiede zu nennen. Es liegen ja nicht nur Beobachtungen vom aktuellen Termin vor, sondern auch von zurückliegenden Zeiten. Ähnlich wie ein Synoptiker bei der Analyse einer Wetterlage die „Vorkarte“ nutzt, kommt es bei der Datenassimilation darauf an, die zeitliche Dimension mit in den Prozess der Definition des Anfangszustandes einzubeziehen. Es muss also eine Möglichkeit geschaffen werden, Information aus der

Vergangenheit zeitlich zu extrapolieren, um sie für die Festlegung des augenblicklichen Zustandes der Atmosphäre nutzen zu können. Für die zeitliche Extrapolation wird in der Datenassimilation das Vorhersagemodell selbst genutzt, meist in Form einer Kurzfristvorhersage vom letzten Analysertermin. Diese Kurzfristvorhersage wird „Erste Näherung“ („First Guess“) oder „Hintergrund“ („Background“) genannt. Sie stellt eine Schätzung des wahrscheinlichen Zustandes der Atmosphäre dar, die aber dort, wo Beobachtungen davon abweichen, noch korrigiert werden muss. Dort, wo keine Beobachtungen vorliegen oder wo Beobachtungen und „First Guess“ übereinstimmen, ist die „Erste Näherung“ identisch mit der endgültigen Analyse. Durch die Nutzung des Vorhersagemodells im Assimulationsprozess haben wir eine weitere wichtige Informationsquelle erschlossen: Das in den Modellgleichungen zusammengefasste Wissen über die Vorgänge in der Atmosphäre. Das Modell versetzt uns in die Lage, aus räumlichen Strukturen auf zeitliche Tendenzen zu schließen und umgekehrt.

Damit ist das Konzept der Datenassimilation im Wesentlichen skizziert. Es beruht auf der Verknüpfung eines Vorhersagemodells mit Beobachtungen, um eine möglichst präzise Analyse der Atmosphäre zu erreichen. Die Grundaufgabe der vierdimensionalen Datenassimilation lautet somit: Aus unvollständigen und fehlerhaften Beobachtungen zusammen mit einer näherungsweisen Beschreibung der Atmosphäre mit Hilfe der prognostischen Modellgleichungen soll der wahrscheinliche augenblickliche Zustand der Atmosphäre analysiert sowie der Fehler dieser Analyse bestimmt werden.

Die Datenassimilation ist eine Aufgabe aus dem Bereich der inversen Probleme. Für nichtlineare Systeme - wie die Atmosphäre - ist sie noch ungelöst. Lediglich für lineare Systeme existiert eine Lösung in Form der Kalman-Bucy Filterung. Die operationell angewandten Verfahren der vierdimensionalen Datenassimilation beruhen auf zahlreichen Vereinfachungen, wie etwa Linearisierung einiger wichtiger Operationen und ad-hoc Spezifikation der erforderlichen Kovarianzmatrizen.

Der DWD benutzt für das GME das Verfahren der intermittierenden Assimilation. Es beruht auf einem Vorhersageschritt über drei Stunden, der als „Erste Näherung“ für die nachfolgende Analyse des „Ist-Zustandes“ der Atmosphäre dient. Dort, wo die vorhandenen Beobachtungen auf Fehler in der Näherung hinweisen, wird letztere korrigiert. Das für die Korrektur benutzte Verfahren wird als „Optimale Interpolation“ bezeichnet, ist aber im strengen Sinne nicht optimal, da die erforderlichen statistischen Informationen nur stark vereinfacht eingehen. Der so erzeugte „Ist-Zustand“ dient als Anfangswert für eine weitere dreistündige Vorhersage, die wiederum als Erste Näherung für die nächste Analyse dient, usw.

Die vierdimensionale Datenassimilation ist augenblicklich ein Gebiet intensiver Forschung und Entwicklung, da man sich von einer genaueren Erfassung des Anfangszustandes eine weitere Verbesserung der numerischen Wettervorhersage verspricht. Letztlich kann jedoch kein noch so anspruchsvolles Assimilationsverfahren Beobachtungen ersetzen. Es kann aber versuchen, die vorhandenen Beobachtungen optimal zu nutzen. Die Kombination besserer Assimilationsverfahren mit zusätzlichen Beobachtungen aus bisher datenleeren Gebieten wird eine spürbare Verbesserung der Vorhersagen erlauben.

Das Assimilationsverfahren der Modelle LM, LME und LMK beruht auf dem „Nudging“-Verfahren. Bei diesem 4-dimensionalen Verfahren werden die prognostischen Variablen des Modells innerhalb eines Zeitfensters an die gegebenen Beobachtungen herangezogen. Ein

Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit, auch so genannte asynoptische Beobachtungsdaten in die Analyse mit einfließen zu lassen. Diese sind z.B. aus Radarreflektivitäten abgeleitete Niederschlagsraten mit hoher zeitlicher Auflösung. Das „Nudging“, zu übersetzen mit „stupsen“ oder „leicht anstoßen“, geschieht, indem in die prognostischen Gleichungen ein Relaxationsterm eingeführt wird, sodass die zeitliche Entwicklung einer beliebigen prognostischen Variablen $\psi(x, t)$ gegeben ist durch:

$$\frac{\partial}{\partial t} \psi(\bar{r}, t) = F(\psi(\bar{r}, t)) + G_\psi \cdot \sum_{k_{obs}} W_k(\bar{r}, t) \cdot [\psi_k^{obs} - \psi(\bar{r}_k, t)] \quad (2.1)$$

In dieser Gleichung repräsentiert F die gesamte Modelldynamik und die physikalischen Parametrisierungen. Der zweite Summand in der Gleichung ist der Relaxationsterm bzw. der Antrieb durch die Beobachtungssinkremente. ψ_k^{obs} ist die k -te den Gitterpunkt \bar{r} zur Zeit t beeinflussende Beobachtung, W_k das dazugehörige Gewicht und G_ψ der so genannte Nudging-Koeffizient. Durch die Wahl dieser Konstanten wird dafür gesorgt, dass der Nudging-Term i.d.R. kleiner ist als die größten Einzelbeiträge der Dynamik und Physik. Somit wird die grundsätzliche Idee des Nudging, die Modellfelder an die Beobachtungswerte heranzuziehen, ohne das modellinterne dynamische Gleichgewicht wesentlich zu stören, realisiert (Schraff und Hess, 2002). Das Nudging-Verfahren beruht also auf dem Mitführen zusätzlicher Korrekturterme in den Modellgleichungen während der Assimilation. Diese stellen sicher, dass sich das Modell so fortentwickelt, wie es die Beobachtungen belegen. Anstatt alle drei Stunden, wie im GME, wird also im LM zu jedem Zeitschritt eine Korrektur der Vorhersage durch die Beobachtungen vorgenommen. Das Prinzip des Nudging-Verfahrens ist in Abb. 2.4 für eine beliebige Variable als Funktion der Zeit graphisch dargestellt.

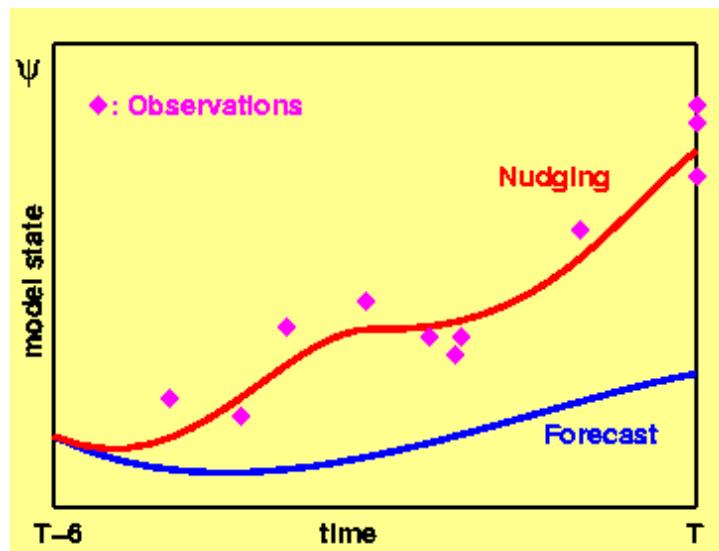


Abbildung 2.4: Das Prinzip des Nudging für eine beliebige Variable als Funktion der Zeit.

Die blaue Linie gibt die zeitliche Entwicklung einer freien Vorhersage, ausgehend vom Zeitpunkt „T-6“ (linker Rand der Graphik), an. Die rosafarbenen Rauten symbolisieren Beobachtungen. Während einer Nudging-Assimilation (rote Linie) wird der Modellzustand in

Richtung der beobachteten Werte gezogen. Dies geschieht, wie oben beschrieben, behutsam, so dass der Modellzustand die beobachteten Werte nicht unbedingt exakt trifft, was auch nicht erstrebenswert wäre, da die Beobachtungen selbst auch nicht exakt die Wahrheit wiedergeben. Das Nudging-Verfahren ist rechenökonomisch und erlaubt eine kontinuierliche Analyse des Zustandes der Atmosphäre, so dass auch Vorhersagen in rascher Folge gerechnet werden können. Ein Nachteil dieses Assimilationsverfahrens ist, dass jede Beobachtungsinformation in eine (oder mehrere) prognostische Modellvariable(n) transformiert werden muss.

2.2 RADOLAN-Analysen

Das im Rahmen des ebenfalls von der LAWA finanziell geförderten und fachlich begleiteten Projektes RADOLAN (Radar-Online-Aneichung; s.a. DWD, 2005a) entwickelte Verfahren zur quantitativen Radarniederschlagsanalyse stellt eine wichtige Grundlage für RADVOR-OP dar.

Durch die Kombination der punktuell an den automatischen Niederschlagsstationen gemessenen stündlichen Werten mit der flächendeckenden Niederschlagserfassung der 16 Wetterradars werden angeeichte stündliche Niederschlagshöhen berechnet. Da der experimentelle Testbetrieb dieses Verfahrens erst seit dem Frühjahr 2004 läuft, wurden für zurückliegende hochwasserrelevante Niederschlagsereignisse RADOLAN-Analysen durchgeführt (s. Abschnitt 4.3.1).

Besonders für die stark konvektiven Niederschlagsereignisse, die lokal zu den gefürchteten Sturzfluten führen können, werden zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagsanalysen benötigt. Für die aus der Verlagerung von Radarniederschlagsdaten berechneten Vorhersagen beim RADAR-Nowcasting gehen neben den stündlichen angeeichten quantitativen Radarniederschlagsdaten (RW-Produkt) mehrere Zwischenprodukte aus dem RADOLAN-Verfahren ein:

- RZ: fünf-minütliche Radardaten nach Abschattungskorrektur und nach Anwendung der verfeinerten Z–R–Beziehungen in Niederschlagshöhen umgerechnet
- RH: stündliche Radardaten nach Abschattungskorrektur und nach Anwendung der verfeinerten Z–R–Beziehungen in Niederschlagshöhen umgerechnet
- RC: stündliche Radardaten nach statistischer Clutterkorrektur ohne Clutterpixel
- RB: stündliche Radardaten nach Anwendung eines Faktors (Voraneichung mit dem sog. BORAMA-Verfahren)
- RF: stündliche interpolierte Aneichfaktoren
- RD: stündliche interpolierte Aneichdifferenzen
- RW: Endergebnis der Aneichung nach Durchführung der gewichteten Mittelung

Anhand des Ereignisses vom 11. Juli 2005 (s.a. Abschnitt 4.2.5), bei dem sich im äußersten Südosten von Deutschland ein lokales Hochwasserereignis ereignete, soll der Vorteil von RADOLAN-Analysen verdeutlicht werden (s.a. RADOLAN-Abschlussbericht, DWD, 2004a).

In der Abb. 2.5 ist die stündliche Niederschlagsverteilung des automatischen Ombrometermessnetzes für den 11.07.2005 um 05.50 Uhr UTC für Südbayern dargestellt. Der maximal von einem Ombrometer gemessene Wert beträgt in dieser Stunde 13,1 mm

(Station Unterwössen-Hinterwössen des Bayrischen Landesamtes für Wasserwirtschaft). Dabei hat sich die 24-stündliche Niederschlagshöhe in diesem Gebiet bereits auf 72,5 mm aufsummiert.

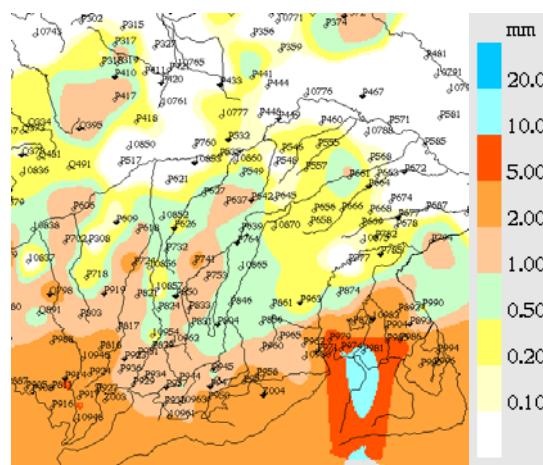


Abb. 2.5: Stündliche Niederschlagsverteilung am 11.07.2005 um 05.50 UTC aus Ombrometermessungen

Die noch nicht angeeichten Radarniederschlagsdaten (Fünf-minütliche Verteilung in Abb. 2.6; stündliche Verteilung in Abb. 2.7a bis c) zeigen gerade in diesem Gebiet deutlich unterschätzte Niederschläge in einer Größenordnung von ca. 2 mm/h. Dies liegt v.a. an der entfernungsabhängigen Dämpfung: Das nächste Radar (München) ist bereits ca. 100km vom betrachteten Gebiet entfernt.

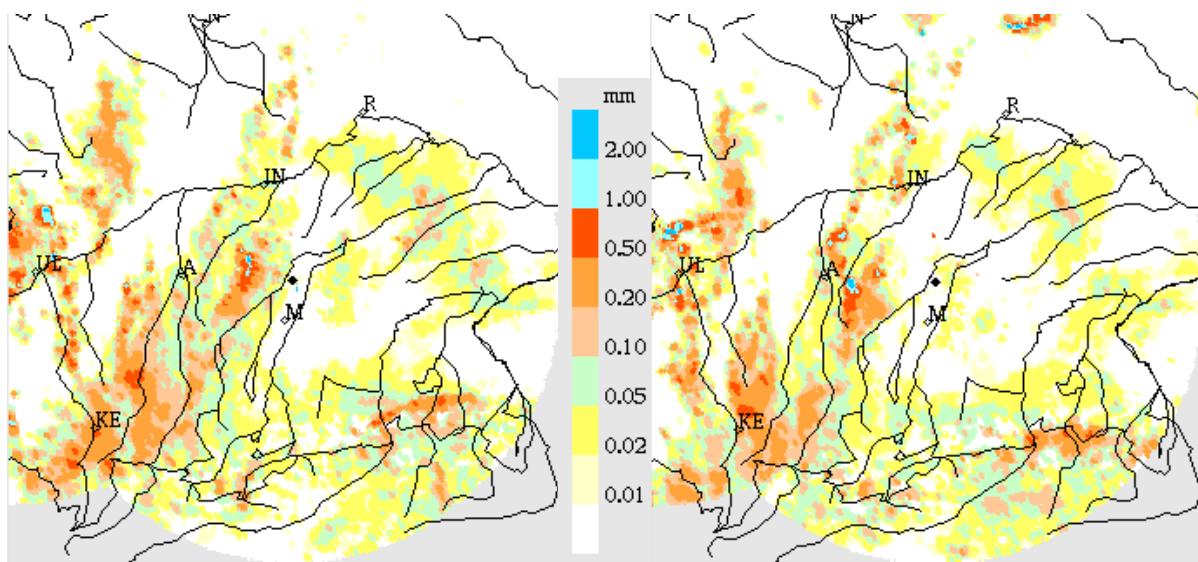


Abb. 2.6: Fünf-minütliche Niederschlagsverteilung am 11.07.2005 um 05.20 Uhr UTC (links) bzw. 05.45 Uhr UTC (rechts) aus quantitativen Radarniederschlagsmessungen (RZ-Daten). Während der mehr stratiform geprägte Niederschlag am Alpenrand unterschätzt wird, werden einzelne konvektive Niederschlagszellen nördlich von Ulm und zwischen Augsburg und München quantitativ überschätzt.

Die fünf-minütlichen RZ-Radardaten (Abb. 2.6) stellen die Basis für die Datenassimilation beim LMK sowie für die beiden Verlagerungsmodelle dar, während mit Hilfe der stündlichen Radarniederschlagsdaten bzw. Aneichgrößen (Abb. 2.7) die Quantifizierung der verlagerten Radarniederschlagsfelder durchgeführt wird.

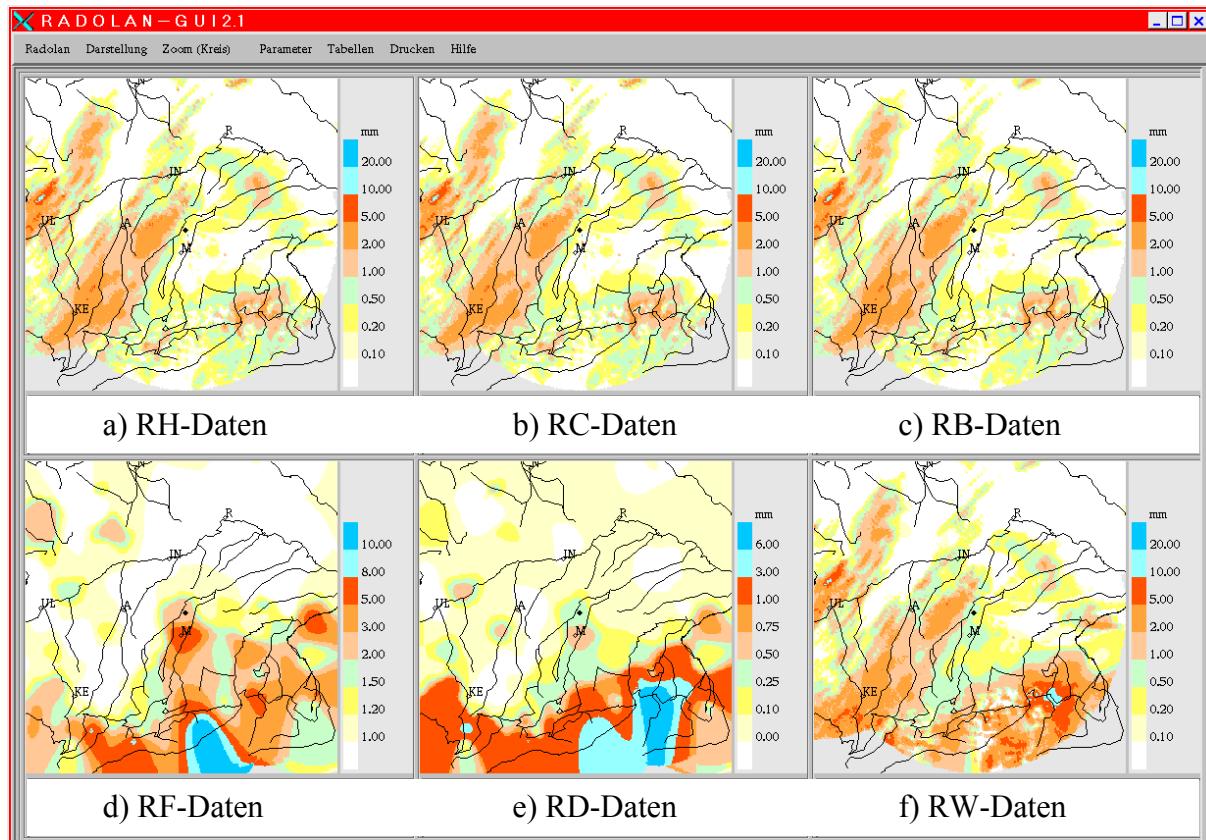


Abb. 2.7: Stündliche Niederschlagsverteilung am 11.07.2005 um 05.50 Uhr UTC (nicht-an geeicht: a bis c; angeeicht: f) bzw. stündliche Aneichgrößen (Faktoren: d; Differenzen: e) aus RADOLAN.

Die für dieses Ereignis lokal ermittelten hohen Aneichfaktoren bzw. Aneichdifferenzen (Abb. 2.7d bis e; jeweils bis über 10) sind für die Quantifizierung sowohl der aktuellen (RADOLAN) als auch der vorhergesagten Radarniederschlagsfelder (RADVOR-OP) unabdingbar, um realistische Niederschlagsverteilungen zu erzeugen. Da im derzeitigen Entwicklungsstadium von RADOLAN die „best-an geeichte“ Analyse - insbesondere wegen der nicht vollständig durchgeführten Qualitätsprüfung der in Echtzeit zur Verfügung stehenden Eingangsdaten (Radar und Ombrometer) – nicht immer den hohen Anforderungen gerecht wird, werden auch andere stündliche RADOLAN-Analysen für die Quantifizierung herangezogen.

2.3 Numerische Wettervorhersage (GME / LM bzw. LME / LMK)

Die numerische Wettervorhersage (NWV) stellt eine wesentliche Komponente im gesamten Wettervorhersageprozess dar. Dieser Prozess umfasst die weltweite Messung und Verteilung meteorologischer Parameter, die Bestimmung des Anfangszustandes im Rahmen der Datenassimilation, die Modellrechnung und die Erstellung von Vorhersageprodukten für spezielle Kundengruppen. Die Ergebnisse der NWV-Modelle bilden dabei zunehmend die meteorologische Datenbasis für kundennahe Anschlussverfahren, beispielsweise zur Berechnung des Seegangs für Nord- und Ostsee oder des Wasserstandes an den deutschen Küsten. Für den operationellen Betrieb des Hochwasservorhersagedienstes der Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder stellen die NWV-Modelle eine Vorhersage des zukünftigen Niederschlagsverlaufs in seiner räumlichen und zeitlichen Verteilung bereit.

Das operationelle NWV-System des Deutschen Wetterdienstes (DWD) besteht z. Z. aus zwei Modellen, nämlich dem Globalmodell GME mit einer Maschenweite von 40 km und 40 Schichten vom Boden bis in 30 km Höhe und dem Lokalmodell LM, das mit einer Maschenweite von 7 km und 35 Schichten vom Boden bis in 26 km Höhe Mitteleuropa überdeckt. Im Herbst 2005 soll das Modellgebiet des LM auf ganz Europa (Modellbezeichnung: LME) ausgedehnt werden. Eine dritte Modellkomponente, das LM-Kürzestfrist (LMK) wird mit einer Maschenweite von 2.8 km und bis zu 50 Schichten ab Ende 2006 hochauflösende Wettervorhersagen für Deutschland bereitstellen und vor allem zu einer deutlichen Verbesserung der Vorhersage konvektiver Systeme (Gewitterkomplexe und Böenlinien) beitragen.

2.3.1 Globalmodell GME

Der DWD ist eines der 14 Zentren weltweit (Tabelle 2.4), die über eine eigenständige globale Vorhersagekapazität verfügen. Im Unterschied zum Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage (EZMW in Reading, UK) konzentriert sich der DWD auf kurzfristige (bis drei Tage) Wettervorhersagen. Der Anfangszustand für die Modellrechnungen wird mit dem kurzen Datenredaktionsschluss von 2h 14min bestimmt, so dass die dreitägige GME-Vorhersage, basierend auf der Analyse 00 UTC, schon um 03:30 UTC den Nutzern zur Verfügung steht.

Das horizontale Gitter des GME beruht auf der Triangulierung eines in die Erdkugel eingeschriebenen Ikosaeders. Die mittlere Maschenweite beträgt z. Z. 40 km, und ein Gitterelement (Sechsecke bzw. Fünfecke an den zwölf Eckpunkten des Ikosaeders) hat die mittlere Fläche von 1384 km^2 . Dieses Gitter bietet eine nahezu gleichförmige Diskretisierung der Kugeloberfläche, auch wenn die sechseckigen Gitterzellen in ihrer Form und Größe variieren.

Neben der Bereitstellung globaler Vorhersageprodukte für verschiedene Kundengruppen (allgemeine Wettervorhersage, Luftfahrt, Seeschifffahrt und Bundeswehr) dient das GME vor allem der Berechnung der seitlichen Randwerte für das Regionalmodell LM.

Institution	Land	Maschenweite	Schichten
ECMWF	England	40	60
DWD	Deutschland	40	40
UKMO	England	60	38
Météo France	Frankreich	25-130	41
Env. Canada	Kanada	100	28
NOAA/NCEP	USA		42
Navy/NRL	USA	80	30
CPTEC	Brasilien	90	42
BoM	Australien	75	29
NCMRWF	Indien	115	28
JMA	Japan	90	40
KMA	Südkorea	90	30
Roshydromet	Russland	230	31
CMA	China	90	31

Tabelle 2.4: Globale NWV-Modelle weltweit (Stand Januar 2005)

2.3.2 Lokalmodell LM bzw. LME

Da die horizontale Auflösung des GME (Maschenweite 40 km) nicht genügt, um die detaillierte Struktur der Topographie und ihre Wirkung auf das Wetter in Deutschland und Europa zu erfassen, stellt das Lokalmodell (LM) mit einer Maschenweite von 7 km höhераuflösende Vorhersagenergebnisse bereit. Das LM erfasst vor allem mesoskalige Wettersysteme wie Fronten und kleinräumige Tiefdruckgebiete. Darüber hinaus beschreibt es den Einfluss der lokalen Topographie auf die Strömung, beispielsweise Land- und Seewinde an Nord- und Ostsee, Föhn oder die Kanalisierung im Oberrheingraben.

Der hydrologische Zyklus wird im LM sehr detailliert simuliert, wobei im Unterschied zum GME neben Wasserdampf, Wolkenwasser und Wolkeneis auch Regen und Schnee als volle prognostische Variable einschließlich horizontaler und vertikaler Advektion behandelt werden. Dieser „prognostische Niederschlag“ ermöglicht es, die horizontale Verdriftung von Regen und (vor allem) Schnee, die je nach Windverhältnissen 20 bis 50 km betragen kann und einen großen Einfluss auf die Niederschlagsverteilung (z. B. Luv- und Lee-Effekte im Gebirge) hat, angemessen zu simulieren. Die in Abb. 2.8 gezeigten Wechselwirkungen und Umwandlungsprozesse zwischen den verschiedenen Niederschlagsphasen berücksichtigen die wolkenmikrophysikalischen Prozesse in parametrisierter Form.

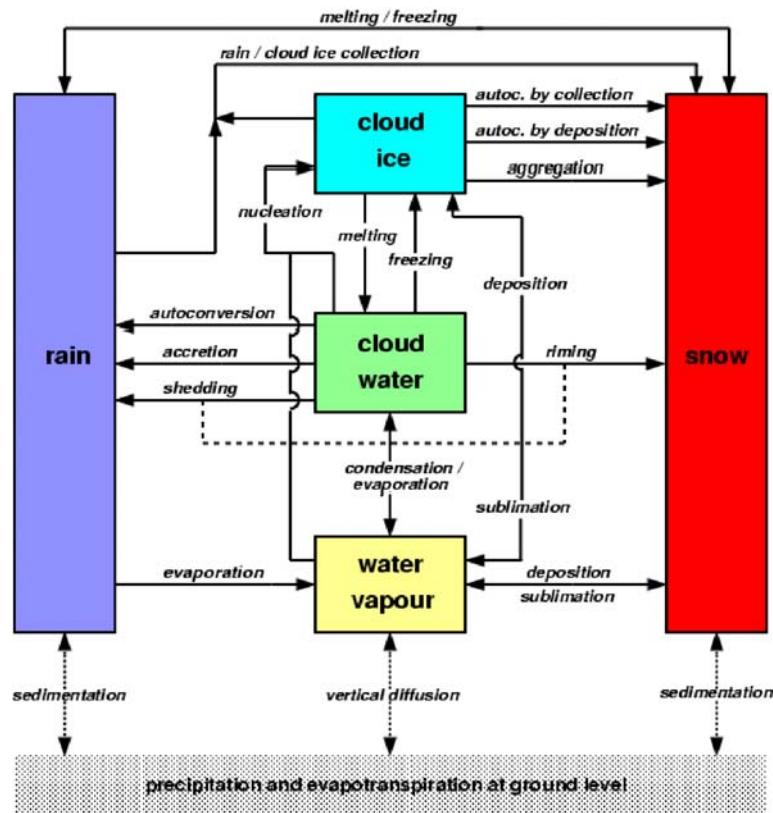


Abb. 2.8: Wolken- und Niederschlagsparametrisierung im Lokalmodell LM

Da viele Nutzer, u. a. Seeschifffahrt und Bundeswehr, die Ausdehnung des Vorhersagebereichs des LM auf ganz Europa forderten, wird Ende September 2005 das LM durch das Modell LME (Abb. 2.9 zeigt das Modellgebiet des LME) ersetzt. LME wird mit

Tentative Model Domain of LME. Marks indicate atomic power plants.

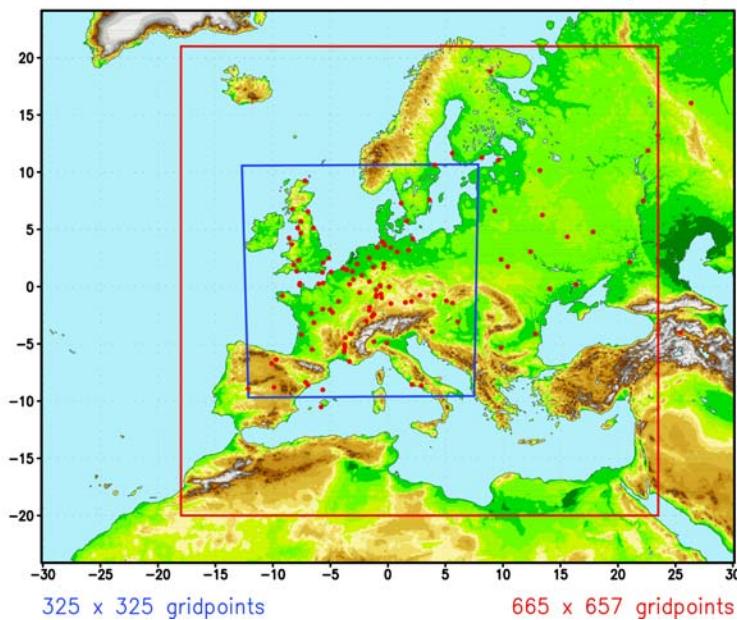


Abb. 2.9: Modellgebiete des LME (rot), operationell ab Herbst 2005, und des LM (blau)

665 x 657 Gitterpunkten und 7 km Maschenweite ein Vorhersagegebiet von 4650 km x 4590 km überdecken. Die Schichtenanzahl des LME beträgt 40, davon sind 13 in den untersten 1500 m über Grund. Die Vorhersagezeit des LME beträgt 78 h, ausgehend von den Analysen für 00, 12 und 18 UTC.

2.3.3 LM-Kürzestfrist (LMK)

Gefährliche Wettererscheinungen auf der Meso- γ -Skala wie Starkniederschlag oder orkanartige Windböen sind oft mit konvektiven Wettersystemen verknüpft, die von den Modellen GME und LM(E) nicht explizit simuliert, sondern nur in parametrisierter Form berücksichtigt werden können. Konvektionsparametrisierungen sind aber nicht in der Lage, den Lebenszyklus von konvektiven Zellen und eine eventuelle Organisation der Zellen zu Gewitterclustern oder Böenlinien zu beschreiben. Die explizite Simulation hochreichender Konvektion erfordert neben einer ausreichend feinen Modellauflösung mit Maschenweiten zwischen einem und drei Kilometern intensive Forschungsarbeiten in den Bereichen Modellentwicklung, Datenassimilation und Modellinterpretation. Der DWD entwickelt seit Mitte 2003 im Rahmen des Projektes 2 des Aktionsprogramms 2003 das Modell LM-Kürzestfrist (LMK), das ab Ende 2006 mit einer Maschenweite von 2.8 km und bis zu 50 Schichten operationelle meso- γ -skalige Wettervorhersagen bereitstellen wird. Abb. 2.10 zeigt das geplante Modellgebiet des LMK. Das Modell verfügt über eine Wolken- und Niederschlagsparametrisierung, das im Vergleich zu der des LM um eine prognostische Graupelphase erweitert wurde.

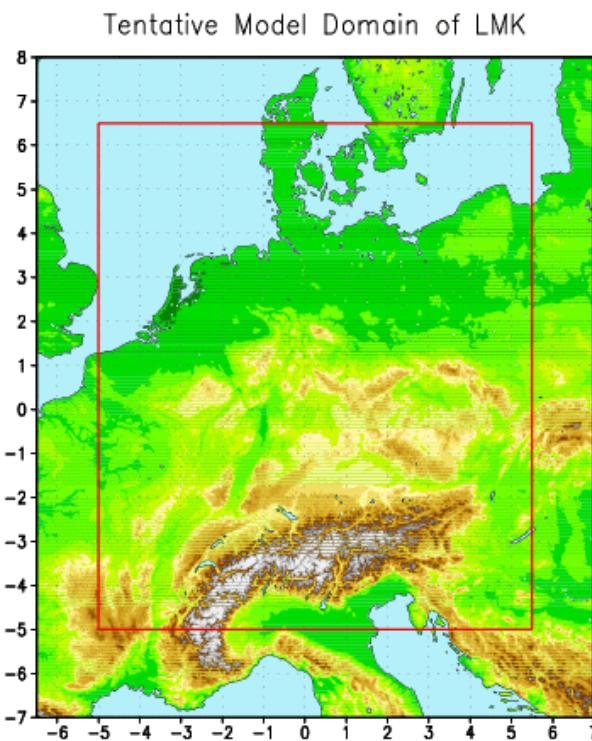


Abb. 2.10: Modellgebiet (rotes Rechteck) des LMK, operationell ab Ende 2006

Der dynamische Kern des LMK erlaubt mit numerischen Verfahren höherer Ordnung eine genauere Simulation der kleinräumigen wetterrelevanten Prozesse. Einen besonderen Schwerpunkt der LMK-Entwicklung im Bereich der Datenassimilation bildet die Nutzung der Radarreflektivitäten (siehe Abschnitt 4.1.2), um die vorhergesagten Niederschlagsraten zu Beginn der Vorhersagerechnung besser mit den Beobachtungen in Übereinstimmung zu bringen.

Im operationellen Einsatz wird LMK im „Rapid Update Cycle“- Modus betrieben, wobei alle drei Stunden eine neue 18-stündige Vorhersage gerechnet und die Ergebnisse an die Nutzer verteilt werden.

3 Nowcasting und Kürzestfristvorhersagen

3.1 Überblick

In der Meteorologie werden verschiedene Vorhersagezeiträume mit unterschiedlichen Bezeichnungen belegt. Die im Projekt RADVOR-OP relevanten Zeiträume sind das sog. „Nowcasting“ sowie die Kürzestfristvorhersage. Während das Nowcasting den Zeitraum von 0 bis 2 Stunden bezeichnet, gilt die Kürzestfristvorhersage für die nächsten 0 bis 12 Stunden. Hinsichtlich der zeitnahen Verfügbarkeit von Vorhersageergebnissen ergänzen sich beide Skalenbereiche. Sie werden optimal abgedeckt, wenn in den Nowcasting-Bereich nur Mess- und Beobachtungsdaten eingehen und im Kürzestfrist-Bereich Modellrechnungen durchgeführt werden. Im Bereich der allein auf Radardaten gestützten Verfahren ist insbesondere wegen der Lebensdauer konvektiver Niederschlagszellen (Schauer) nur der Vorhersagezeitraum des Nowcastings von Bedeutung.

Weltweit existieren eine ganze Reihe unterschiedlicher Nowcasting-Verfahren. Einen Überblick über operationell eingesetzte Verfahren vermittelt die Tabelle im Anhang 8.2. Bei den RADAR-Nowcastingverfahren muss nach dem jeweiligen Einsatzzweck unterschieden werden, wie z. B. allgemeine Unwettervorhersagen, Gewitter- und Tornadowarnungen oder generell Niederschlagsvorhersagen (z.B. Nimrod, SPROG). Einige Verfahren beziehen außer Radar weitere Datenquellen mit ein (Numerische Wettervorhersage, Satelliten, ...). Die Auflösung differiert i.d.R. zwischen 5 und 30 min zeitlich bzw. 1 bis 5 km räumlich.

Eine Vorreiterrolle bei den radargestützten Nowcasting-Verfahren zur Niederschlagsvorhersage – und daher von besonderem Interesse – stellt das Nimrod/Gandolf genannte Verfahren des britischen Wetterdienstes (UK Met Office) dar. Hierbei handelt es sich um eine Niederschlagsvorhersage, die neben Radar- auch NWV-Daten mit einbezieht. Das früher eigenständige Nowcasting-Verfahren Gandolf, das eine verallgemeinerte fünfstufige Zellstadien-Entwicklung beinhaltet, wurde im Laufe der Zeit vollständig in Nimrod integriert. Einzelheiten zu diesem Verfahren sind u.a. bei Pierce et al. (2000) sowie Golding (1998, 2000) zu finden.

Eine mögliche Integration des bereits weit entwickelten englischen Verfahrens Nimrod wurde auf Wunsch der Ländervertreter in RADVOR-OP zunächst innerhalb des DWD geprüft, musste aber wegen des enormen technischen Aufwands zur Anpassung der Daten und Datenverarbeitungsketten wieder fallen gelassen werden. Der einzige Lösungsweg wurde in einem Parallelbetrieb des DWD- und des Nimrod-Systems gesehen, was aber nach Einschätzung des DWD die Rechnermöglichkeiten und den Kostenrahmen des Projektes RADVOR-OP gesprengt hätte.

Die Kürzestfristvorhersagen werden hauptsächlich mit NWV-Modellen berechnet. Hierzu wurden in RADVOR-OP, Teilprojekt 1 die grundlegenden Voraussetzungen geschaffen und im Rahmen des sog. „Aktionsprogrammes 2003 (AP2003)“ beim DWD als LMK weiterentwickelt (s. Abschnitt 4.1.1). Der Nachteil dieser NWV-Modelle und auf deren Daten basierender Verfahren, wie z.B. das MOS (Model Output Statistics), liegt wegen der relativ langen Rechenzeit in der nicht-zeitkritischen Verfügbarkeit. Auch beim LMK ist trotz einer verkürzten Vorhersagezeit und Reduzierung des Flächenausschnitts mit einer Bereitstellung der Ergebnisse nicht vor einer Stunde nach der Ausgangszeit zu rechnen. Als Vorteil der

NWV-Modelle erweist sich die dynamische Berechnung der Niederschlagsentwicklung, die längere Vorhersagezeiten ermöglichen als reine Trackingverfahren.

3.2 Projekt RADVOR-OP: Planung und Realisierung

Den Hochwasservorhersagezentralen bei den Wasserwirtschaftsverwaltungen der Bundesländer standen bisher nur dreimal täglich aktuelle Niederschlagsvorhersagen mit einem Vorhersagezeitraum bis zu 48 h aus den NWV-Modellen des DWD zur Verfügung. Da diese numerischen Vorhersagen rund 5 bis 15 h zurückliegende Mess- und Beobachtungsdaten (Datenassimilation) enthalten und die Vorhersage von Starkniederschlägen zum Teil mit erheblichen Unsicherheiten verbunden sind, wurde mit Hilfe des Projekts RADVOR-OP im Jahr 2002 mit der Entwicklung einer radargestützten, zeitnahen Niederschlagsvorhersage (Niederschlag-Nowcasting-System) beim DWD begonnen. Ziel ist der operationelle Routinebetrieb eines Niederschlag-Nowcasting-Systems.

Die Realisierung sollte innerhalb von drei Jahren (Mai 2002 bis Juni 2005) in drei Teilprojekten (TP) erfolgen:

- TP 1: LM-Kürzestfrist
- TP 2: RADAR-Nowcasting
- TP 3: RADAR-Verifikation

Eine Verlängerung des Projektendes um vier Monate auf Oktober 2005 wurde aufgrund des verspäteten Arbeitsbeginns im TP1 notwendig.

Das in den operationellen Routinebetrieb beim DWD zu überführende Niederschlagsvorhersagesystem sollte folgende Komponenten beinhalten:

- LM-Kürzestfristvorhersagen: möglichst alle vier Stunden neu berechnet, mit einem Vorhersagezeitraum von ca. zwölf Stunden, einer räumlichen Auflösung von ca. 3 km, einer zeitlichen Auflösung von 30 Minuten und der Einbeziehung von Radarniederschlagsdaten in die Datenassimilation
- RADAR-Nowcasting: stündliche Aktualisierung, mit einem Vorhersagezeitraum von bis zu vier Stunden, mit einer räumlichen Auflösung von ca. zwei km, mit einer zeitlichen Auflösung von 15 bis 30 Minuten und der Einbeziehung anderer Daten (z.B. Blitz und Satellit)

Während mit Hilfe der LM-Kürzestfristvorhersagen insbesondere die häufigere Bereitstellung von NWV-Modellergebnissen für den Vorhersagezeitraum von 2 bis 12 h im Vordergrund stehen, soll das RADAR-Nowcasting die Niederschläge für die nächsten 2 bis 4 h fortlaufend vorhersagen.

Die Arbeiten zu den LM-Kürzestfristvorhersagen gehören zum ersten TP „LM-Kürzestfrist“ und haben folgende Schwerpunkte:

- Aufbereitung der Radardaten zur Nutzung im LM

- Ausbau des Assimilationsverfahrens („Latent Heat Nudging“) für das LM zur Nutzung der Radardaten
- Fallstudien und Optimierung der Verfahren
- Parallel Datenassimilation

Das zweite TP „RADAR-Nowcasting“ umfasst folgende Arbeitspakete:

- Charakterisierung von Niederschlagsfeldern in stratiforme und konvektive Felder auf der Basis von Radardaten
- Integration zusätzlicher Datenquellen (Blitz- und Satellitendaten) für die Charakterisierung, Verlagerung und Entwicklungsabschätzung der stratiformen und konvektiven Niederschlagsfelder
- Quantifizierung der verlagerten stratiformen und konvektiven Niederschlagsfelder
- Unterscheidung der Niederschlagsart (Regen, Schnee) der verlagerten Niederschlagsfelder

Darüber hinaus war bis zum Projektende (Oktober 2005) auch die Überführung der einzelnen Arbeitspakete in den operationellen Betrieb geplant.

Im dritten TP „RADAR-Verifikation“ war die Prüfung der verbesserten Vorhersagequalität aus dem LM-Kürzestfrist und aus dem RADAR-Nowcasting auf der Basis von angeeichten Radarniederschlagsdaten mittels verschiedener, mit der LAWA abgestimmter Verifikationsverfahren vorgesehen. Die Schwerpunkte dieses Teilprojektes sind:

- Definition von hochwasserrelevanten Niederschlagsereignissen
- Verfügbarkeit der Input-Daten der hochwasserrelevanten Niederschlagsereignisse
- Offline-Aneichung quantitativer Radarniederschlagsdaten für die hochwasserrelevanten Niederschlagsereignisse
- Anpassung der angeeichten quantitativen Radarniederschlagsdaten für Input und Output des LMK und des RADAR-Nowcastings (jeweils zeitlich und räumlich)
- Definition der raster- und gebietsorientierten Verifikationsanalysen für den Output aus LMK und RADAR-Nowcasting
- Verifikation der Niederschlagsvorhersagen aus dem LMK und dem RADAR-Nowcasting mit angeeichten Radarniederschlagsdaten

Während der Projektarbeiten kristallisierten sich zahlreiche Detailprobleme heraus, die die Ziele des Projekts RADVOR-OP als sehr ehrgeizig erscheinen ließen. Es haben sich daher folgende wichtige Änderungen ergeben, die teilweise auch im Zusammenhang mit dem seit 2003 beim DWD als Projekt begonnenen Aktionsprogramm 2003 (AP 2003) zu sehen sind:

1. Für die LM-Kürzestfristvorhersagen mit dem LMK (s. Abschnitt 2.3.3) ist ein experimenteller Testbetrieb des LMK noch im Jahr 2005 vorgesehen und wird voraussichtlich Ende 2006 in den operationellen Routinebetrieb überführt sein.
2. Das LMK wird alle drei Stunden gerechnet und der Vorhersagezeitraum beträgt 18 h.
3. Im RADAR-Nowcasting werden zwei Module - nämlich ein stratiformes und ein konvektives Modul – entwickelt. Die Charakterisierung der Niederschlagsfelder wird nicht wie ursprünglich geplant für die Modulansteuerung der beiden Verlagerungen

genutzt, sondern es wird eine Verschneidung der beiden Verlagerungen zu einem Ergebnis vorgenommen.

4. Die Integration zusätzlicher Datenquellen in das RADAR-Nowcasting kann erst in die Weiterentwicklung nach Abschluss dieses Projekts aufgenommen werden.
5. Die Quantifizierung der verlagerten Niederschlagsfelder wird auf das verschnittene Verlagerungsergebnis angewendet.
6. Die Arbeiten zur Unterscheidung der Niederschlagsart werden aus Ressourcengründen erst im Jahr 2006 erledigt.
7. Auch das RADAR-Nowcasting wird seinen experimentellen Testbetrieb noch bis zum Ende des Jahres 2005 aufnehmen voraussichtlich Ende 2006 in den operationellen Routinebetrieb überführt sein.
8. Das RADAR-Nowcasting wird häufiger gerechnet (alle 15 Minuten) und hat eine höhere räumliche Auflösung (1 km^2) als geplant. Dafür wird der Vorhersagezeitraum aus fachlichen Gründen (Lebensdauer konvektiver Niederschlagszellen) verringert (bis max. zwei Stunden) und die zeitliche Auflösung vergröbert (eine Stunde).
9. Die Offline-Aneichung der hochwasserrelevanten Starkniederschlagsereignisse konnte aus Ressourcengründen erst im Dezember 2004 erfolgen. Dabei wurde für die ersten acht Ereignisse bis März 2000 die mangelnde Radardatenqualität aufgedeckt. Als Ersatz werden nunmehr auch aktuellere Termine aus dem experimentellen Testbetrieb von RADOLAN zur RADAR-Verifikation aufgenommen.
10. Die eingeplanten eigentlichen Verifikationen der verschiedenen Vorhersageergebnisse müssen aus Ressourcen- und Kostengründen (Eingang der Abschlussrate des Länderfinanzierungsprogramms Wasser und Boden der LAWA beim DWD) komplett im Jahr 2006 durchgeführt werden.

Durch die halbjährlichen Projektsitzungen mit den Vertretern der LAWA war eine enge fachliche Begleitung und Abstimmung der Entwicklungsarbeiten mit dem Projektlauftraggeber gewährleistet. Zusammen mit dem im Dezember 2003 vorgelegten Zwischenbericht (DWD, 2003) stellt der hier präsentierte Abschlussbericht eine ausführliche Dokumentation der Projektarbeiten dar. Die aus Ressourcengründen nicht bis zum Projektende geleisteten und daher nicht in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten werden im Jahr 2006 durchgeführt und in einem eigenen Bericht der LAWA übergeben.

3.3 Möglichkeiten und Grenzen der quantitativen Niederschlagsvorhersagen

Grundlage der Wettervorhersage ist das Verständnis des Systems der Atmosphäre. Dieses Verständnis wird heute in numerischen Vorhersagemodellen zusammengefasst und zur Vorhersage genutzt. Die Vorhersage des Niederschlags kann damit nicht unabhängig betrachtet werden, sondern ist immer als Teil der Vorhersage des Zustandes der Atmosphäre anzusehen. Eine Verbesserung der Niederschlagsvorhersage, ihre Möglichkeiten und Grenzen hängen deshalb immer eng mit der Vorhersage anderer Variablen oder Prozessen des Systems

Atmosphäre zusammen. Allerdings unterscheidet sich die Niederschlagsbildung in der Atmosphäre bezüglich der Skalen, auf der sie stattfindet, sehr deutlich von vielen anderen wetterwirksamen Prozessen in der Atmosphäre. Die Niederschlagsbildung findet auf sehr kleinen Skalen statt, so dass sie in Vorhersagesystemen auf absehbarer Zeit kaum explizit vorhergesagt werden kann, sondern immer nur mit Hilfe integraler Parametrisierungen. Unabhängig davon finden die zugehörigen antreibenden Prozesse wie Konvektion ebenfalls noch auf vergleichsweise kleinen Skalen statt, deren Vorhersagbarkeit sehr eng begrenzt ist. Deshalb ist die Frage nach den Möglichkeiten und Grenzen der quantitativen Niederschlagsvorhersage eng mit der skalenabhängigen Grenze der Vorhersagbarkeit atmosphärischer Zustände verbunden. Dieses soll im Folgenden in stark verkürzter Form diskutiert werden.

Grenze der Vorhersagbarkeit

E. Lorenz (1963) demonstrierte mit einem einfachen zeitabhängigen Modell mit 3 Freiheitsgraden, dass nichtlineare Systeme wie auch die Atmosphäre irreguläre, d.h. nicht periodische Bewegungen im Phasenraum durchführen können. Diese Arbeit war ein wesentlicher Anstoß für die Entwicklung der Chaostheorie. Auch wenn die Bewegung innerhalb eines beschränkten Raumes stattfindet, erfolgt die Bewegung eines solchen Systems immer so, dass ein erreichter Zustand des System nie wieder erreicht wird. Würde ein Zustand ein zweites Mal erreicht werden, würde sich die Bewegung periodisch wiederholen. Dies tritt jedoch nicht auf. Die Abbildung 3.1 zeigt das häufig gezeigte Bild der Lösung des Lorenzsystems im Phasenraum.

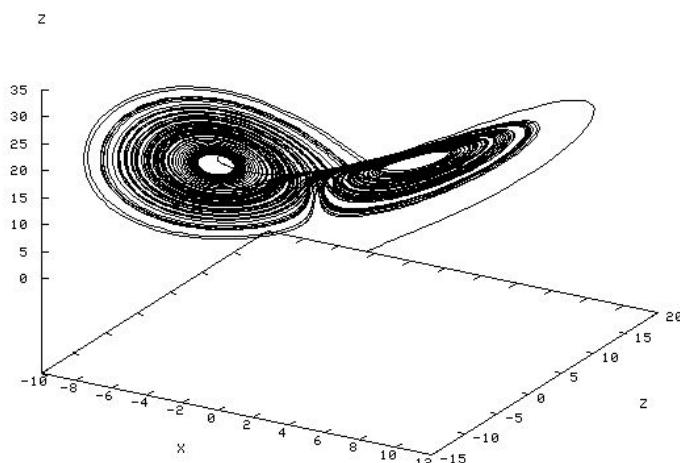


Abbildung 3.1: Darstellung der Lösungsfunktionen $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ im Phasenraum $Z=F(X,Y)$

Das Lorenz-System besteht aus 3 gewöhnlichen Differentialgleichungen mit den zeitabhängigen Lösungen $X(t)$, $Y(t)$ und $Z(t)$, für das man grundsätzlich beliebig genaue Näherungslösungen konstruieren kann. Dabei sind die Lösungen $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ durch Vorgabe der Anfangsbedingungen $X(0)$, $Y(0)$, $Z(0)$ eindeutig festgelegt. Wenn man zusätzlich mehrere Sätze an Anfangswerten und Koeffizienten wählt, die sich nur geringfügig voneinander unterscheiden, erhält man entsprechend viele Sätze an Lösungskurven, die in Abhängigkeit von den gewählten Koeffizienten anfangs dicht beieinander liegen, nach einiger Zeit jedoch auseinander laufen (Abbildung 3.2).

Wenn man nun eine der in Abbildung 3.2 gezeigten Zeitreihen als Referenz betrachtet, die zwei anderen Lösungen als Vorhersagen für das zeitliche Verhalten der Referenz, kann man folgern, dass die Abweichungen der Kurven von der Referenzlösung ein Maß für den Vorhersagefehler sind. Man erkennt also durch diese Darstellung das Anwachsen des Fehlers (Abweichung der Kurven untereinander) im Anfangszustand mit der Zeit. Ein ähnliches Bild erhält man bei der Wahl unterschiedlicher Datensätze für die Koeffizienten des Lorenzmodells bei identischen Anfangswerten oder aber auch bei identischen Anfangsbedingungen und Parametern aber unterschiedlicher Rechengenauigkeit. Im letzten Fall sieht man den Einfluss des auf digitalen Rechnern unvermeidbaren Rundungsfehlers. Auch wenn bei diesem scheinbar einfachen System von drei gewöhnlichen Differentialgleichungen die Existenz einer eindeutigen Lösung sicher gestellt ist, sind wir auf Grund der Nichtlinearität des Systems nicht in der Lage, eine Näherung für die eindeutige Lösung anzugeben. Dies ist der Grund für die Grenze der Vorhersagbarkeit des Lorenz-Systems.

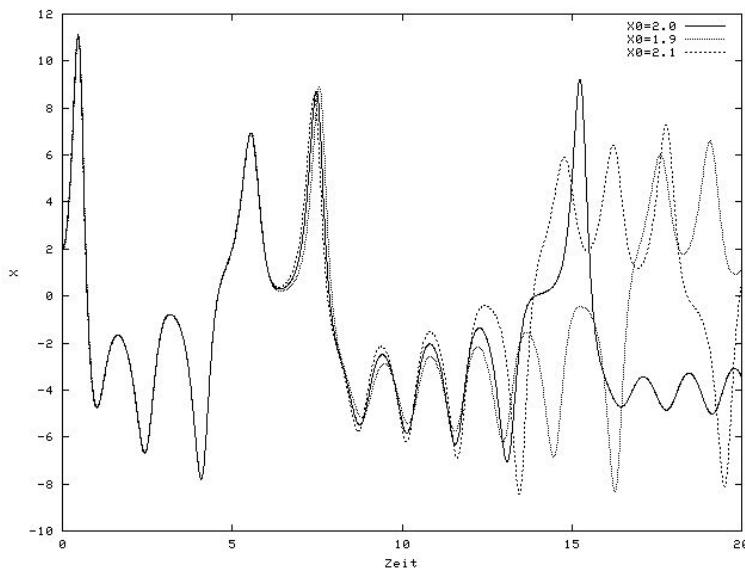


Abbildung 3.2: Darstellung dreier Lösungen der Funktion $X(t)$ des Lorenz-Systems bei unterschiedlichen Anfangsbedingungen als Zeitreihen

Um das Problem auf die Wettervorhersage zu übertragen, könnte man die drei Lösungsfunktionen des Lorenzsystems interpretieren als die Zeitreihen dreier Zustandsvariablen zur Beschreibung der Atmosphäre, z.B. die Werte einer Windgeschwindigkeitskomponente, der Lufttemperatur und des Luftdrucks an einem Ort.

Ziel der Datenassimilation in einem Wettervorhersagesystem ist eine im Mittel über viele Realisierungen optimale Schätzung des Anfangszustandes aus den verfügbaren Beobachtungsdaten und weiterer Information. Die Schätzung des Anfangszustandes weicht sicher vom unbekannten Anfangszustand ab. Dieser unvermeidbare Analysenfehler wirkt sich nun analog zu dem in Abbildung 3.2 gezeigten Verhalten des Lorenzmodells aus. Der Fehler der Vorhersage nimmt auf Grund des Analysenfehlers mit der Zeit zu.

Die Wettervorhersagemodelle enthalten empirische Koeffizienten, deren Werte im Modell ebenfalls nur fehlerbehaftete Schätzungen sind. Zusätzlich wirken sich Approximationsfehler und Rundungsfehler aus. Beide Fehler führen in einem nichtlinearen System, sei es das sehr

einfache Lorenz-System mit drei Freiheitsgraden oder im Wettervorhersagesystem mit Millionen von Freiheitsgraden zu einem Wachsen eines unvermeidbaren Fehlers.

Deterministische und probabilistische Vorhersagen

Jede Wettervorhersage wird ab einem von der Anwendung her bestimmten Fehler unbrauchbar. Da die Fehler in einem Vorhersagesystem, das das nichtlineare Verhalten der Natur richtig wiedergibt, immer wachsen muss, ist die Vorhersagbarkeit der Zustände eines nichtlinearen Systems wie die Atmosphäre immer beschränkt. Dabei hängt das Fehlerwachstum immer vom Zustand des Systems, im Fall der Wettervorhersage also vom Wetter selber ab. Schon Lorenz gab in seiner Arbeit 1963 eine Empfehlung, wie der Vorhersagefehler abgeschätzt oder besser vorhergesagt werden kann. Er schlug vor, mit Hilfe eines Ensembles vieler Vorhersagen zum gleichen Zieltermin das Auseinanderlaufen der Vorhersagen und damit die Grenze der Vorhersagbarkeit vorherzusagen. Dabei ist das Ensemble so zu bilden, dass die Unsicherheiten im Anfangszustand und in der Formulierung der verwendeten Vorhersagemodelle durch eine geeignete Auswahl von Anfangswerten und beispielsweise von empirischen Koeffizienten oder durch die Verwendung mehrerer Vorhersagemodelle abgebildet werden.

Das in Abbildung 3.2 gezeigte prinzipielle Verhalten des Fehlerwachstums bestätigt, dass eine Wettervorhersage bis zu einem durch das Fehlerwachstum festgelegten Vorhersagezeitraum „deterministisch“ erfolgen kann, darüber hinaus jedoch das Ensemble von vielen Lösungen nur noch statistisch beschrieben werden kann und dass man somit zu einer „probabilistischen“ Vorhersage kommt. Denn es kann von Vornherein nicht beurteilt werden, ob eine der im Ensemble gezeigten Lösungen später den wahren Verlauf des Wetters mit brauchbarer Genauigkeit wiedergibt.

Skalenabhängigkeit der Vorhersagbarkeit

Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Vorhersagbarkeit eines wetterwirksamen Phänomens und der relevanten internen Zeitskala der beteiligten Prozesse. Dabei zeigt die Erfahrung auch, dass in der Atmosphäre Zeit- und Raumskalen ebenfalls eng gekoppelt sind. Prozesse auf großen räumlichen Skalen verlaufen in langen Zeitskalen und besitzen eine lange deterministische Vorhersagbarkeit, Prozesse auf kleinen räumlichen Skalen verlaufen in kleinen Zeitskalen und besitzen eine kleine deterministische Vorhersagbarkeit. Deshalb muss die Angabe der Vorhersagbarkeit immer bezüglich einer räumlichen und zeitlichen Skala bewertet werden. Auf Grund der Skalenbezogenheit atmosphärischer Prozesse kann beispielsweise heute eine typische Kurzfristvorhersage über zwei oder drei Tage bezüglich der großen Skalen deterministisch interpretiert werden, bezüglich kleinerer Skalen jedoch sicher nicht.

Für Mittel- und Langfristvorhersagen sind Ensemblevorhersagesysteme inzwischen beispielsweise beim EZMW voll etabliert. Routinemäßig werden inzwischen Jahreszeitenvorhersagen, Monatsvorhersagen für den Langfristbereich und Vorhersagen über zwei Wochen für die Mittelfrist mit Hilfe von Ensemble-Vorhersagen hergestellt. Grundlage der Vorhersagbarkeit der Langfristvorhersagen sind überwiegend die Zeitskalen der ozeanischen Zirkulation, für die es aber zur Zeit noch kein ausreichendes Beobachtungssystem gibt. Grundlage der Vorhersagbarkeit in der Mittelfrist sind die Zeitskalen der globalen Zirkulation, insbesondere die der langen Wellen. Stürme der mittleren

Breiten, die durch die barokline Instabilität entstehen, liegen damit noch deutlich unterhalb der Vorhersagbarkeit in der Mittelfrist.

Je kleiner die relevanten Skalen sind, desto mehr Freiheitsgrade (Auflösung) muss ein Vorhersagesystem besitzen, um alle notwendigen Skalen beschreiben zu können. Während also Vorhersagesysteme für die Mittelfrist und Langfrist mit relativ wenigen Freiheitsgraden und vergleichsweise geringem technischen Aufwand (Rechnerressourcen) betrieben werden können, erfordern Vorhersagesysteme für die Kurz- und Kürzestfrist viele Freiheitsgrade und einen hohen technischen Aufwand (Rechnerressourcen). Dies ist ein wesentlicher Grund, weshalb Ensemblevorhersagesysteme für die Mittelfrist- und Langfristvorhersage inzwischen als etabliert angesehen werden können, Ensemblevorhersagesysteme für die Kurzfrist sich jedoch erst in Entwicklung befinden.

Ensemble-Vorhersagesysteme

Die im Abschnitt 4.1 beschriebene Entwicklung einer LM-Version für die Kürzestfristvorhersage („LMK“) im DWD ist als Einstieg in die Entwicklung eines Ensemble-Vorhersagesystems für die Kürzest- und Kurzfrist vorgesehen. Um den technischen Aufwand mit den heutigen Möglichkeiten in realisierbaren Grenzen zu halten, ist vorgesehen, alle 3 Stunden eine Vorhersage über 18 Stunden herzustellen. Die sich zeitlich überlappenden Vorhersagen können dann als Ensemble von Vorhersagen ausgewertet werden. Dabei wird mit der geplanten Gitterweite von unter 3 km eine Auflösung angestrebt, die zumindest die Beschreibung der Selbstorganisation von hochreichender Konvektion erlauben soll, um die damit in unserer Klimazone häufig verbundenen extremen Niederschlags- und Sturmereignisse vorhersagen zu können. Ein weiteres wichtiges Ziel der LMK-Entwicklung ist die teilweise Überbrückung des Zeitbereichs zwischen der Anwendbarkeit von Nowcasting-Verfahren und der heutigen numerischen Wettervorhersage, wo wir heute kaum Werkzeuge für eine objektive Wettervorhersage besitzen.

Mit Blick auf die nächste Rechnergeneration und die damit zu erwartende Rechenleistung wird im DWD in Kooperation mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde ein echtes Ensemble-Vorhersagesystem auf Basis des LMK entwickelt, das dann das zur Zeit im Aufbau befindliche LMK-Vorhersagesystem mindestens ergänzen soll. Darüber hinaus ist der DWD an folgenden europäischen Projekten zur Entwicklung von Ensemble-Vorhersagesystemen für die Kurzfristvorhersage beteiligt:

COSMO-LEPS: Hier werden mit Hilfe des LM die Ensemblevorhersagen des EZMW für die Mittelfrist regionalisiert, indem das LM mit Rand und Anfangswerten des EZMW-Ensemblevorhersagesystem über Europa eingesetzt wird. Dieses System simuliert im Wesentlichen den Einfluss einer höher aufgelösten Topographie. COSMO-LEPS ist ein Vorhersagesystem für die Mittelfristvorhersage. COSMO-LEPS wird auf Kosten der Mitglieder im „Consortium for Small Scale Modeling“ zur Entwicklung des LM beim EZMW gerechnet. Das System ist operationell.

SRNWP-PEPS: Aus den operationell verfügbaren Vorhersagen mit hochauflösenden Regionalmodellen in Europa wird ein „poor man’s ensemble prediction system“ (PEPS) gebildet. Teilnehmer und Datenprovider sind alle

Mitgliedsländer der „short range numerical weather prediction“ (SRNWP)-Gruppe in EUMETNET. Alle Teilnehmer liefern zweimal täglich einen vereinbarten Datensatz zum DWD. Dort werden Vorhersageprodukte erzeugt und an alle Teilnehmer verteilt. Das System ist operationell.

INM:

Der nationale Wetterdienst Spaniens INM baut ein Ensemble-Vorhersagesystem auf Basis mehrerer Regionalmodelle, mehrerer Analysen und mehrerer Globalmodelle zur Versorgung mit Randwerten auf. Dieses System wird ein „multi model – multi analysis – multi boundary condition“ Ensemble-Vorhersagesystem mit einer Gitterweite bei 10 km sein. Der DWD trägt mit der Bereitstellung von Randwerten und Analysen aus seinem globalen Vorhersagesystem, mit dem hydrostatischen Regionalmodell HRM und im Rahmen von COSMO durch Bereitstellung von LM teil. Die eingesetzten Vorhersagemodelle werden alle auf den Rechnern des INM gerechnet. Das System ist präoperationell.

Bewertung

Diese Projekte verdeutlichen, dass ein großer Forschungsbedarf bezüglich der optimalen Konstruktion der Ensemble von Vorhersagen, der Produktentwicklung und der optimalen Einbeziehung der probabilistischen Information in die Entscheidungsprozesse beispielsweise des Katastrophenschutzes besteht. Zusätzlich sind diese Vorhersagesysteme so aufwendig, dass sie offensichtlich nur innerhalb europäischer Kooperationen entwickelt und betrieben werden können. Dabei kann aber schon jetzt gezeigt werden, dass bei richtiger Nutzung der ökonomische Wert dieser Vorhersagesysteme deutlich dem Wert deterministischer Vorhersagen überlegen ist. Richte Nutzung bedeutet, dass die Information aus dem Vorhersagesystem durch alle folgenden Vorhersage- und Entscheidungsprozesse mitgeführt und bewertet werden muss.

Die Aufgabe, das Vorhersagemodell einschließlich der Datenassimilation zu verbessern, um den Fehler der einzelnen Vorhersage des Ensembles so gering wie möglich zu halten, bleibt selbstverständlich bestehen. Deshalb sind die Verbesserung des Prozessverständnisses, der Validierungs- und Verifikationsverfahren und die Entwicklung von Vorhersageverfahren Ziele des DFG-Schwerpunktprogramms 1167 PQP („Praecipitationis Quantitativaevae Praedictio“ – Vorhersage des quantitativen Niederschlags), das der DWD unterstützt.

4 Projektbearbeitung

4.1 Teilprojekt 1: LM-Kürzestfrist

4.1.1 Stand der Entwicklung des LM-Kürzestfrist

Im DWD wird derzeit ein modellgestütztes Vorhersageverfahren für den Kürzestfristbereich (3-18 h) entwickelt. In diesem Zeitbereich tritt gefährliches Wetter oft im Zusammenhang mit hochreichender Feuchtkonvektion (z.B. Super- und Multizellengewitter, Böenwalzen, mesoskalige konvektive Komplexe, Mesozyclonen, etc.) oder aufgrund von Wechselwirkungen mit der feinskaligen Topographie (z.B. Bodennebel, Föhnstürme, Sturzfluten bei Starkniederschlägen, etc.) auf. Solche Wettererscheinungen sind mit der Auflösung der operationellen Modelle GME und LM sowie der dort verwendeten Parametrisierungsverfahren grundsätzlich nicht oder nur mit erheblichen Schwächen vorhersagbar. Warn- und Vorhersagedienste im Kürzestfristbereich erfordern eine numerische Modellierung der Entwicklung gefährlicher Wettersituationen mit möglichst hoher räumlich-zeitlicher Genauigkeit. Deswegen wird in der Forschungs- und Entwicklungsabteilung des DWD zur Zeit am LMK (LM-Kürzestfrist), einer Variante des nicht-hydrostatischen Lokal-Modells (LM), gearbeitet. Das LMK soll mit einer horizontalen Gitterweite von etwa 2-3 km und 50 vertikalen Schichten auf einem Ausschnitt, der das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland und in Teilen auch das der Anrainerstaaten abdeckt, betrieben werden.

Vorgesehen ist, das Modell in das ab September 2005 operationelle LME (LM Europa) zu nesten, trotzdem aber auch einen eigenständigen Assimilationszyklus auf der feinen Skala zu rechnen, um insbesondere räumlich hochauflöste Beobachtungsdaten wie z.B. Radarreflektivitäten nutzen zu können. Dieses Konzept wird unter anderem verfolgt, um auf dem Gebiet der quantitativen Niederschlagsvorhersage genauere Prognosen liefern zu können, da entsprechende Felder z.B. als Eingangsdaten für die Modelle der Hochwasser-Vorhersagedienste dienen. Da ein wesentliches Ziel der LMK-Entwicklung darin besteht, Prozesse, die im Zusammenhang mit Feuchtkonvektion stehen, besser zu simulieren, wird im LMK nur noch eine Konvektionsparametrisierung für flache Konvektion benutzt. Mittelhohe und hochreichende Konvektion sollen explizit simuliert werden. An dieser Stelle wird ein positiver Einfluss der Assimilation von Radardaten auf die Initialisierung von Konvektion erwartet. Modellvorhersagen mit dem LMK sollen alle drei Stunden mit einem jeweils 18-stündigen Vorhersagezeitraum erfolgen. Modellgestützte Kürzestfristverfahren dieser Art werden bisher in noch keinem europäischen Vorhersagedienst angewandt. Es gibt allerdings bei MeteoFrance, beim UK MetOffice und in der HIRLAM-Gruppe ähnliche Projekte. Mit LMK wird weitgehend wissenschaftliches Neuland betreten. Zwar bestehen international (vor allem an Universitäten und Forschungseinrichtungen) Erfahrungen mit CRMs (cloud resolving models), diese Modelle wurden bisher aber noch nicht für operationelle Vorhersagezwecke mit Datenassimilation (und Topographie) eingesetzt.

Da die Entwicklung des LMK nicht allein durch permanentes Personal des DWD erbracht werden kann, wurde es als Teilprojekt 2 in das Aktionsprogramm 2003 (AP 2003) des DWD aufgenommen. Die Arbeitsgruppe LMK besteht aus sieben Zeitangestellten (6 x AP 2003, 1 x RADVOR-OP) und ca. sieben Liniенmitarbeitern. Letztere können aber zum Teil nur in sehr geringem Umfang am Projekt LMK mitarbeiten und übernehmen vielmehr Mentorenaufgaben. Das Teilprojekt des AP2003 ist in vier Maßnahmen gegliedert, für die

jeweils ein Mentor aus der Linie verantwortlich ist. Die Maßnahmen sind „M7: Radardaten“, „M8: Wirkungsweise Latent Heat Nudging“, „M9: LM auf 2.8 km & explizite Konvektion“ und „M10: Validierung LMK“. Projektziel ist die operationelle Nutzung des LMK ca. Ende 2006. Die Messlatte zur Zielerreichung ist das operationelle LM (bzw. dann LME). LMK-Vorhersagen sollen auf der 7-km Skala im Kurzfristbereich besser sein als die des LM/LME.

Im Folgenden werden die wesentlichen Entwicklungen, die während der ersten zwei Projektjahre innerhalb der einzelnen Maßnahmen erreicht wurden, dargestellt. Im Aufgabenbereich „Radardaten“ wurde ein Programm erstellt, das die Radardaten in das GRIB-Format für Modelldaten transformiert. Derzeit werden Verfahren entwickelt, die der Erkennung und Markierung (später möglicherweise auch der Korrektur) von Falschechos dienen sollen. Diese sind z.B. Speichen oder vereinzelt auftretende Falschechos, die von Bodenzielen (z.B. Windkraftanlagen) verursacht werden. Innerhalb der Maßnahme „Wirkungsweise Latent Heat Nudging“ wurde im Wesentlichen die Problematik der Wechselwirkungen zwischen „prognostischem Niederschlag“ und „Latent Heat Nudging“ angegangen. Eine genauere Beschreibung dieser Thematik erfolgt in Abschnitt 4.1.4. Im Arbeitspaket „LM auf 2.8 km & explizite Konvektion“ wurde die Numerik des LM bzw. LMK auf ein 2-Zeitebenen-Verfahren umgestellt und grundlegend überarbeitet. Weitere Schwerpunkte waren die Untersuchung verbesserter Advektionsschemata für Feuchtevariablen, der Einbau eines 6-Klassen-Wolkenmikrophysikschemas (einschließlich Graupel) in das Modell, erste Tests mit einer Konvektionsparametrisierung für flache Konvektion und die Durchführung längerer Simulationsexperimente. Diese LMK-Testsuiten umfassen 2-3-monatige Zeiträume, innerhalb derer einzelne neue Modellkomponenten des LMK anhand von 00- und 12 UTC-Vorhersagen getestet wurden. Erste Verifikationsergebnisse der LMK-Testsuiten, die im Rahmen der Maßnahme „Validierung LMK“ erstellt wurden, zeigen, dass LMK nach gegenwärtigem Stand bessere Vorhersagen von Böen und teilweise von Niederschlag liefert als LM. Außerdem wird in dieser Maßnahme auch an der Implementierung eines Radarsimulationsmodells zur Erzeugung synthetischer Radarbilder gearbeitet.

4.1.2 Datenassimilation mit dem Latent Heat Nudging

Der Datenassimilation und speziell der Nutzung von zeitlich und räumlich hochauflösten Beobachtungsdaten wie z.B. Radardaten kommen in einem meso- γ -skaligen Modell wie dem LMK eine besondere Bedeutung zu. Deswegen wurde bei der Planung des LMK und bei der Aufstellung der Arbeitsgruppe ein Schwerpunkt auf die Verwendung von Radardaten innerhalb der Assimilation für das LMK gelegt.

In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Methoden - sowohl variationelle als auch „Nudging“-Verfahren - entwickelt, um Niederschlagsinformationen in der Datenassimilation für numerische Wettervorhersagemodele nutzen zu können (Alberoni et al., 2002).

Sollen Radarreflektivitäten als zusätzliche Beobachtungsdaten in die Datenassimilation für das LMK aufgenommen werden, können sowohl diese wie auch aus ihnen abgeleitete Niederschlagsraten nicht direkt in das LMK assimiliert werden. Auch wenn der Niederschlag (Schnee und Regen in LM bzw. LME; Schnee, Regen und Graupel im LMK) inzwischen eine prognostische Größe des Modells ist, ist eine direkte Assimilation der Niederschlagsgrößen wenig sinnvoll, da nur eine schwache Rückkopplung zwischen Niederschlagsrate und der

Modelldynamik und -physik besteht. Diese beiden Bereiche sind aber entscheidend für die Niederschlagsbildung, und es muss versucht werden, über die Korrektur anderer prognostischer Variablen (z.B. Temperatur, spezifische Feuchte oder Windfeld) die Niederschlagsinformation in das Modell zu „nudgen“. Demnach wird eine Beziehung zwischen der beobachteten Niederschlagsrate und den prognostischen Modellvariablen benötigt. Gesucht sind Konzepte basierend auf den Prozessen und Bedingungen, die normalerweise im Zusammenhang mit Niederschlag auftreten.

Ein Prozess, der mit der Niederschlagsbildung verbunden ist, ist z.B. die Kondensation von Wasserdampf und damit einhergehend das Freiwerden von latenter Wärme. Bei diesem Vorgang handelt es sich zwar primär um die Wolkenbildung, aber diese ist Voraussetzung zur Bildung von Niederschlag aus Wolkentröpfchen. Es besteht die Möglichkeit, durch eine Adjustierung der Umsätze der latenten Wärme im Modell auf die Dynamik und damit auf die Niederschlagsbildung Einfluss zu nehmen. Die diabatischen Erwärmungsraten werden dabei so eingestellt, dass die beobachteten Niederschlagsraten möglichst vom Modell simuliert werden. Dieses Vorgehen wird als „Latent Heat Nudging“ (LHN) bezeichnet (z.B. Wang und Warner, 1988). Eine grundlegende Annahme ist, dass die vertikal integrierte latente Erwärmungsrate ungefähr proportional zur Niederschlagsrate ist. Diese Annahme kann man machen, da eine regnende Wolke netto nicht immer mehr Flüssigwasser speichert. Es wird quasi ein Gleichgewicht zwischen den Wolken bildenden (Kondensation) und Wolken auflösenden (Niederschlag) Prozessen angenommen. Diabatische Prozesse und damit Quellen oder Senken für latente Wärme sind:

- Kondensation/Verdunstung in Wolken
- Verdunstung von Regen unter Wolken
- Schmelzen und Gefrieren von Regen/Schnee.

Der Ansatz, um diese Abläufe im Modell zu korrigieren, ist das Hinzufügen von LHN-Temperaturinkrementen zur Temperaturtendenzgleichung:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = F(T) + \frac{\partial T_{Nudging}}{\partial t} + \frac{\partial T_{LHN}}{\partial t} \quad (4.1)$$

Gemäß der allgemeinen Nudging-Gleichung beschreibt diese Gleichung die zeitliche Entwicklung der Temperatur. Die eigentliche prognostische Modellgleichung für T wird um einen Summanden aus dem Nudging und um einen Beitrag aus dem LHN erweitert. Die genaue Vorgehensweise zur Berechnung dieser LHN-Beiträge wird im Folgenden erläutert.

Eine Unschärfe des oben beschriebenen Ansatzes - Proportionalität zwischen vertikal integrierter latenter Erwärmungsrate und Niederschlagsrate - besteht darin, dass man aus der 2-dimensionalen, beobachteten Niederschlagsverteilung nur auf die horizontale, nicht aber auf die vertikale Verteilung der latenten Erwärmungsraten schließen kann. Deswegen werden die vom Modell erzeugten Erwärmungsraten gitterpunktsweise (d.h. im Profil) abgelesen und dann neu skaliert. Eine Alternative wäre die Verwendung von idealisierten Profilen der latenten Heizrate.

Die Berechnung der LHN-Temperaturinkrementa erfolgt, indem die vom Modell errechnete Temperaturänderung aufgrund von Umsätzen der latenten Wärme (ΔT_{LHmo}) mit dem

Verhältnis aus analysiertem Niederschlag und modelliertem Niederschlag skaliert wird und anschließend die modellierte Änderung ΔT_{LHmo} abgezogen wird:

$$\Delta T_{LHN} = \left(\frac{RR_{ana}}{RR_{mo}} - 1 \right) \cdot \Delta T_{LHmo} \quad (4.2)$$

Die Beiträge zur modellgenerierten latenten Erwärmungs- bzw. Abkühlungsrate ΔT_{LHmo} stammen aus dem Wolkenschema, der Niederschlagsparametrisierung, dem Nudging (konventioneller Daten) und ggf. der Konvektionsparametrisierung. Da die explizite Simulation von Konvektion ein Ziel des LMK-Projektes ist, wurde auch für die Experimente zum „Latent Heat Nudging“ das konventionelle Konvektionsschema ausgeschaltet. Die stattdessen verwendete Parametrisierung für flache Konvektion simuliert keine Umsätze latenter Wärme, sodass von diesem LMK-Modul keine Beiträge zur modellgenerierten latenten Erwärmungsrate geliefert werden.

Der analysierte Niederschlag wird als gewichtete Summe aus beobachtetem und modelliertem Niederschlag berechnet:

$$RR_{ana} = w \cdot RR_{obs} + (1-w) \cdot RR_{mo} \quad (4.3)$$

Das Gewicht w in obiger Gleichung wird momentan auf „Eins“ gesetzt, wenn eine Radarmessung an einem Gitterpunkt vorhanden ist, auf „Null“, wenn kein Messwert vorliegt. Dies ist z.B. der Fall, wenn ein Radargerät ausgefallen ist. Gebiete, die dann nicht im Beobachtungsbereich eines anderen Radargerätes sind, werden dann bei der Kompositgenerierung mit einem Fehlwert belegt und dementsprechend werden die Gewichte an diesen Gitterpunkten auf „Null“ gesetzt. Der eigentliche Skalierungsfaktor $f = RR_{ana} / RR_{mo}$ wird limitiert, um zu große Temperaturinkremente zu vermeiden. Ist das Modell an einem Gitterpunkt zu trocken, so kann dort kein Profil der latenten Heizrate abgegriffen werden. Deswegen kann optional eine Gitterpunktsuche in einer zu spezifizierenden Umgebung des jeweiligen Analysegitterpunktes durchgeführt werden, um einen Gitterpunkt mit adäquater Niederschlagsrate und demzufolge auch mit passendem Heizprofil ausfindig zu machen. Bleibt diese Suche erfolglos, bzw. wird die Gitterpunktsuche gar nicht eingeschaltet, so wird ein klimatologisches Profil der latenten Heizrate verwendet.

Weitere, optional zu verwendende Verfahren im LHN sind:

- Horizontale Filterung der Eingangsfelder (2D-Felder von beobachtetem und modelliertem Niederschlag, 3D-Feld der modellierten latenten Heizrate)
- Vertikale Filterung der Profile der latenten Heizrate
- Absolute Limitierung der LHN-Temperaturinkremente
- Horizontale Filterung der LHN-Temperaturinkremente
- Adjustierung der Vertikalprofile der spezifischen Feuchte.

Anzumerken ist, dass es genügt, einen der horizontalen Filter aufzurufen, wenn horizontal gefiltert werden soll. Die vertikale Filterung der Profile der latenten Heizrate soll „lärmige“, modellgenerierte Heizprofile glätten, um sich selbst verstärkende Adjustierungsprozesse zu vermeiden. Es wird ein eindimensionaler Shapiro-Filter mit zusätzlicher Unterdrückung von

isolierten Spitzen verwendet. Die absolute Limitierung und die horizontale Filterung der LHN-Temperaturinkremente werden vorgenommen, um unrealistische Strukturen der Umsätze der latenten Wärme und damit des Temperaturprofils zu verhindern. Die Adjustierung der Vertikalprofile der spezifischen Feuchte q ist neben der eigentlichen Anpassung der Temperaturprofile eine wirkungsvolle Maßnahme, um den allgemeinen Modellzustand in Richtung des beobachteten Niederschlagsverhaltens zu treiben. Im Allgemeinen wird dabei die relative Feuchte erhalten, d.h. bei Verstärkung des Freiwerdens latenter Wärme (positive LHN-Temperaturinkremente) wird die spezifische Feuchte q erhöht, bei Abschwächung des Freiwerdens latenter Wärme wird q verringert. An Gitterpunkten, an denen laut Radar Niederschlag fällt, aber bisher keiner vom Modell generiert wurde, und an denen bisher auch kein Wolkenwasser oder Wolkeneis gebildet wurde, ist die Atmosphäre in der Regel noch untersättigt. Deswegen wird an diesen Stellen die spezifische Feuchte langsam, d.h. über eine Nudging-Zeitskala von einer halben Stunde, erhöht, um die relative Feuchte in Richtung Sättigung (100% rel. Feuchte) zu treiben.

Eine Veranschaulichung der Vorgehensweise beim „Latent Heat Nudging“ ermöglicht das Flussdiagramm in Abb. 4.1. Die optional verwendbaren Verfahrensschritte sind eingerückt und mit gestricheltem Rahmen gezeichnet.

Das bis hier beschriebene LHN-Verfahren musste aufgrund der Einführung des prognostischen Niederschlags modifiziert werden. Die entsprechenden Anpassungen des Schemas werden in Abschnitt 4.1.4 beschrieben.

Ein LHN-Algorithmus, der von Jones und Macpherson (1997) entwickelt wurde, wird seit April 1996 operationell am UK Met Office mit Erfolg eingesetzt (Macpherson, 2001). Der im LMK verwendete Quelltext wurde, basierend auf dem Verfahren von Jones und Macpherson (1997), ursprünglich von C. Köpken (DWD) entwickelt.

4.1.3 Radardaten für das Latent Heat Nudging

In das 2-dimensionale Feld der analysierten Niederschlagsrate RR_{ana} geht das 2-dimensionale Feld der beobachteten Niederschlagsrate RR_{obs} ein. Während der ersten Tests mit dem LHN-Verfahren wurde das Internationale Komposit (PI) als Ausgangspunkt für die Berechnung der beobachteten Niederschlagsrate RR_{obs} verwendet. Weitergehende Informationen zum PI und anderen Radarprodukten bzw. -formaten findet man z.B. in Schreiber, 2000. Untersuchungen des LHN-Verfahrens mit Hilfe von idealisierten Experimenten (Leuenberger und Rossa, 2003) haben gezeigt, dass eine Verwendung von Radardaten mit hoher „Update“-Frequenz zu realistischeren Nudging-Analysen des LM führt. Deswegen und aufgrund weiterer Vorteile, die im Folgenden beschrieben werden, wird inzwischen ein Radarprodukt, basierend auf den DX-Daten des DWD-Radarverbunds, als Beobachtung in das LHN eingebracht. Dabei handelt es sich um ein Vorprodukt aus dem Projekt RADOLAN. In Vorverarbeitungsschritten des Aneichverfahrens werden die Eingangsdaten (DX, Auflösung: $1\text{km} \times 1^\circ$, 5 Minuten, aus dem „precipitation scan“) einer Korrektur der orographischen Abschattung unterzogen und mit einer variablen Z-R-Beziehung (abhängig von der Intensität und der horizontalen Struktur der Radarechos) in Niederschlagsraten umgerechnet (Sacher und Lang, 2001). Schließlich erfolgt die Kompositgenerierung, Interpolation auf das LM-Gitter und Konvertierung in das GRIB-Format.

Derzeit enthält das DX-Komposit nur die Daten der 16 DWD-Radarstandorte. Es ist aber geplant, das DX-Produkt zumindest schrittweise um einzelne ausländische Radarstandorte zu erweitern. Als erstes sollen Radardaten des Radars Nancy in das DX-Komposit eingebunden werden. Weiterhin wird geprüft, ob außerhalb des bestehenden DX-Komposit das PI, zumindest solange keine dem DX entsprechenden ausländischen Daten vorliegen, für das LHN verwendet werden kann.

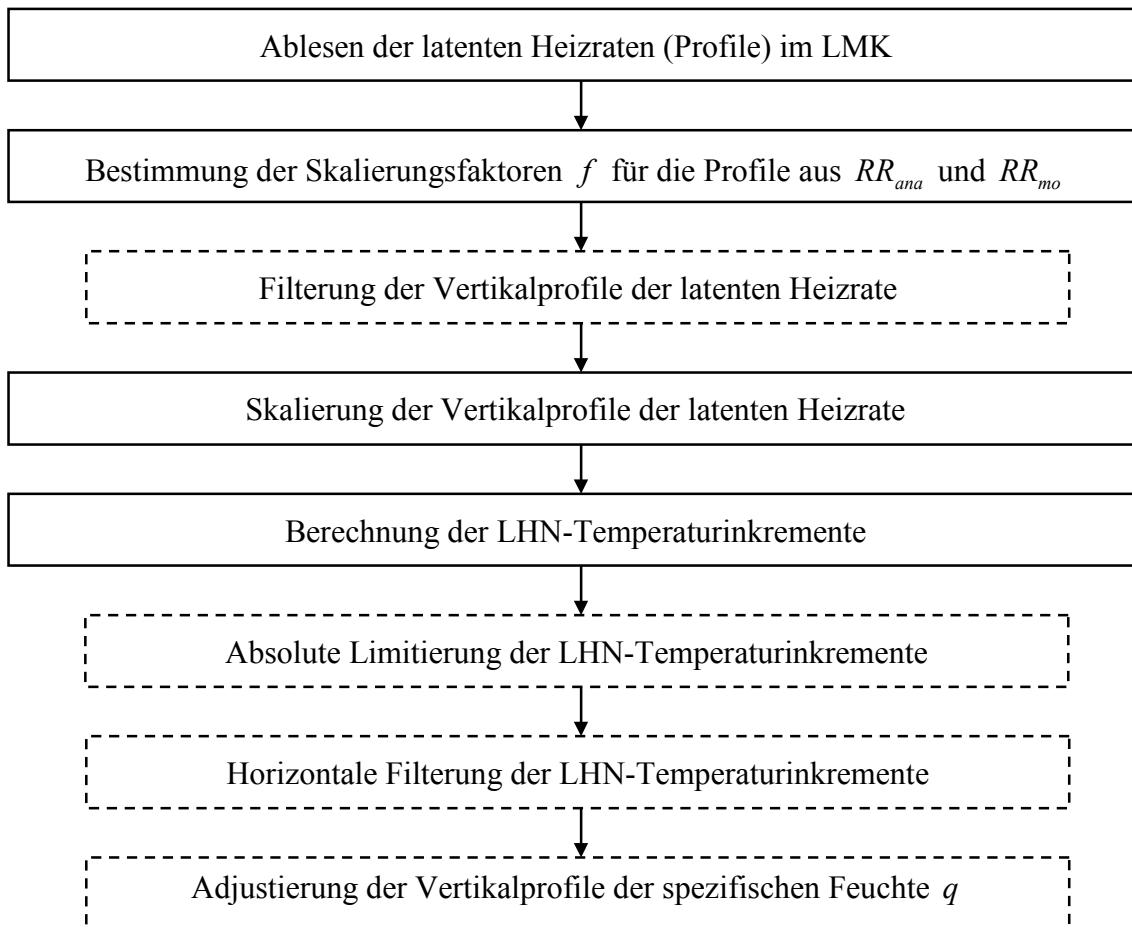


Abbildung 4.1: Flussdiagramm: „Latent Heat Nudging“ im LMK.

Problematisch ist bei beiden Radarprodukten (DX und PI) das Auftreten von „Clutter“ und Falschechos, die in noch nicht ausreichender Weise behandelt werden. Operationell ist an allen 16 Standorten des DWD ein Clutter-Filter, basierend auf der Dopplerfilterung, im Einsatz. Dieser Filter kann aber vermutlich nicht in ausreichender Weise Falschechos erkennen, die z.B. von Windkraftanlagen hervorgerufen werden, die in unmittelbarer Nähe zu einem Radarstandort stehen. „Nicht-Niederschlagsechos“, die wahrscheinlich durch Windkraftanlagen verursacht werden, sind in Abb. 4.2a innerhalb des roten Kreises zu erkennen. Hierbei handelt es sich um die unmittelbare Umgebung des Radarstandorts Ummendorf. Auffällig bei dieser Art von Störecho ist, dass es beinahe permanent auftritt und stellenweise sehr hohe Reflektivitätswerte besitzt. Abbildung 4.2d zeigt die stündliche Niederschlagshöhe eines LMK-Assimilationslaufes, in dem die in Abb. 4.2a gezeigten Radardaten unkorrigiert mit Hilfe des LHN-Verfahrens assimiliert wurden. Offensichtlich bildet sich bei der vorliegenden synoptischen Situation fälschlicherweise eine artifizielle Schauerzelle mit nicht unerheblichen Niederschlagsraten während der Assimilation (siehe

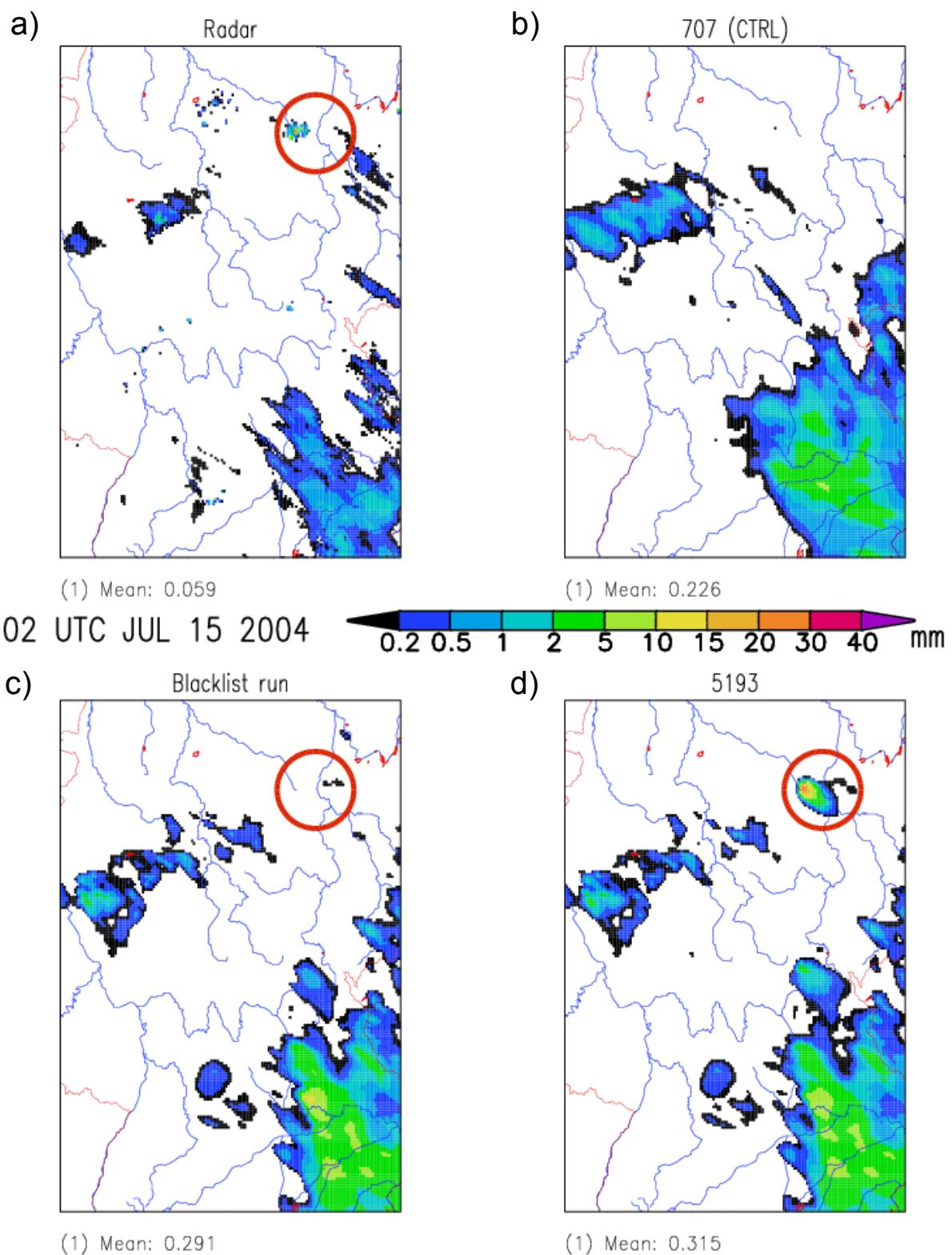


Abbildung 4.2: Niederschlagshöhe in mm am 15. Juli 2004, 1-2 UTC: Radarmessung (a), Kontrolllauf ohne LHN (b), LHN-Lauf unter Berücksichtigung einer „Blacklist“ für Radardaten (c) und LHN-Lauf ohne Verwendung einer „Blacklist“ (d).

roter Kreis in Abb. 4.2d). Assimilationsläufe über längere Zeiträume, die auch Hochdrucklagen und damit stabilere Situationen einschließen, zeigen, dass die Störechos im Bereich des Radarstandorts Ummendorf nicht permanent zur Bildung von Niederschlag im Assimilationslauf führen. Trotzdem sind negative Auswirkungen so häufig präsent, dass diese Art von Falschecho in jedem Fall aus den Eingangsdaten für das LHN-Verfahren entfernt werden müssen. Andere Arten von Störechos, die eher selten auftreten, aber ebenfalls unbedingt vor einer Nutzung der Radarniederschlagsdaten in der Assimilation entfernt werden müssen, sind z.B. Speichen oder Falschechos, die durch Schiffsverkehr hervorgerufen werden. Problematisch sind weiterhin durch den „Bright-Band“-Effekt verursachte, stark überhöhte Reflektivitäten im Bereich der Schmelzschicht und die dadurch entstehende starke Dämpfung der Echos in den Bereichen weiter entfernt vom Radarstandort.

Innerhalb der Maßnahme Radardaten des AP 2003 werden Ansätze verfolgt, einzelne Arten von Falschechos, wie z.B. Speichen, durch gezielte Erkennungsverfahren als fehlerhaft zu markieren bzw. zu korrigieren. Zusätzlich wurde für das LHN-Verfahren im Rahmen des Projektes RADVOR-OP eine Art „Blacklist“ oder auch Maske für die Radardaten erstellt, die jene Gitterpunkte des Radarkomposit vom LHN-Verfahren ausschließt, die regelmäßig Störechos aufweisen. Dabei wurde der Ansatz verfolgt, die Radarbilder mit zeitgleichen Satellitenbildern bzw. mit aus diesen abgeleiteten Wolkentypenklassifikationen zu vergleichen. Gitterpunkte, die mit einer gewissen Regelmäßigkeit ein Radarecho trotz wolkenloser Bedingungen aufweisen, werden dadurch in die Maske aufgenommen. Abbildung 4.3 zeigt die aktuell verwendete „Blacklist“ bzw. Maske, die u. a. die Umgebungen der Radarstandorte Ummendorf und Hannover von der Verwendung in der Datenassimilation ausschließt. Assimiliert man die in Abb. 4.2a gezeigten Radardaten unter

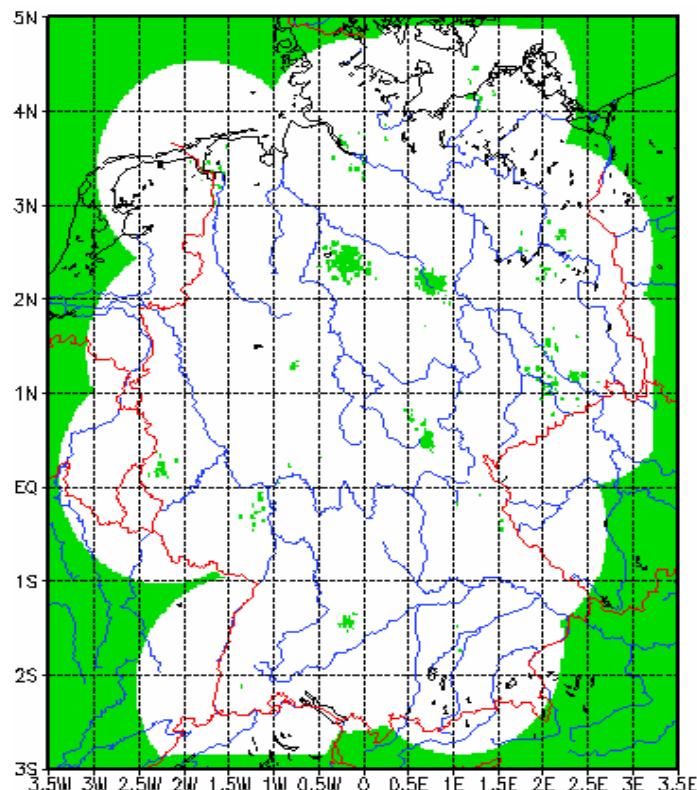


Abbildung 4.3: „Blacklist“ für das DX-Komposit.

Berücksichtigung der Maske, so erhält man eine innerhalb der Assimilation simulierte Niederschlagsverteilung, die kein artifizielles Niederschlagsmuster z.B. am Radarstandort Ummendorf enthält (siehe Abb. 4.2c).

4.1.4 Wechselwirkungen zwischen dem prognostischen Niederschlag und dem Latent Heat Nudging

Wie bereits im Ausblick des RADVOR-OP-Zwischenberichts (DWD, 2003) angedeutet, hat sich die Einführung des prognostischen Niederschlags in das LM und damit auch in das LMK als problematisch für das LHN-Verfahren erwiesen. Dies bedeutete eine Umstellung des Arbeitsplanes sowohl innerhalb des Projektes RADVOR-OP als auch innerhalb der Maßnahme „Wirkungsweise Latent Heat Nudging“ des AP 2003. Für die Quartale 4/2004, 1/2005 und 2/2005 wurde die Thematik der Wechselwirkungen zwischen dem prognostischen Niederschlag und dem „Latent Heat Nudging“ priorisiert. Daraus hat sich eine Verzögerung der eigentlich für diesen Zeitraum geplanten Durchführung der Simulationen der LAWA-Testfälle ergeben. In diesem Abschnitt soll dargestellt werden, welche zusätzlichen Schwierigkeiten bei der Einführung des prognostischen Niederschlags im Zusammenhang mit dem LHN-Verfahren aufgetreten sind und welche Lösungsansätze sich während der Bearbeitung dieser neuen Problematik ergeben haben und verfolgt wurden. Schließlich wird beschrieben, welche Modifikationen am herkömmlichen LHN-Algorithmus vorgenommen werden mussten, um seine Verwendbarkeit im Rahmen der Datenassimilation für das LMK sicherzustellen.

Um die Wirkungsweise des LHN-Verfahrens bei einer prognostischen Behandlung des Niederschlags zu testen, wurde ein Sensitivitätsexperiment durchgeführt, bei dem einmal mit dem konventionellen diagnostischen Niederschlagsschema und einmal mit dem neuen prognostischen Verfahren gerechnet wurde. Als Fall diente der 9. Juni 2004, an dem hauptsächlich während der Vormittagsstunden eine Konvergenzlinie mit starken Schauern und Gewittern über den Norden Deutschlands zog. Abbildung 4.4 zeigt stündliche Niederschlagshöhen für die Radarmessungen (b), einen Kontrolllauf (d.h. Nudging ohne LHN) (a), einen LHN-Lauf mit diagnostischem Niederschlag (c) und einen LHN-Lauf mit prognostischem Niederschlag (d). Vergleicht man die Abbildungen 4.4b und 4.4c miteinander, so fällt auf, dass die Niederschlagsmuster des LHN-Laufs mit konventionellem Niederschlagsschema sehr gut den durch Radar beobachteten entsprechen. Im Gegensatz dazu zeigt der LHN-Lauf mit prognostischem Niederschlag (Abb. 4.4d) eine deutliche Überschätzung der mittleren Niederschlagshöhe. Außerdem wird in diesem Lauf auch die Position der lokalen Maxima und Minima nicht korrekt reproduziert. Weitere Testfälle haben den Eindruck bestätigt, dass es bei gleichzeitiger Verwendung des konventionellen LHN-Algorithmus` und des prognostischen Niederschlagsschemas zu einer im Mittel deutlichen Überschätzung der Niederschlagsrate kommt.

Bei der Suche nach Erklärungen für diese Überschätzung des Niederschlags wurde der komplette LHN-Algorithmus einschließlich seiner grundlegenden Annahme, dass nämlich die am Boden auftretende Niederschlagsrate proportional zur vertikal integrierten latenten Erwärmungsrate in der selben Atmosphärensäule darüber ist, unter die Lupe genommen. Diese Relation ist eigentlich nur für große Raum- und Zeitskalen gültig, auf denen wir annehmen können, dass wolken- bzw. niederschlagbildende und wolkenauflösende (Niederschlag) Prozesse ungefähr im Gleichgewicht sind. Eine horizontale Maschenweite von

knapp drei Kilometern und die zusätzliche prognostische, d.h. advektion-berücksichtigende, Behandlung von Niederschlag stellen einen Schritt in Richtung Wolkenmodellierung dar. Das bedeutet aber, dass das Modell in der Lage ist, zwischen Aufwind- und Abwindregionen innerhalb eines größeren konvektiven Systems zu unterscheiden. Da der Hauptteil des Freisetzens latenter Wärme (bedingt durch Kondensation) in den Aufwindgebieten

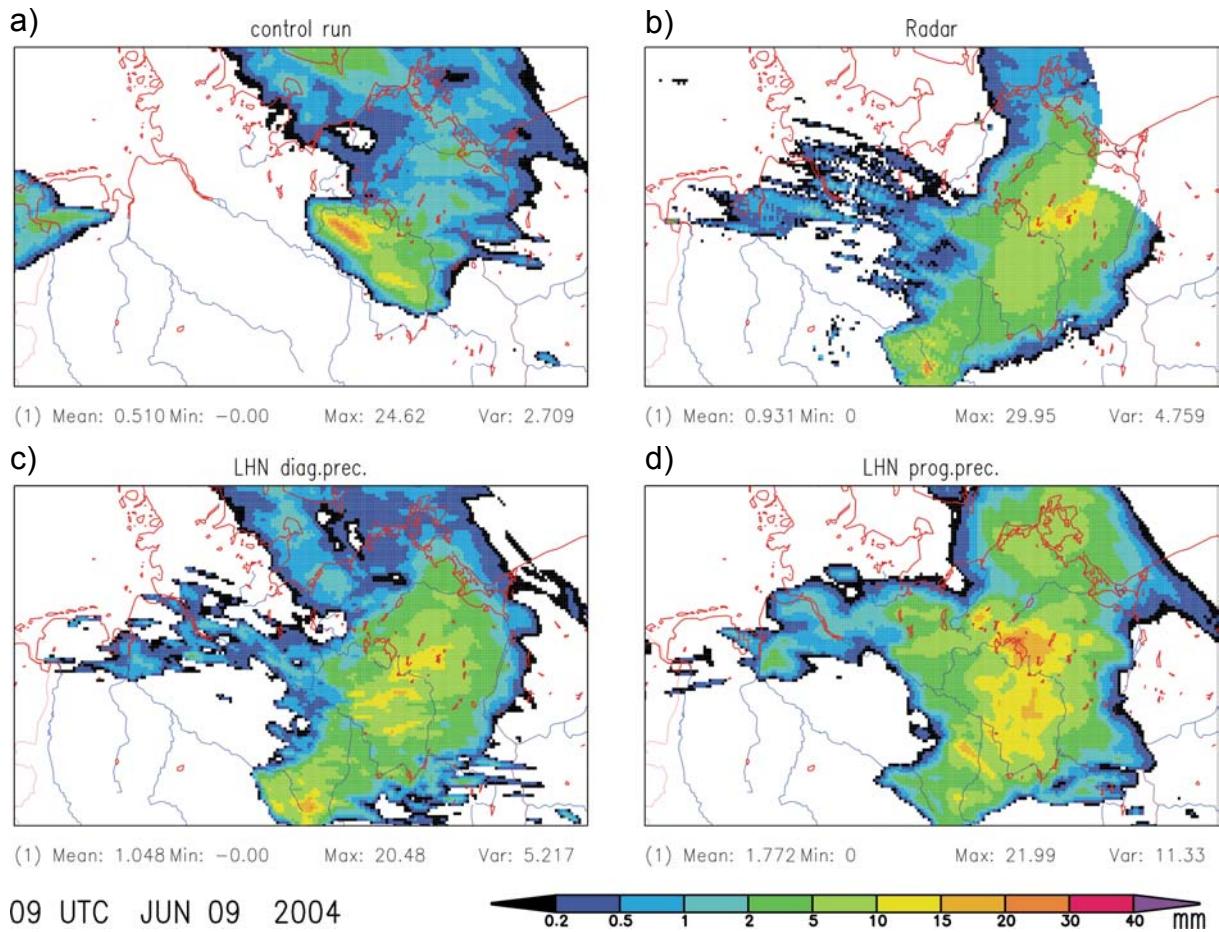


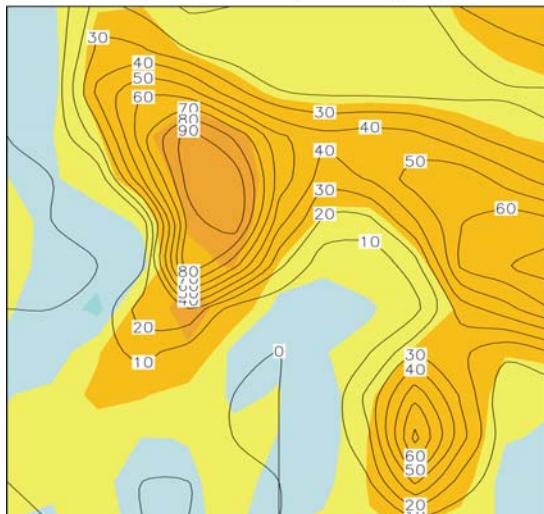
Abbildung 4.4: Niederschlagshöhe in mm am 9. Juni 2004, 8-9 UTC: Kontrolllauf (a), Radarmessung (b), LHN-Lauf mit diagnostischem Niederschlag (c) und LHN-Lauf mit prognostischem Niederschlag (d).

(„updrafts“) stattfindet, und da hohe Niederschlagsraten häufig in Abwindschlüchen („downdrafts“) auftreten, kann man erwarten, dass in wolkenauflösenden Modellen Gebiete mit hohen latenten Erwärmungsraten und Gebiete mit hohen Niederschlagsraten horizontal zueinander versetzt sind. Abbildung 4.5b zeigt die veränderte thermische Struktur in konvektiven Zellen, wenn Advektion von Niederschlag berücksichtigt wird, während Abb. 4.5a die bekannte hohe Korrelation zwischen latenter Erwärmungsrate und Niederschlagsrate für eine Simulation mit diagnostischem Niederschlagsschema zeigt.

Aufgrund der räumlichen Verschiebung zwischen Gebieten mit positiver latenter Erwärmungsrate und den Gebieten mit einem hohen Bodenniederschlag kann es passieren, dass möglicherweise LHN-Temperaturinkremente an den falschen Stellen eingebracht werden. Deswegen muss festgehalten werden, dass die Verwendung des prognostischen Niederschlags die Gültigkeit der grundlegenden Annahme des LHN-Verfahrens zumindest

schwächt. Neben der räumlichen Verschiebung ist auch der zeitliche Effekt zu berücksichtigen, denn der prognostisch berechnete Niederschlag benötigt auch eine gewisse Zeit, um den Boden zu erreichen, während bei einem rein diagnostischen Niederschlagsschema dies unrealistischerweise innerhalb eines Modellzeitschritts geschieht.

a) diagnostischer Niederschlag



b) prognostischer Niederschlag

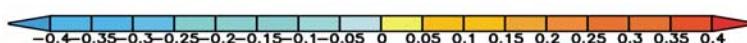
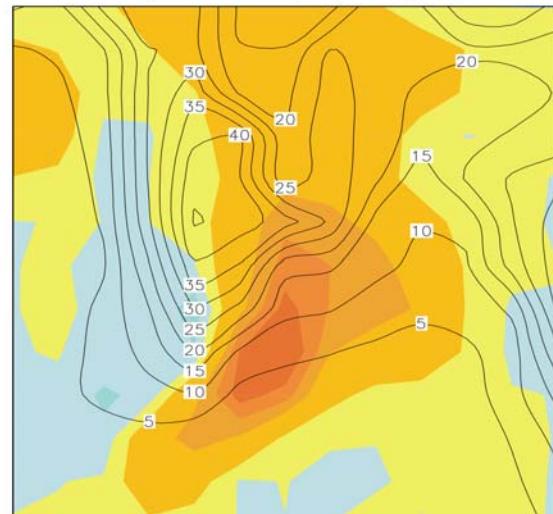


Abbildung 4.5: Horizontale Felder der vertikal integrierten latenten Erwärmungsrate (farbige Schattierungen, interne Einheiten) und der aktuellen Niederschlagsrate am Boden (schwarze Konturen, in mm/h) für einen Lauf mit diagnostischem Niederschlag (a) und einen mit prognostischem Niederschlag (b).

Aufgrund der zeitlichen Verschiebung erhält der LHN-Algorithmus keine sofortige Reaktion auf die bereits eingebrachten Temperaturinkremente. Infolgedessen werden irrtümlicherweise immer weiter positive Temperaturinkremente in das Modell eingebracht, bis das Modell schließlich bodennahen Niederschlag simuliert. Dies führt dann zu der in Abb. 4.4d gezeigten Übertreibung des Niederschlags.

Ausgehend von dieser Situation wurde das LHN-Schema für das LMK komplett überarbeitet. Dabei wurden verschiedene Ideen zur Anpassung des Algorithmus' an die geänderten Rahmenbedingungen angedacht und getestet. Diese unterschiedlichen Möglichkeiten sollen im Folgenden beschrieben werden.

Das größte Problem bestand darin, dass die Korrelation zwischen bodennaher Niederschlagsrate und vertikal integrierter latenter Erwärmungsrate innerhalb einer Modellsäule nicht mehr gegeben war. Um dies zu beheben wurde vorgeschlagen, die Felder des beobachteten und des modellierten Niederschlags und auch das 3D-Feld der latenten Wärme horizontal so stark zu glätten, dass die Korrelation zwischen Niederschlag und latenter Wärme wieder gegeben ist. Das würde dann aber einen Verlust an Information auf der Gitterskala bedeuten. Tests mit einer Filterung bzw. Glättung über bis zu 20 Gitterpunkte (ungefähr 60 km) lieferten zwar die gewünschte hohe Korrelation, zeigten aber kaum verbesserte LHN-Ergebnisse. Dies lässt sich damit erklären, dass vermutlich der zeitliche

Aspekt gegenüber dem räumlichen der bedeutendere ist bei der Verschiebung zwischen dem Freisetzen latenter Wärme und dem bodennahen Niederschlag. Die zeitliche Verzögerung bedeutet, wie bereits beschrieben, eine abgeschwächte Rückkopplung zwischen eingebrachtem LHN-Temperaturinkrement und dadurch adjustierter Niederschlagsrate. Um dieses Problem zu beheben, wird eine unverzögerte Information über den Effekt der eingebrachten Temperaturinkremente gebraucht. Diese Information wird dann als Referenz für den modellierten Niederschlag bei der Berechnung des Skalierungsfaktors verwendet. Die in Abschnitt 4.1.2 gezeigte Gleichung zur Berechnung der LHN-Temperaturinkremente wird leicht abgewandelt, indem der modellierte durch einen noch näher zu spezifizierenden Referenzniederschlag RR_{ref} ersetzt wird:

$$\Delta T_{LHN} = \left(\frac{RR_{ana}}{RR_{ref}} - 1 \right) \cdot \Delta T_{LHmo} \quad (4.4)$$

Eine Möglichkeit besteht darin, das herkömmliche diagnostische Niederschlagsschema zur Berechnung des Referenzniederschlags RR_{ref} zu verwenden. Dabei darf es aber keine Rückkopplungen auf andere Modellvariablen geben. Tests haben gezeigt, dass mit dieser Methode die Überschätzung des Niederschlags während der Datenassimilation bereits deutlich reduziert werden kann. Allerdings muss der diagnostische Niederschlag bei diesem Vorgehen noch kalibriert werden. Deswegen wurde auch eine zweite Variante zur Berechnung eines Referenzniederschlags in Betracht gezogen. Dabei wird die Idee verfolgt, die im Modell vorliegenden Niederschlagsflüsse vertikal aufzuentwickeln und diese als Referenz zu verwenden.

Kleinere Probleme im Zusammenhang mit dem prognostischen Niederschlag bestanden darin, dass sich die räumliche Struktur des Freisetzens der latenten Wärme leicht geändert hat. Dazu mussten Veränderungen am LHN-Verfahren, z.B. am Suchalgorithmus vorgenommen werden.

Aktuell wird mit einem LHN-Algorithmus gearbeitet, der die vertikal aufintegrierten Niederschlagsflüsse als Referenzniederschlag benutzt. Diese Version zeigt nach den bisherigen Untersuchungen die besten Assimilations- und Vorhersageergebnisse.

4.1.5 Fallstudien zum Latent Heat Nudging

Während der Entwicklung des „Latent Heat Nudging“ wurden immer wieder Fallstudien mit dem LM bzw. später mit dem LMK gerechnet, um den jeweiligen Entwicklungsstand des LHN und speziell dessen Einfluss auf die freie Vorhersage bewerten zu können. Anfangs wurden einige der Fälle aus dem Katalog der 28 RADVOR-OP-Ereignisse unter Verwendung des LHN-Verfahrens nachgerechnet. Dabei wurden aber noch die PI-Radardaten verwendet. In der Zwischenzeit wurde das LHN auf das alle fünf Minuten verfügbare DX-Komposit umgestellt. Bedingt durch die Tatsache, dass für die RADVOR-OP-Ereignisse Radardaten in diesem Format erst innerhalb des 1. Quartals 2005 verfügbar waren, wurden hauptsächlich Fallstudien mit DX-Daten des Jahres 2004 gerechnet. Ein weiterer Grund der zur Verzögerung beim „Nachrechnen“ der RADVOR-OP-Ereignisse geführt hat, waren die Probleme, die im Zusammenhang mit der Verwendung des prognostischen Niederschlags aufgetreten sind (siehe Abschnitt 4.1.4). Somit konnten die Arbeiten zur systematischen

Simulation der RADVOR-OP-Ereignisse erst mit Beginn des 3. Quartals 2005 aufgenommen werden. An dieser Stelle sollte noch bemerkt werden, dass von den RADVOR-OP-Ereignissen nur die Fälle ab 01.01.2002 (also ab Ereignis 13) mit dem LMK nachgerechnet werden können. Dies liegt daran, dass es aus heutiger Sicht nur sinnvoll erscheint LMK-Simulationen mit prognostischem Niederschlag durchzuführen. Voraussetzung dafür aber ist, dass die antreibenden Modelle GME und das dort hinein genestete LM, in das dann schließlich das LMK genestet wird, die prognostische Größe „Wolkeneis“ enthalten. Diese Größe wurde in GME und LM erst am 16.9.2003 operationell eingeführt. Für Ereignisse, die vor diesem Datum liegen, müssen deshalb rechenaufwändige Reanalysen sowohl für GME als auch LM durchgeführt werden, die die Variable Wolkeneis enthalten. Um den Rechenaufwand nicht zu groß werden zu lassen, wurde entschieden, nur das Jahr 2002 mit Wolkeneis nachzurechnen. Damit bleiben aber mit immer noch 16 RADVOR-OP-Ereignissen genügend Fälle, um das LHN-Verfahren eingehend anhand interessanter Niederschlagsereignisse testen zu können. Zusätzlich werden im Rahmen der Entwicklung des LMK so genannte Testsuiten gerechnet, die längere, interessante Zeiträume der Jahre 2004 und 2005 beinhalten.

Da aufgrund der oben genannten Verzögerungen Ergebnisse zu den RADVOR-OP-Ereignissen noch nicht vorliegen, soll jetzt der aktuelle Entwicklungsstand des LMK und speziell der des verwendeten Assimilationsverfahrens „Latent Heat Nudging“ anhand einer 10-tägigen Testperiode aus dem Juli 2004 dargestellt werden. Innerhalb des Zeitraums vom 07.-16.07.2004 war die synoptische Situation in Deutschland geprägt durch das Auftreten von Gewitterlagen, die teilweise im Zusammenhang mit Kaltfronten standen, die aber auch in Form von einzelnen Superzellengewittern auftraten. Durch dieses vermehrte Auftreten von Niederschlag, sowohl konvektiver als auch frontaler Art, ist dieser Zeitraum für eine Untersuchung des LHN-Verfahrens prädestiniert. Während der genannten Periode wurde ein kontinuierlicher Assimilationszyklus mit dem LMK gerechnet. Dabei wurde das LHN-Verfahren in Verbindung mit dem konventionellen Nudging verwendet. Entsprechend der für die RADVOR-OP-Ereignisse geplanten Konfiguration wurde das LMK in das LM genestet. Das operationelle LMK wird später in das seit Ende September 2005 operationelle LME genestet werden. Das LMK wurde für die Testperiode folgendermaßen aufgesetzt: Die horizontale Gitterweite beträgt 2,8 km, das Modellgebiet umfasst 421 Gitterpunkte in W-E-Richtung und 461 Gitterpunkte in N-S-Richtung, das Modell rechnet mit 50 vertikalen Schichten und es wurde eine Parametrisierung für flache Konvektion verwendet. Spezielle Einstellungen des LHN-Verfahrens sind: Als Referenzniederschlag dient der vertikal integrierte Niederschlagsfluss, die vertikalen Profile der latenten Erwärmungsrate werden gefiltert, weder die Eingangsdaten noch die Temperaturinkremente werden horizontal geglättet und die Feuchteadjustierung ist eingeschaltet. Zu den Terminen 00 UTC, 12 UTC und 18 UTC wurden ausgehend vom LMK-Assimilationszyklus 18-stündige freie Vorhersagen gestartet.

Exemplarisch werden im Folgenden die 18-UTC-Vorhersage vom 14. Juli 2004 und die 12-UTC-Vorhersage vom 17. Juli 2004 genauer dargestellt. Abbildung 4.6 zeigt die Stundenwerte des Niederschlags für verschiedene Stunden am 14. Juli 2004 über einem Ausschnitt des LMK-Modellgebiets. In der ersten Reihe (Abb. 4.6a) ist die Niederschlagsverteilung in der letzten Stunde der LHN-Assimilation dargestellt: Aus Radarmessungen berechnete Stundenwerte (links), im LHN-Nudging-Lauf simulierte Werte (Mitte) und im Kontrolllauf simulierte Niederschlagshöhen (rechts). Der Kontrolllauf ist in

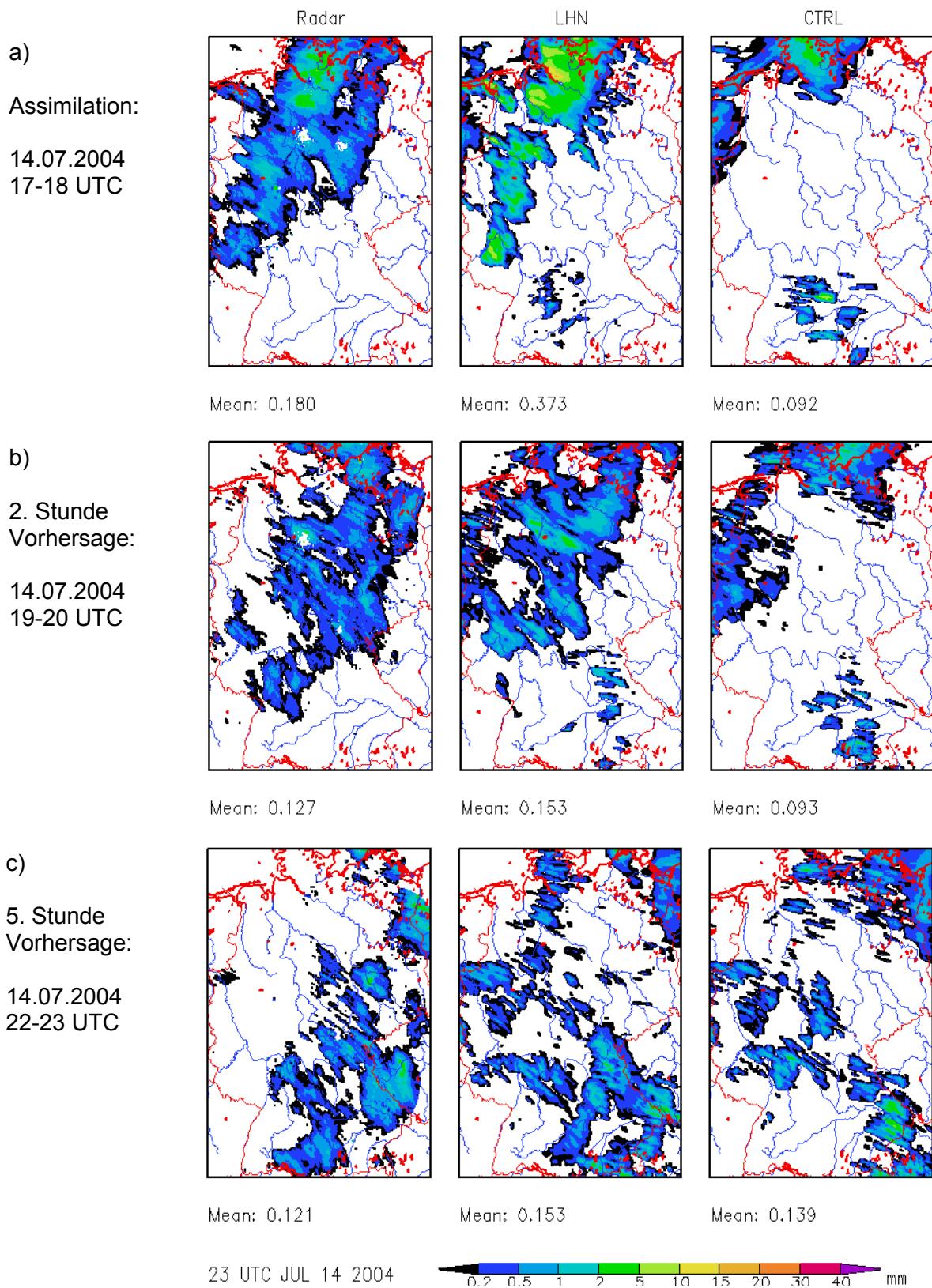


Abbildung 4.6: Stundenwerte des Niederschlags in mm am 14.07.2004, Assimilation: 17-18 UTC (a), 2. Stunde der Vorhersage: 19-20 UTC (b), 5. Stunde der Vorhersage: 22-23 UTC (c), jeweils 1. Spalte: Radar, 2. Spalte: LHN-Lauf, 3. Spalte: Kontrolllauf.

diesem Fall ebenfalls ein LMK-Lauf, bei dem allerdings nur konventionelle Daten assimiliert werden. Im Tagesverlauf des 14. Juli 2004 verlagerte sich das Frontensystem eines bei Island liegenden Tiefs zügig ostwärts. Das dazugehörige Niederschlagsgebiet erreichte in den Nachmittagsstunden den Nordwesten Deutschlands und hatte in den Abendstunden bereits den Südosten Deutschlands erfasst. Zum Analysentermin (Abb. 4.6a) erkennt man, dass die vom Radar vorgegebenen Messungen (links) größtenteils in den LHN-Laum (Mitte) assimiliert werden konnten. Dabei ist das assimilierte Niederschlagsgebiet in seiner horizontalen Ausdehnung etwas zu klein. Andererseits sind die Niederschlagsintensitäten innerhalb dieses Gebiets etwas höher als in den Radarmessungen. Deutlich weniger Niederschlag zeigt zu diesem Zeitpunkt der Kontrolllauf (rechts). In der 2. Stunde der Vorhersage stimmen die Niederschlagsmuster von Radar und LHN-Laum nach wie vor besser überein als die von Kontrolllauf und Radar. Vor allem in den Bereichen Niedersachsen, Hessen und Rheinland-Pfalz fehlen die zum Frontensystem gehörenden Niederschlagsgebiete fast vollständig im Kontrolllauf (siehe Abb. 4.6b). In der fünften Vorhersagestunde von 22-23 UTC gleichen sich der LHN-Laum und der Kontrolllauf immer mehr an (siehe Abb. 4.6c). Trotzdem zeigt der LHN-Laum eine etwas bessere Niederschlagsvorhersage speziell im Osten Baden-Württembergs sowie in großen Teilen Bayerns. In beiden LMK-Simulationen wird im Vergleich zum Radar zuviel Niederschlag im Nordwesten Deutschlands produziert.

Das zweite Fallbeispiel ist die 12-UTC-Vorhersage vom 17. Juli 2004. An diesem Tag kam es zunächst im Westen Deutschlands zur Bildung größerer Gewittercluster, bevor in den Abendstunden eine Squallline von Frankreich kommend auf Deutschland übergriff. In Abbildung 4.7 werden analog zur Abb. 4.6 Stundenwerte des Niederschlags für Radar, LHN-Laum und Kontrolllauf jeweils für die letzte Stunde der Assimilation, die 2. und die 5. Vorhersagestunde des 12-UTC-Laumes dargestellt. Der LHN-Laum zeigt während der Assimilation von 11-12 UTC - in Übereinstimmung mit den Radardaten - deutlich mehr Niederschlag als der Kontrolllauf. Die Muster entsprechen aber nicht vollständig denen der Radarmessung (siehe Abb. 4.7a). Die Weiterentwicklung der konvektiven Systeme während der Nachmittagsstunden wird im LHN-Laum etwas besser simuliert als im Kontrolllauf. Einen Einblick liefern die Abbildungen 4.7b und 4.7c.

Neben der rein visuellen Begutachtung der Niederschlagsfelder von Assimilation und freien Vorhersagen wird auch eine objektive Verifikation durchgeführt. Es werden unterschiedliche Maßzahlen („Scores“) wie z.B. „Equitable Threat Score“, „Frequency Bias“ oder „False Alarm Rate“ berechnet. Dafür werden die Niederschlagshöhen der Simulationen (LHN oder Kontrolle) gitterpunktsweise gegen die stündlich akkumulierten Radarniederschläge verglichen und die übliche Kontingenztabelle aufgestellt. Das geschieht räumlich integral über das Gebiet, das durch den DWD-Radarverbund abgedeckt wird und zeitlich integral über die 10-Tage-Periode vom 07.-16.07.2004. Abbildung 4.8 ist aus sechs einzelnen Abbildungen zusammengesetzt und zeigt den zeitlichen Verlauf des „Equitable Threat Score“ (ETS) für die 12-UTC-Vorhersagen des oben genannten Zeitraums für sechs verschiedene Schwellenwerte: 0,1 mm (links oben), 0,5 mm (rechts oben), 1,0 mm, 2,0 mm, 5,0 mm und 10,0 mm (rechts unten). Jede einzelne Abbildung zeigt in ihrem oberen Teil den ETS und unten die Anzahl der Gitterpunkte mit einer beobachteten (Radar-) Niederschlagshöhe oberhalb des jeweiligen Schwellenwerts. Letztere Angabe ermöglicht eine Einschätzung, ob einem ETS-Wert vertraut werden kann oder nicht. Um eine verlässliche Aussage erhalten zu können, müssen genügend Fälle „beobachtete Niederschlagsrate oberhalb Schwellenwert“ vorliegen. Zu den hier vorgelegten Graphen muss z.B. gesagt werden, dass die Anzahl der Niederschlagshöhen mit mehr als 10 mm im untersuchten Zeitraum sehr gering ist. Deswegen sollte die Abbildung

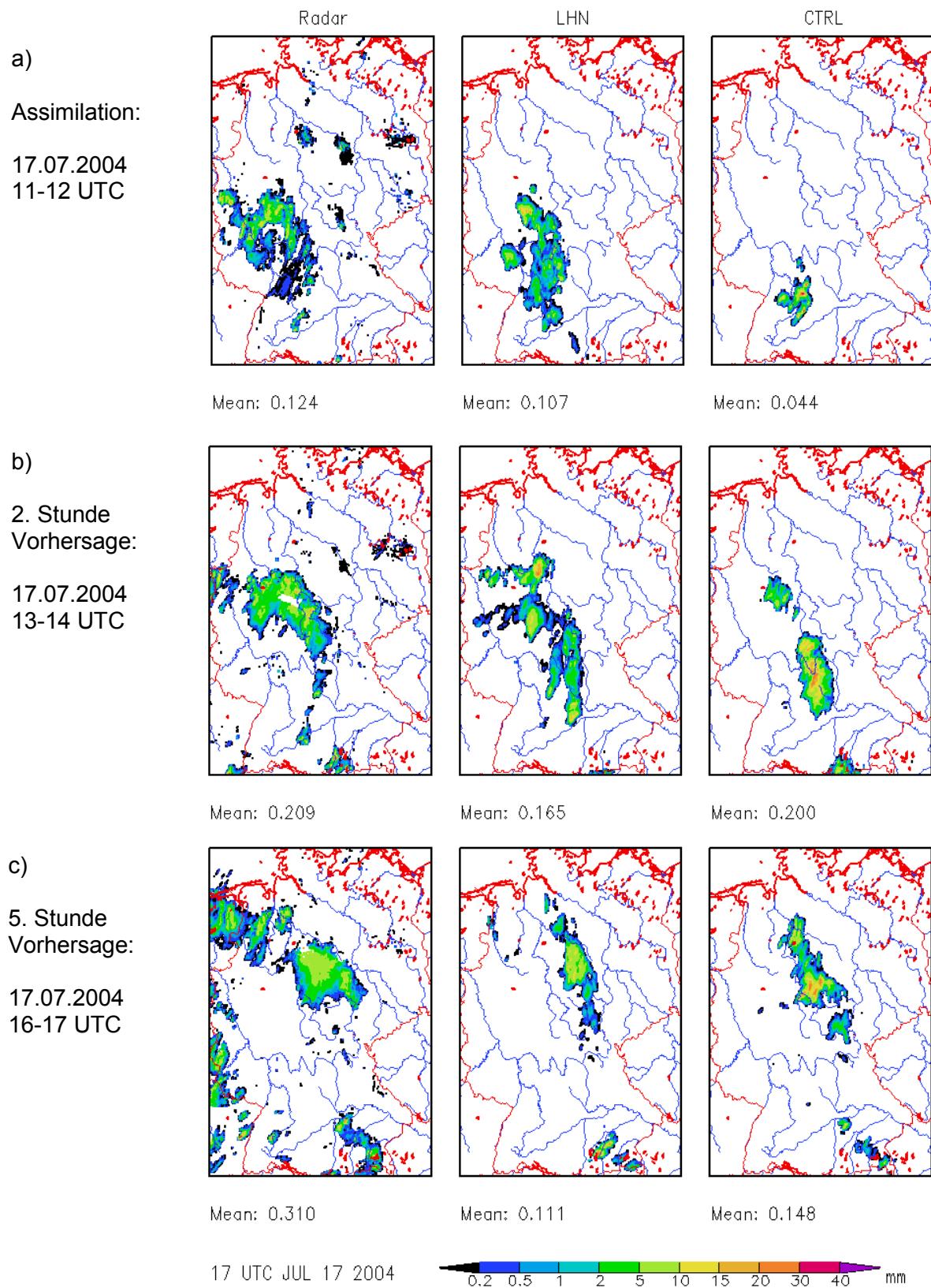


Abbildung 4.7: Stundenwerte des Niederschlags in mm am 17.07.2004, Assimilation: 11-12 UTC (a), 2. Stunde der Vorhersage: 13-14 UTC (b), 5. Stunde der Vorhersage: 16-17 UTC (c), jeweils 1. Spalte: Radar, 2. Spalte: LHN-Lauf, 3. Spalte: Kontrolllauf.

Equitable Threat Score - 12 UTC forecasts

Exp.: 5263 713

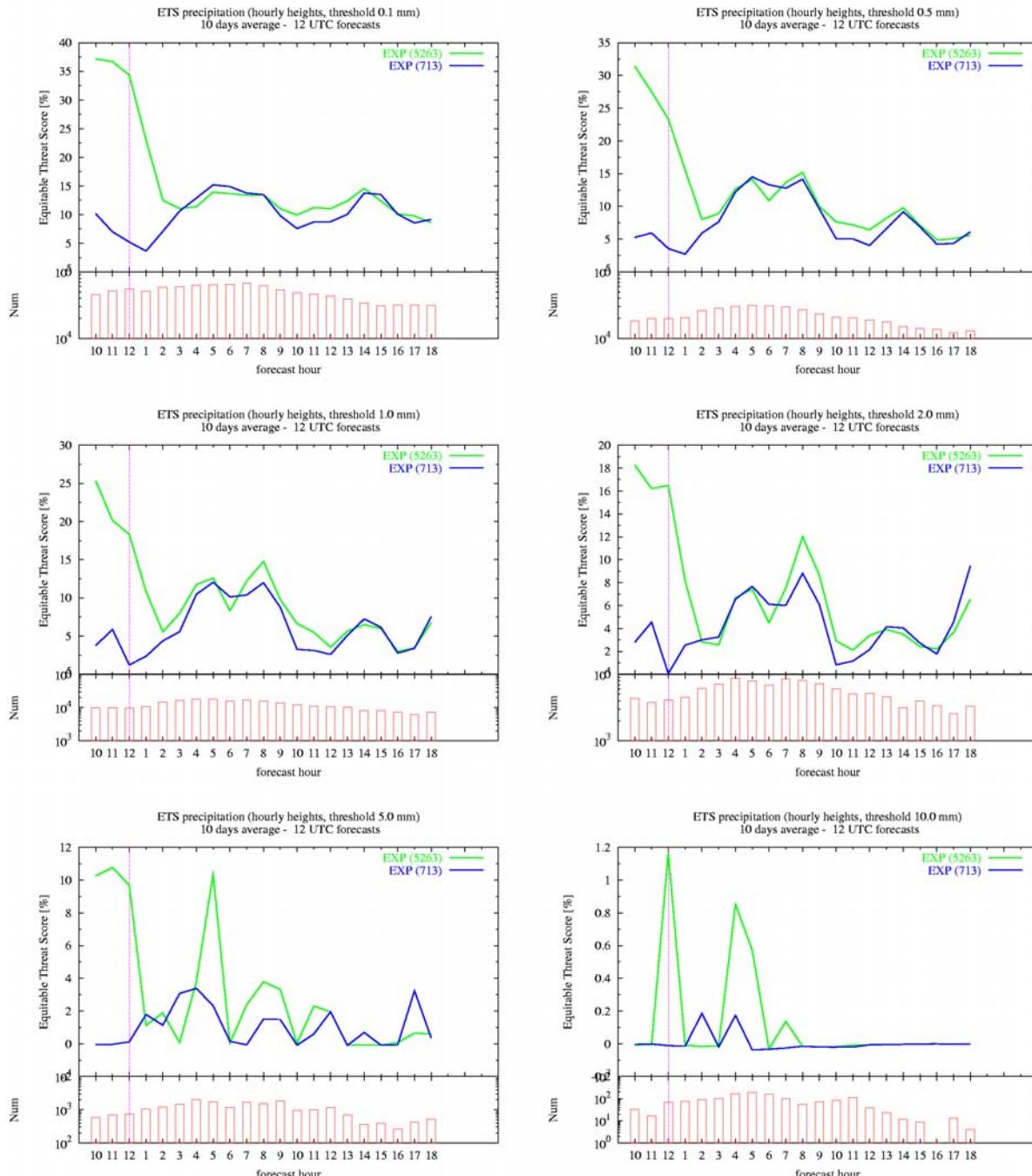


Abbildung 4.8: „Equitable Threat Score“ für die 12-UTC-Vorhersagen für 6 verschiedene Schwellenwerte der Niederschlagshöhe, gemittelt über den Zeitraum vom 07.-16.07.2004 und über dem Gebiet des DWD-Radarverbunds, Exp. 5263 ist der LHN-Lauf, Exp. 713 ist der Kontrolllauf.

rechts unten in Abb. 4.8 nicht weiter betrachtet werden. Auf den x-Achsen der sechs Abbildungen ist jeweils die Zeit aufgetragen, beginnend mit den drei letzten Stunden des Assimilationszyklus vor Vorhersagebeginn (in diesem Fall: 9-12 UTC) und nachfolgend ab der senkrechten violetten Linie mit den Vorhersagestunden. Auf der y-Achse der jeweils oberen Teilabbildung ist der ETS in % aufgetragen. Je besser die Niederschlagsvorhersage die Radarmessungen trifft, desto höher ist der Wert des ETS. Er kann einen Maximalwert von 100 % erreichen. Eine Eigenschaft des ETS ist, dass er sowohl die „richtigen“ Treffer als auch die zuviel und damit „falschen“ Vorhersagen berücksichtigt. Aus dem Verlauf der Graphen in Abb. 4.8 kann entnommen werden, dass der LHN-Lauf (Exp. 5263, grüne Kurve) im Durchschnitt über die betrachteten zehn Tage und im Mittel über das Gebiet des DWD-Radarverbunds während der ersten zwei Stunden der freien Vorhersage eine bessere Niederschlagsprognose liefert als der Kontrolllauf (Exp. 713, blaue Kurve). Dieser Gewinn an Vorhersageleistung ist dabei für die Schwellenwerte von 0,1 mm, 0,5 mm und 1,0 mm am deutlichsten und nimmt für die höheren Schwellenwerte (2,0 mm und 5,0 mm) ab.

Analog zu Abb. 4.8 zeigt 4.9 den „Frequency Bias“ (FBI). Die Balkendiagramme im unteren Bereich der sechs Teilabbildungen zeigen die gleiche Größen wie diejenigen in Abb. 4.8. Der „Frequency Bias“ setzt die Größe der Flächen, auf denen der Schwellenwert überschritten wird, von Simulationslauf und Radarbeobachtungen ins Verhältnis. Idealerweise erreicht der FBI den Wert eins. Dies geschieht genau dann, wenn sowohl der Modell-Lauf als auch die Beobachtungen auf dem Untersuchungsgebiet eine gleich große Anzahl an Gitterpunkten aufweisen, an denen der Schwellenwert überschritten wird. Die Position der Niederschlagsereignisse wird dabei nicht berücksichtigt. Aus Abb. 4.9 können drei wesentliche Aussagen abgeleitet werden. Erstens, der Kontrolllauf unterschätzt in den ersten Stunden der freien Vorhersage deutlich die Fläche der Gebiete mit Niederschlag, denn der FBI liegt deutlich unter eins. Diese Aussage gilt für alle Schwellenwerte. Zweitens ist festzuhalten, dass der FBI dann mit zunehmender Vorhersagedauer ansteigt und dabei für hohe Schwellenwerte den Wert „Eins“ auch signifikant überschreitet. Drittens zeigt sich, dass der LHN-Lauf nur kurzfristig während der Vorhersage FBI-Werte liefert, die wesentlich näher an „Eins“ liegen als die entsprechenden Werte des Kontrolllaufs. Offensichtlich kann das LHN-Verfahren nur unzureichend die „Spin-up“-Problematik des Niederschlags in den 12-UTC-Läufen des LMK beheben.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die objektive Verifikation anhand von Gütemaßen wie dem ETS den positiven Eindruck, der durch die visuelle subjektive Verifikation bereits gewonnen wurde, bestätigt. Im Durchschnitt kann während der ersten zwei Stunden der freien Vorhersage die Niederschlagsprognose mit Hilfe des LHN verbessert werden.

4.1.6 Zusammenfassung und Ausblick

Nach der zwischenzeitlichen Einführung des prognostischen Niederschlags in das LM bzw. LMK, hatten sich Probleme im Zusammenspiel von „Latent Heat Nudging“ und prognostischem Niederschlag während der Assimilation ergeben. Im wesentlichen bedingt durch die Nutzung eines veränderten Referenzniederschlags für die Berechnung des Skalierungsfaktors innerhalb des LHN-Verfahrens konnten diese Probleme aber weitgehend beseitigt bzw. umgangen werden. Somit konnten in Assimilationsexperimenten und in freien

Frequency Bias - 12 UTC forecasts

Exp.: 5263 713

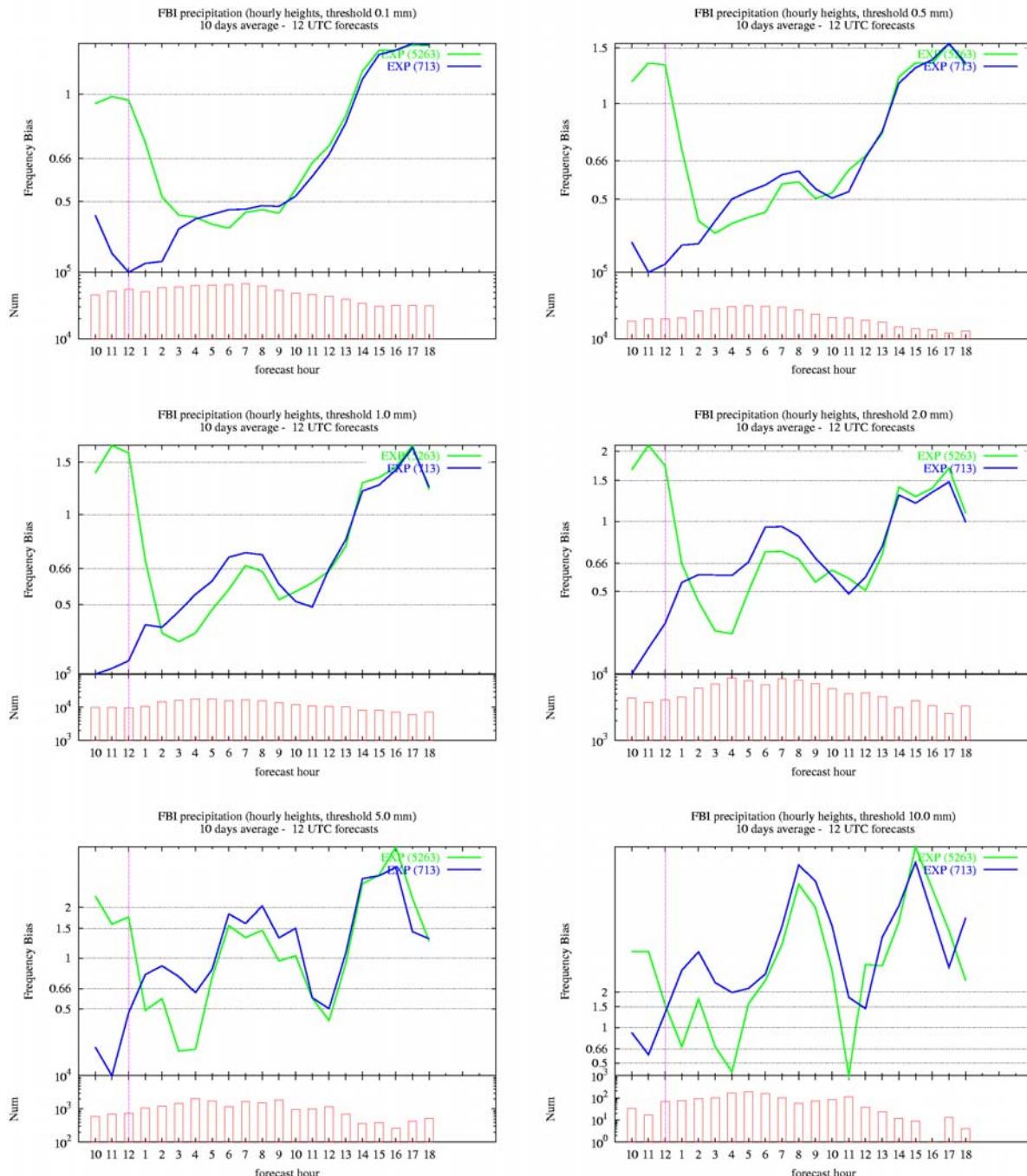


Abbildung 4.9: „Frequency Bias“ für die 12-UTC-Vorhersagen für 6 verschiedene Schwellenwerte der Niederschlagshöhe, gemittelt über den Zeitraum vom 07.-16.07.2004 und über dem Gebiet des DWD-Radarverbunds, Exp. 5263 ist der LHN-Lauf, Exp. 713 ist der Kontrolllauf.

Vorhersagen ähnlich gute Ergebnisse erzielt werden wie in Experimenten, in denen noch das diagnostische Niederschlagsschema verwendet wurde. Mit dem LHN-Verfahren ist es möglich, während der Nudging-Assimilation des LMK den mit Radargeräten beobachteten bodennahen Niederschlag zu assimilieren. Untersuchungen haben gezeigt, dass die explizite Simulation der Konvektion - unterstützt durch eine Parametrisierung flacher Konvektion - realistischere Niederschlagsmuster liefert als eine konventionelle Konvektionsparametrisierung. Prinzipiell zeigen Modellläufe mit einem feineren Gitter (2,8 km, 50 Schichten) Potenzial zur weiteren Verbesserung der Niederschlagsvorhersage gegenüber dem operationellen LM. Die zusätzliche Feuchteadjustierung während des LHN führt zu genaueren Analysen des Atmosphärenzustands und zu verbesserten freien Vorhersagen des Niederschlags. Der Einfluss des LHN hält länger an. Abschließend kann festgehalten werden, dass eine spürbare Verbesserung der Niederschlagsprognose mit Hilfe des LHN-Verfahrens durchschnittlich in den ersten zwei bis drei Stunden der Vorhersagen erreicht werden kann. Möglicherweise liegt aber auch in diesem Zeitbereich eine prinzipielle Grenze der Vorhersagbarkeit konvektiver Systeme.

Anders als in den beiden RADVOR-OP-Projektsitzungen des Jahres 2005 gezeigt, reicht der positive Effekt der Assimilation der Radarniederschlagsraten durchschnittlich nur zwei bis drei Stunden in die Vorhersage. Durch einen Fehler beim Aufsetzen der Experimente wurden noch während der ersten drei Stunden der Vorhersage im sogenannten „Nudecast“-Modus die Radardaten weiterassimiliert. Da das LMK im operationellen Betrieb einen wesentlich kürzeren Daten-Cut-Off haben wird als das operationelle LME (ungefähr $\frac{1}{2}$ Stunde anstelle von $2\frac{1}{4}$ Stunden), ist eine Nutzung von Radardaten während der ersten drei Stunden der Vorhersage absolut unrealistisch. Deswegen mussten die Vorhersageläufe und die Auswertungen für die untersuchte 10-Tage-Periode im Juli 2004 erneut gerechnet werden. Bei Nicht-Verwendung der Radardaten zu Beginn der Vorhersage ergeben sich somit die oben gezeigten Einflusszeiten der Radardaten von ungefähr zwei bis drei Stunden. Das Fallbeispiel der 18-UTC-Vorhersage vom 14. Juli 2004 zeigt für ein frontales Niederschlagsereignis einen positiven Einfluss der Radardaten während der ersten fünf Stunden. Dieser Zeitraum ist zumindest für konvektive Niederschlagsereignisse nicht repräsentativ. Allerdings kann in Einzelfällen auch ein positiver Einfluss der Radardaten über mehr als 5 Stunden nachgewiesen werden.

An dieser Stelle soll nur noch ein kurzer Ausblick auf die weiteren, im Rahmen des Projektes RADVOR-OP anstehenden, Arbeiten gegeben werden. Weitergehende bzw. allgemeine Planungen bezüglich der Entwicklung des LMK werden in Kapitel 5.1 dargestellt. Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erläutert, wurde mit der Reanalyse der RADVOR-OP-Ereignisse des Jahres 2002 begonnen. Dabei müssen sowohl eine globale (Optimale Interpolation und GME) als auch eine regionale (Nudging und LM) Assimilation durchgeführt werden. Schliesslich wird dann in das LM ein LMK genestet, das wiederum während seines Assimilationslaufes die Radardaten mit Hilfe des LHN-Verfahrens nutzt. Es ist geplant, die auf den LHN-Assimilationen aufsetzenden LMK-Vorhersagen im Vergleich zu den Vorhersagen des antreibenden LMs und auch zu LMK-Kontrollvorhersagen (ohne „Latent Heat Nudging“) gegen die Radarmessungen zu verifizieren.

Mögliche Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Assimilation von Radardaten sind eine Nutzung von 3D-Reflektivitäten und eine Nutzung variationell aus Radialwinden der Doppler-Radardaten abgeleiteter Windfelder (Gao et al. 2001).

4.2 Teilprojekt 2: RADAR-Nowcasting

4.2.1 Übersicht der Arbeitsschritte und zeitlicher Ablauf

Das Teilprojekt 2 „RADAR-Nowcasting“ erstellt stündliche Niederschlagsvorhersagen für die nächsten zwei Folgestunden. Als Daten-Input dienen zum einen die fünfminütlichen Radarkomposit-Daten (RZ-Daten) sowie die viertelstündlich verfügbaren PZ-Komposit-Daten (PZC) des Radarverbundes. Während die RZ-Daten quantitative Messungen des precipitation scans liefern, stellt das PZC dreidimensionale Aussagen des volume scans auf qualitativer Ebene bereit. Eine Übersicht der Datenflüsse und Modulketten ist im Flussdiagramm (vergl. Abb. 4.10) wiedergegeben.

Den Input der beiden Nowcasting-Module stellen die RZ-Daten des quantitativen Radarkomposit dar. Das sog. Modul 1 (s. Abschnitt 4.2.4) ist hierbei für eine Verlagerung rein konvektiver Ereignisse zuständig, während Modul 2 (s. Abschnitt 4.2.5) auch die stratiformen Niederschlagsfelder verlagert. Aus beiden Modulen werden über eine Stunde integrierte Vorhersagen erstellt. Die aus Modul 1 stammende Vorhersage kann aufgrund der Lebensdauer konvektiver Zellen Daten nur für die erste Stunde liefern. Modul 2 dagegen stellt auch für die zweite Vorhersagestunde Ergebnisse bereit.

Die Vorhersagen beider Module werden in einem weiteren Modul miteinander verschnitten (s. Abschnitt 4.2.6), dessen Ausgabe den Input für die Quantifizierung darstellt. Diese Quantifizierung (s. Abschnitt 4.2.7) ist eine „indirekte Aneichung“: Die auf noch nicht-an geeichten RZ-Daten basierenden Ergebnisse der Module 1 und 2 werden mit RADOLAN-Daten verknüpft, um als Output des RADAR-Nowcastings quantifizierte stündliche Vorhersagen für die nächsten beiden Folgestunden zu erhalten. Ergänzend zu den RADOLAN-Daten sollen u.a. auch Informationen aus dem PZC-Modul (vergl. Abschnitte 4.2.2 und 4.2.3) integriert werden, das Aussagen zur Charakterisierung in stratiforme und konvektive Niederschlagsfelder sowie zu deren Entwicklung macht.

In Abhängigkeit der verfügbaren Rechnerressourcen sind mindestens alle 15 Minuten aktuelle ein- und zweistündliche Radarniederschlagsvorhersagen vorgesehen. Dabei sollte sich der Beginn des Vorhersagezeitpunktes an den Messungen von RADOLAN und den automatischen Ombrometern orientieren (hh:50), um nachfolgende Verifikationen zu erleichtern.

4.2.2 Charakterisierung von Niederschlagsfeldern

Auf Grundlage dreidimensionaler, qualitativer Daten der Einzelradarstandorte (PZ-Daten) wird alle 15 Minuten ein bundesweites Komposit erstellt. Dieses sog. PZ-Komposit (PZC) umfasst eine Fläche von $1000 \text{ km} \bullet 1000 \text{ km}$ und besitzt eine Auflösung von horizontal 2 km • 2 km pro Pixel sowie vertikal von 1 km in 12 Höhenschichten. Abbildung 4.11 veranschaulicht die Ausdehnung des PZ-Komposit (gelbe Fläche) im Vergleich zum DXC (roter Rahmen) sowie die zur quantitativen Niederschlagsbestimmung genutzten Messradien von 125 km um jeden Standort des DWD-Radarverbundes.

Der gewählte Ansatz zur Charakterisierung von Niederschlagsfeldern verfolgt zunächst eine Identifikation von Niederschlagsgebieten bereits ab geringer Intensität. Hierbei werden

RADVOR-OP Teilprojekt RADAR-Nowcasting

Prozesskette der modularen Radar-Niederschlagsvorhersage

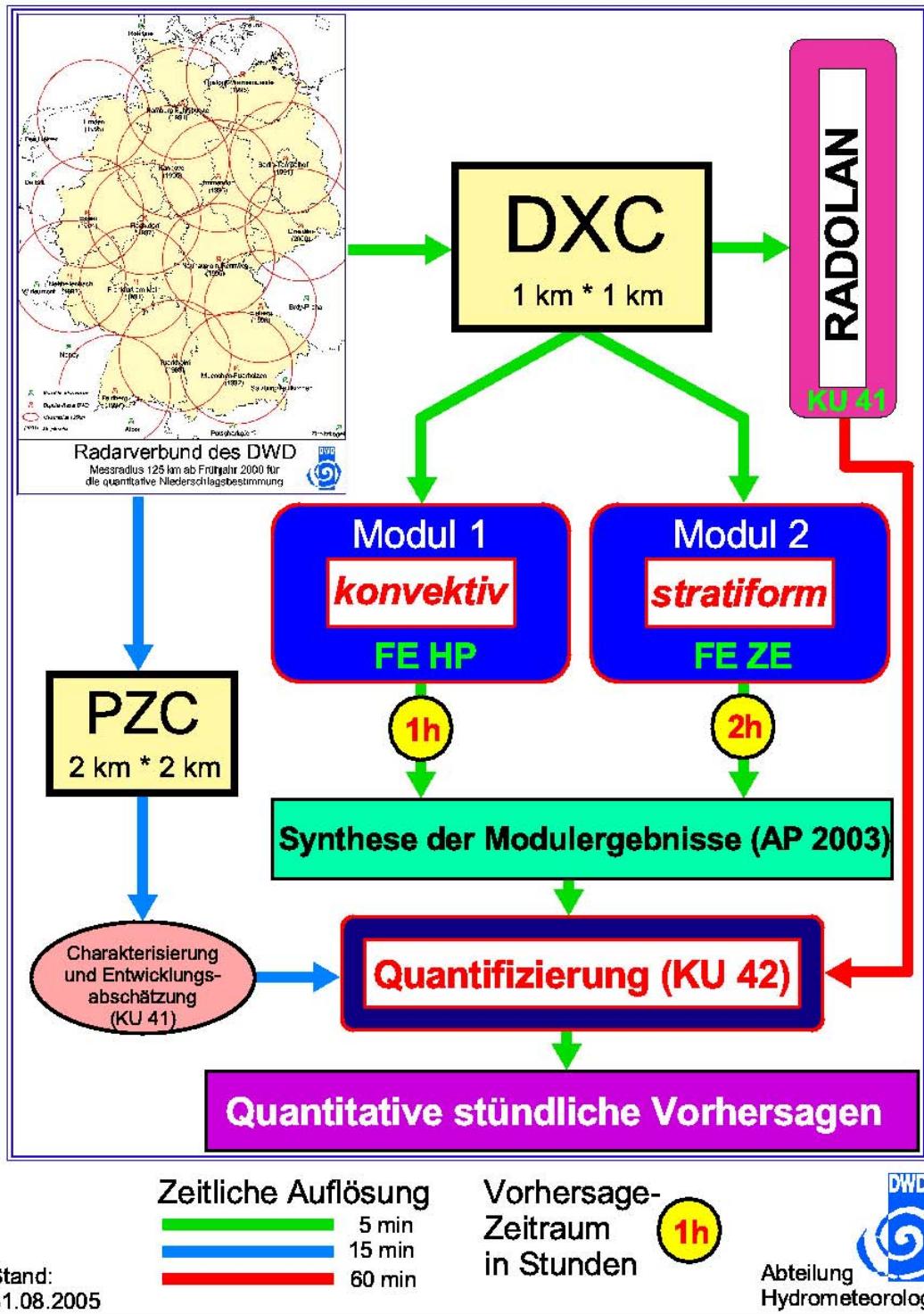


Abb. 4.10: Datenflüsse und Module im Teilprojekt 2 „RADAR-Nowcasting“

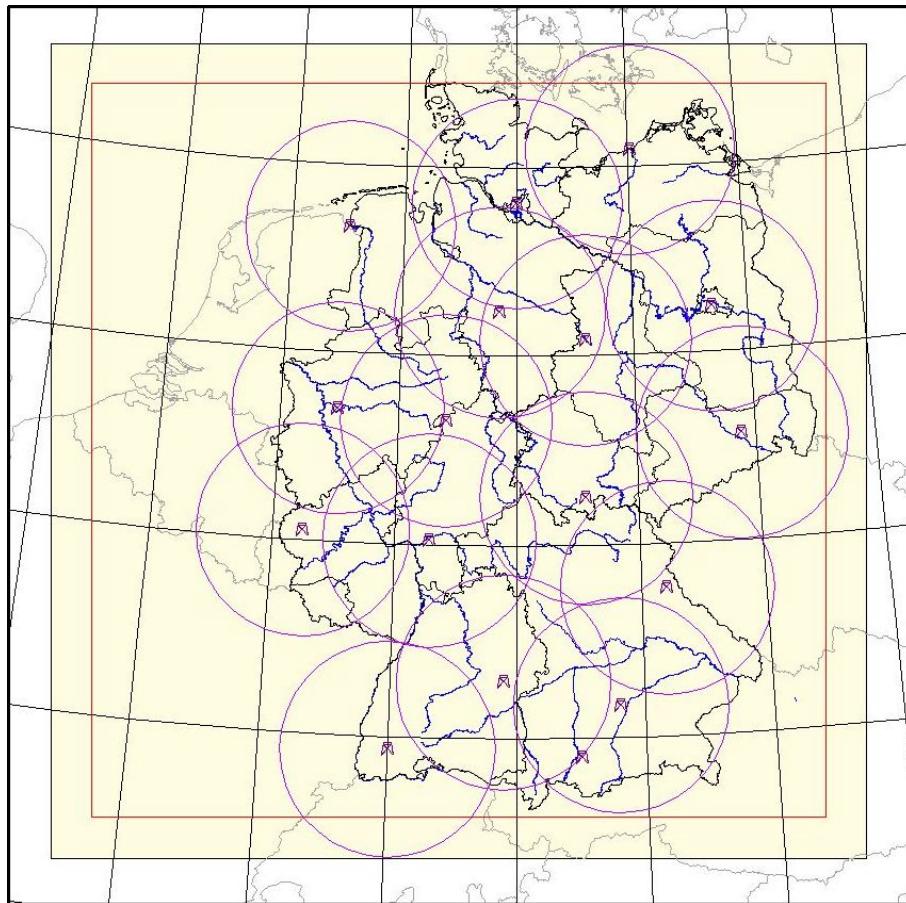


Abbildung 4.11: Horizontale Erstreckung von PZ-Komposit (gelbe Fläche), DX-Komposit (roter Rahmen) sowie die 125 km-Messradien der Radarstandorte für die quantitative Niederschlagsbestimmung

sowohl die Ausdehnung der Felder als auch die auftretenden horizontalen und vertikalen Gradienten der in 6 Klassen vorliegenden 12 Höhenschichten des PZC berücksichtigt. Um einen für das Gesamtgebiet einheitlichen Algorithmus zu verwenden, werden allerdings Daten der untersten Ebene (1 km-Höhenschicht) nicht verwendet, sodass nur die 11 Schichten ab 2 km Höhe berücksichtigt werden. Die unterste 1km-Schicht liefert aufgrund der Höhenlage einiger Radarstandorte und bedingt durch den Elevationswinkel der Radarsignale in radarfernen Bereichen ein zu lückenhafes Bild. In Abbildung 4.12 ist deutlich die in 1 km Höhe geringere Ausdehnung der Niederschlagsfelder verglichen mit 2 km zu erkennen.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden verschiedene Algorithmen getestet. Der letztendlich verwendete Algorithmus integriert unter besonderer Berücksichtigung der 2 km-Schicht – diese muss mindestens Klasse 4 (≥ 37 dBZ, vergl. Abb. 4.13) aufweisen – über 11 Höhenschichten die Klassenwerte und weist unter einem empirischen Schwellenwert liegende Flächen als stratiform und darüber liegende als konvektiv aus. Isolierte Einzelpixel, die in der untersten verwendeten Schicht (2 km Höhe) die geringste Intensitätsstufe (bis 7 dBZ) nicht überschreiten,) werden hierbei nicht berücksichtigt. Durch diese integrative Vorgehensweise von 11 Datensätzen wird erreicht, dass eine mögliche Fehlinterpretation von Falschechos einzelner Höhenschichten weitgehend minimiert werden kann. Abb. 4.14 zeigt ein Beispiel

der Charakterisierung sowie die zu Grunde liegende Aufsummierung der Klassenwerte von 2 bis 12 km Höhe für den 12.08.2002, 12:00 UTC.

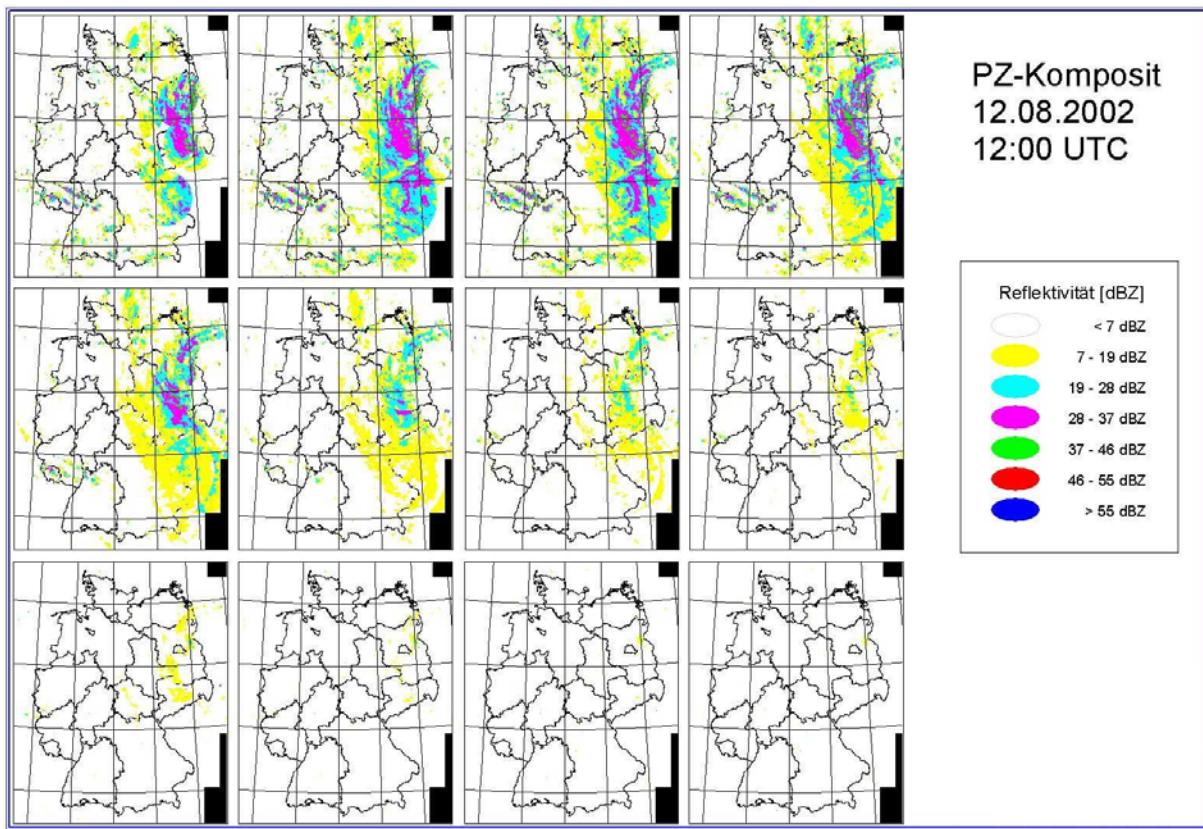


Abb. 4.12: PZ-Komposit vom 12.08.2002, 12:00 UTC; alle 12 Höhenschichten von 1 km bis 12 km (Höhe zunehmend von links nach rechts bzw. oben nach unten)

Echostärke	<u>dBZ</u>	<u>mm/h</u>	Niederschlag
	55	150	extrem
	46	35	sehr stark
	37	8,1	stark
	28	1,9	mäßig
	19	0,6	leicht
	7	0,04	sehr leicht

Abb. 4.13: Klasseneinteilung des PZ-Komposit

Die ursprünglich der Charakterisierung zugesetzte Aufgabe der Ansteuerung der einzelnen Nowcasting-Module wurde aus fachlichen Gründen während der Projektlaufzeit geändert. Diese Steuerung übernimmt nunmehr ein Merge-Programm (s. Abschnitt 4.2.6) insofern, als dass die einzelnen eigenständigen Ergebnisse des stratiform und des konvektiv verlagernden Moduls von diesem verschnitten werden. Durch diese Änderung der Aufgabenstellung kann für zukünftige Arbeiten auf eine strikte Einteilung in nur zwei – bzw. eine der Module entsprechenden Anzahl von – Klassen abgesehen werden, wodurch insbesondere für die auf

der Charakterisierung basierende Niederschlagsentwicklung (s. Abschnitt 4.2.3) ein anderer Dateninput – und somit eine andere Aufgabenstellung – zukommen kann.

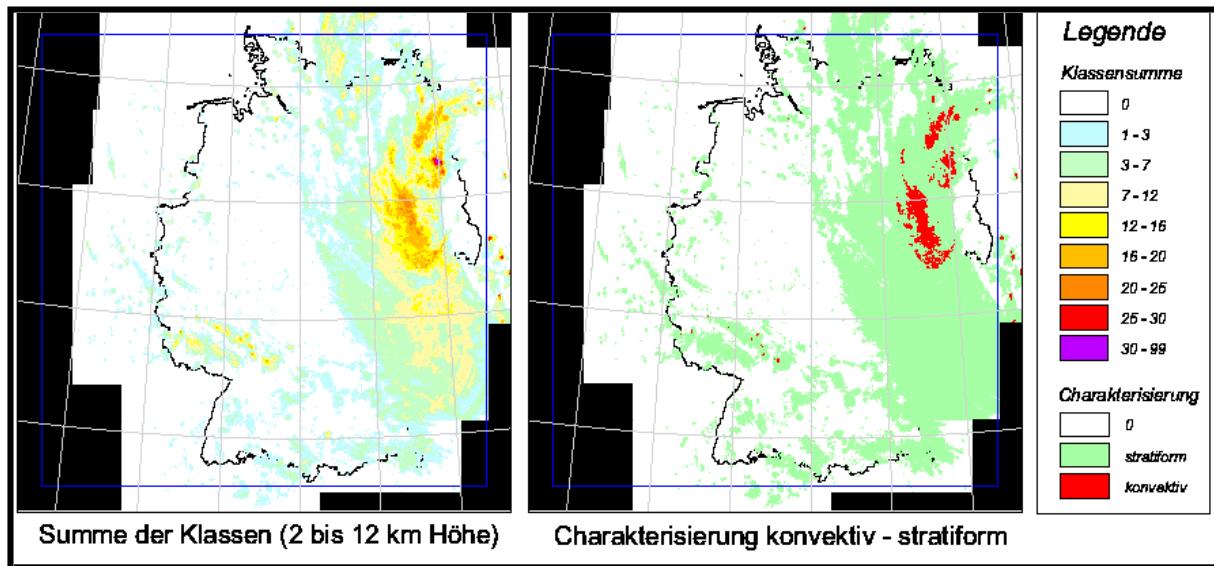


Abb. 4.14: Beispiel der Charakterisierung für den 12.08.2002, 12:00 UTC; links: die Summe der Klassenwerte von 2 bis 12 km Höhe, rechts: die daraus abgeleitete Einstufung in konvektiv bzw. stratiform

Als erstes Verbesserungspotential sollte die Erweiterung der Klassenanzahl des PZ-Kompositos von derzeit sechs auf 16 oder mehr in Betracht gezogen werden. Zusätzlich wäre es sinnvoll zu überprüfen, inwieweit eine höhere räumliche und vertikale Auflösung fachlich gerechtfertigt und realisierbar ist. Verbesserungen des Dateninputs würden sowohl der Charakterisierung, v.a. aber der Niederschlagsentwicklung – und hier insbesondere der Entwicklung konvektiver Zellen – zu Gute kommen.

4.2.3 Entwicklung von Niederschlagsfeldern

Die Niederschlagsentwicklung auf Basis des dreidimensionalen Radarproduktes - den sog. PZC-Daten - schließt sich an die zuvor beschriebene Niederschlagscharakterisierung an. Sie berücksichtigt demnach sowohl konvektive als auch stratiforme Niederschlagsfelder.

Eine Tendenzabschätzung der möglichen Entwicklung rein konvektiver Zellen wurde nach vieljährigen Arbeiten bereits im KONRAD-Verfahren realisiert, das als Datengrundlage das fünfminütlich erzeugte PX-Produkt nutzt. Ein KONRAD-ähnliches Verlagerungsprogramm auf Basis des PZ-Kompositos wurde im DWD bereits vor einigen Jahren entwickelt. Resultate hieraus wurden bisher nicht weiter genutzt, so dass keine Erfahrungen über seinen Nutzen im operationellen Einsatz vorliegen. Problematisch wäre zudem gewesen, dass dieses Programm nur mittels der inzwischen durch NinJo ersetzen MAP-Software einsetzbar ist. Da die Verlagerung im RADAR-Nowcasting auf Basis des zeitlich und räumlich höher aufgelösten DX-Kompositos (DXC) erfolgt, wurde von einer Verwendung und Weiterentwicklung dieses PZC-KONRAD-Verfahrens abgesehen.

Für die Niederschlagsentwicklung wurde ein anderer Ansatz gewählt, weil mit dem KONRAD-Verfahren bereits die Entwicklung rein konvektiver Zellen realisiert wurde, und zudem das PZ-Komposit im Gegensatz zu den DX-Daten nur alle 15 Minuten zur Verfügung steht. Hierfür spricht insbesondere die durchschnittliche Lebensdauer von Gewitterzellen in Deutschland von ca. 30 Minuten. Diese lässt es fachlich als nicht sinnvoll erscheinen, allein auf Basis viertelstündlicher qualitativer Daten - in sechs recht grobe Klassen eingeteilt (s. Abschnitt 4.2.2) - einzelne Zellentwicklungen quantitativ abzuschätzen oder gar Prognosen zu wagen. Einen weiteren Grund stellt auch die unterschiedliche Zeitskala stratiformer und konvektiver Ereignisse dar, deren Entwicklungen beide berücksichtigt werden sollen.

Diese allgemeine Niederschlagsentwicklung basiert auf PZC-Daten und der daraus abgeleiteten Niederschlagscharakterisierung. Sie betrachtet auf einer stationären Matrix von 20 km • 20 km auf dem gesamten Gebiet des PZC die Entwicklung der letzten 30 min und klassifiziert diese nach ihrer Tendenz (s. Tab. 4.1) – differenziert nach stratiform und konvektiv.

Klasse	Klassengrenzen		Tendenz	Beschreibung
	konvektiv	stratiform		
0	0	0	+/- 0	keine Tendenz
1	1 bis 5	1 bis 10	+	leicht zunehmend
2	5 bis 10	10 bis 25	++	zunehmend
3	10 bis 100	25 bis 100	+++	stark zunehmend
4	-1 bis -5	-1 bis -10	-	leicht abnehmend
5	-5 bis -10	-10 bis -25	--	abnehmend
6	-10 bis -100	-25 bis -100	---	stark abnehmend
9	-	-	Fehler	Fehlkennung

Tab. 4.1: Klasseneinteilung der Niederschlagsentwicklung anhand PZC-Daten

Auf Grund des breiten Skalenspektrums, das die horizontale Ausdehnung von Niederschlagsfeldern aufweisen kann, wurde eine mittlere Größe der Bezugsflächen gewählt, die zum einen eine integrative Betrachtung zulässt, zum anderen aber auch noch eine flächenspezifische Differenzierung erlaubt. Die Entwicklungstendenz erfolgt rückblickend in zwei Zeitschritten, t - 15 min und t - 30 min, getrennt nach stratiform und konvektiv und klassifiziert anhand der in Tab 4.1 dargestellten Übersicht. Die jeweiligen Klassengrenzen wurden empirisch ermittelt.

Zur Veranschaulichung zeigt das in Abb. 4.15 dargestellte Ereignis vom 12. 08. 2002 die aus der halbstündlichen Differenz zum Termin 11:30 UTC an diesem Tag sich ergebende Niederschlagsentwicklung. Deutlich sind die räumlich dicht beieinander liegenden Gebiete im mittleren Elbe-Einzugsgebiet mit stark abnehmender Entwicklung und – wenige km² südwestlich davon – mit stark zunehmender Entwicklung der als konvektiv charakterisierten Niederschlagsfelder (Bild links unten in Abb. 4.15) zu erkennen.

Informationen aus der Niederschlagsentwicklung sollen zukünftig als Hilfsmittel bei der Quantifizierung dienen. So wäre ein einfacher quantitativer Zuschlag bzw. Abschlag für die zunehmenden bzw. abnehmenden Tendenzklassen als konzeptionelles Modell vorstellbar. Dieses sollte mittels Verifikationen überprüft und weiterentwickelt werden. Aus den sich daraus ergebenden neuen Anforderungen wird sich zeigen, in welche Richtung eine Weiter- oder Neuentwicklung einer PZC-basierten Niederschlagscharakterisierung gehen wird.

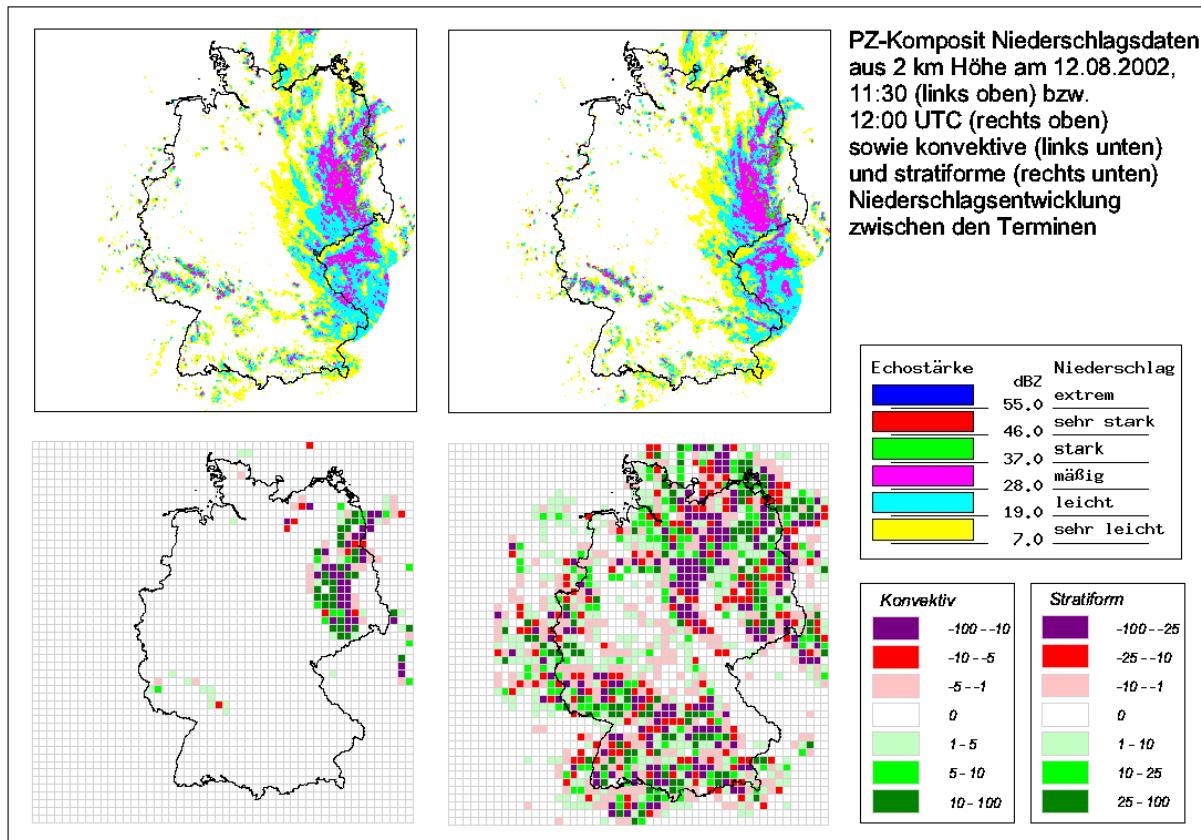


Abb. 4.15: Beispiel der Niederschlagsentwicklung für den 12.08.2002, 12:00 UTC; links oben: qualitative Niederschlagsverteilung am 12.08.2002 um 11:30 UTC in 2 km Höhe aus dem PZ-Komposit; Mitte oben: wie links oben, aber für 12:00 UTC; links unten: konvektive Niederschlagsentwicklung vom 12.08.2002, 11:30 auf 12:00 UTC; Mitte unten: wie links unten, aber stratiforme Niederschlagsentwicklung

4.2.4 Verlagerung konvektiver Niederschlagsfelder

Bei der Verlagerung von Niederschlagsfeldern ist man auf Muster und Markierungen festgelegt, die ein "Ziehen" erkennen lassen. Gegenüber großräumigen Mustern sind inselartige Schauerkerne leichter zu verfolgen.

Im stratiformen Niederschlagsprozess einer Schichtwolke oder eines Frontwolkenbandes wirkt sich eine Terrain- oder dynamische Hebung als instabile weitläufige Regenverstärkung in flachen Schichten aus und stört häufig die Auswahl potentieller Schauerkerne. Dagegen ist der starke konvektiv-labile Niederschlagsprozess ein hinreichend stabiler, kurzzeitig selbsterhaltender Vorgang, der, vertikal ausgerichtet, sich linear oder rotierend fortbewegt. Zuweilen gibt es Übergänge und Sprünge von Mutter- zu Tochterzellen an den Flanken.

Im Frontverband einer Gewitterlinie sind diese sprunghaften Übergänge offenbar häufiger und die Verlagerungen kürzer und ungeordneter.

Die Zellen und Zugbahnen in KONRAD

Bei KONRAD werden starkkonvektive Zellkerne (>46 dBZ, etwa $>23\text{mm/h}$) als engumrissene Marker benutzt, um kurzzeitig Zugbahnen und Verlagerungsvektoren zu ermitteln. Diese Verlagerungen gelten für die Kerne, berechnet aus der letzten 10min-Position und ergänzt durch die frühe Position des ersten Kontaktes. Bei Zellverschmelzungen bzw. -teilungen und bei rechtsausscherenden Zellen gelten die Zugbahnen überwiegend für diese Kernintensität.

Für RADVOR-OP wurden somit im "konvektiven Modul" nur die Niederschlagszonen prognostiziert, die mit den Zellzugbahnen unmittelbar verknüpft waren, also die zukünftig von Clustern mit aktuellen Regenraten $>23\text{mm/h}$ überstrichen würden.

Langsame Zugbahnen oder große Zellkerne können folglich zu erhöhten konvektiven Halb- oder Stundenwerten führen. Gerechnet wurde mit PZ-Werten und dem weitgehenden Ausschluß von Hagelinflüssen. Somit ergaben sich von der Zugbahn der Zellkernintensität bestimmte Streifen, ergänzt durch jeweils vor- und nachlaufende Regenintensitäten. Nicht einbezogen sind die seitlichen Flankengebiete von Zellen, da keine klare Trennung zu den Zellumgebungen wegen häufiger Übergänge zu Nachbargebieten existiert. Diese unterliegen so dem stratiformen Modul.

Die Starkregenwarnung in KONRAD

Bei der Anforderung, eine wahrscheinliche Zugbahn, kaum aber den Fortbestand des Zellkerns selbst vorhersagen zu können, entschied sich KONRAD dafür, gerade ablaufende Starkregenbedingungen früh zu lokalisieren und anzuzeigen. Dies wird unterstützt durch die Bedeutung stationärer Starkregen, wo der Erkennungsraum und der Vorhersageraum eng nebeneinander liegen (Landkreiswarnung).

Damit lag die letzte Vorhersageentscheidung beim Nutzer. Wesentlich jedoch waren, den Zeitpunkt und Ort des Starkregenbeginns als Warnung zu markieren und dies knapp vor dem Erreichen der Starkregenschwelle von $10\text{-}12\text{mm}/30\text{min}$ (garantierte Untergrenze). Den späteren Zerfall dieser Starkregenbedingungen auf Radarbasis vorherzusagen ist kaum erfolgreich.

Die Starkregenwarnung (s. Abb. 4.16) und ihre Orte gelten je Zeitschritt für 30min, am Zugbahnbeginn dann max. 1h zurückliegend. Tritt sie an gleichen Orten mehrstündig auf, rechnen die Einsatzkräfte mit dem Vielfachen der 12mm.

Natürlich sind solche Warnverfahren nicht mit dem Ziel quantitativer Prognosen zu vergleichen. Sie markieren aber Zeitpunkt und Ort für Schwellwertüberschreitungen gut.

Die konvektive Niederschlagsprognose, abgeleitet aus KONRAD (Modul 1)

Der Verfolgung flächiger, charakteristischer Niederschlagsstrukturen im überwiegend stratiformen Fall steht die Verfolgung von "roten" Zellkernen bzw. deren Mittelpunkte in KONRAD gegenüber. Dieses schnelle Warnverfahren ermittelt nur die innere Zugbahn für kommende 30min (Standard) oder 60min (regenerierende Zelle, da selbst $>1\text{h}$ alt).

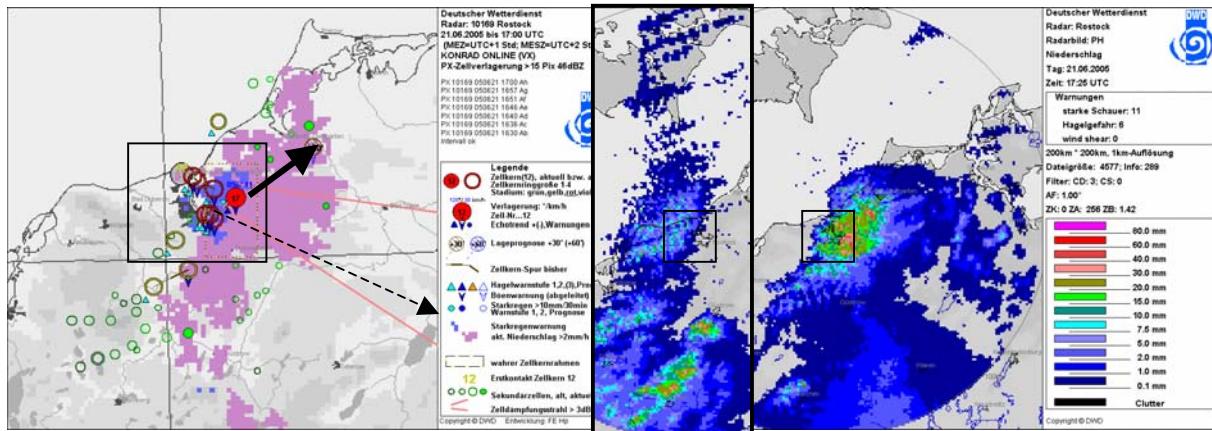


Abb. 4.16: Die konvektive Starkregenwarnung >10mm/30min (blaue Pixel, links) in KONRAD am Beispiel Rostock, 21.6.05, 17:00 UTC. Aktueller Zugbahnvektor: schwarzer Pfeil. Zum Vergleich die entsprechenden stündlichen Roh-Niederschlagswerte PH (Rahmen) bis 16:25 UTC (vorher) und plötzlich zunehmend bis 17:25 UTC (nachher).

Entlang der momentanen Zugbahn, markiert durch den aktuellen "roten" Kernrahmen und die Vorhersagespurlinie +30°, werden für Zielpunkte und deren Trajektorien die Kernintensitäten und die weiteren vorder- und rückseitigen Regenraten zu einstündigen Niederschlagswerten aufsummiert. An den Flanken links und rechts dieser Rahmenzugbahn wird keine Vorhersage erstellt, da der Zugbahnvektor sehr zellkernspezifisch ist.

Schließlich ergeben sich ein gerader Streifen der Prognosepunkte (Zellpassage) und einer der für jeden Punkt eine einstündige Trajektorie strömungsaufwärts erwartet und summiert (s. Abb. 4.17).

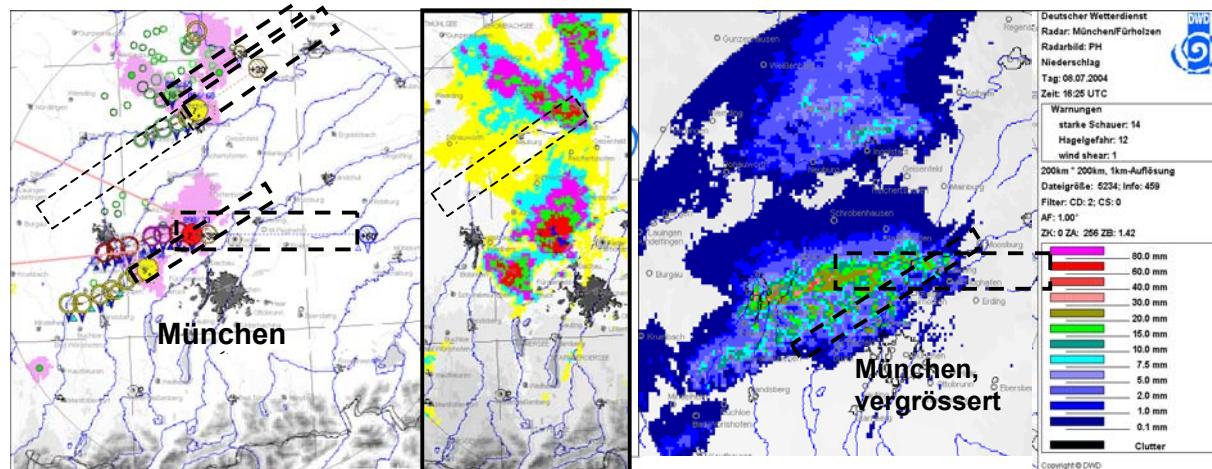


Abb. 4.17: 8.7.04, 16 UTC, München: Schema der Streifen der Prognosepunkte entlang der Zellzugbahnen auf der Basis der KONRAD-Zellvektoren. Mittlere Zelle 7 ergänzt durch den strömungsaufwärts beitragenden Streifen des aktuellen Niederschlags (Trajektorien, mittl. Bild PX). Rechts: Ausschnitt der 30min später ermittelten Rohniederschläge PH mit der eingetroffenen Verschmelzung der Zugbahnen der Zelle 7 und 9.

Der Zugvektor wird vom jüngsten 10minütigen Richtungs- und Geschwindigkeitsvektor bestimmt. Vorteilhaft ist, dass sich der Vektor direkt auf einen Kern maximaler Regenintensität bezieht.

Für isolierte Zellen böte sich ein Ausweiten der Zugstreifen auf alle "Echoschalen" der Zelle, also auf den Zellumfeldniederschlag geringerer Konvektivität an. Für Zellverbände sprechen die Niederschlagsübergänge von einer Zelle zur Nachbarzelle dagegen, womit ein Übertragen von Zugbahnen auf Zwischenbereiche als nicht sinnvoll erscheint. Auch bei KONRAD ist das Problem der Zellvektoren in Zellverbänden bzw. Gewitterfronten noch nicht abschließend gelöst.

Kreuzende Zugbahnen (Abb. 4.17) erhalten den konvektiven Niederschlagsanteil von zwei Zellen. Zellteilungen sind wegen der ändernden Zugbahnen problematisch (Abb. 4.18). Niederschlagshöhen aus anderen konvektiven Systemen mit Spitzenintensitäten unter 23mm/h als Beitrag werden in Ermangelung eines entsprechenden Verlagerungsvektors nicht angezeigt.

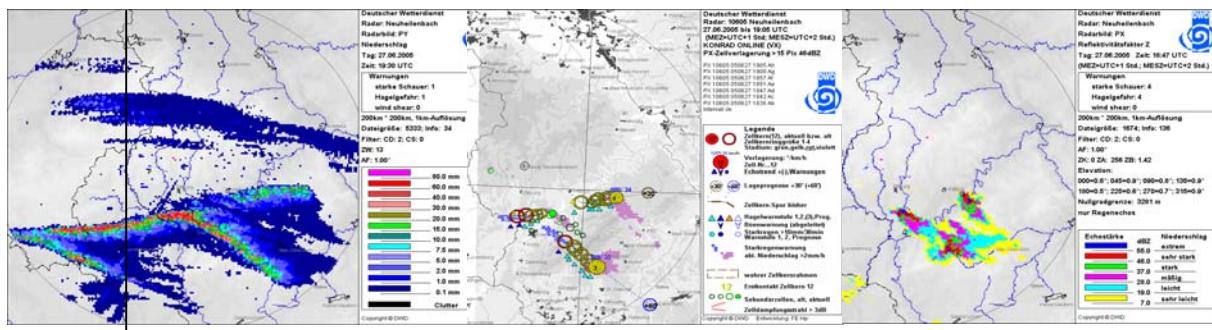


Abb. 4.18: Divergierende Zellzugbahnen mit Starkregen (Rohniederschlag PY, 13h) und -warnung. "Neuansetzende Zelle" 4, vorangehende auslaufend. Hier ist die konvektive Niederschlagsprognose auf der Basis von Trajektorien bzw. zurückverfolgter Zugbahnen problematisch.

Konvektiver Starkregen entsteht bei großen, lokal anhaltenden Zellkernen oder Mehrfachzugbahnen. Ursachen für die folgenschwerere Stationarität einer Zelle sind Zellneubildung an rückseitigen Flanken oder Berghängen. Auch sind lokale Strömungskonvergenzen zu beobachten.

KONRAD belegt auch stationäre Niederschlagsakkumulationen mit Warnungen, die zwar auf konvektiven 30min-Niederschlag, nicht aber auf Primärzellen und Vektoren zurückgehen. Hier wirkt mehr die begonnene und anhaltende Starkregenüberdeckung. Erkannte kurze Verlagerungsvektoren erbringen auch hier die richtige Prognose. Diese können aber im Umfeld größerer Strukturverlagerungen als lokale Stationarität übersehen werden. Somit sollten gerade verlangsamte Systeme besonders beobachtet werden.

Erfahrungsgemäß ergibt sich ferner die Notwendigkeit, konvektive Niederschläge (5-15mm/h) unterhalb der KONRAD-Schwelle ggf. gesondert zu verfolgen und zu prognostizieren. Sie können ebenfalls in kleinen oder größeren Gebieten fallen

(Konvergenzonen). In vielen Fällen kann ihre Verlagerung v.a. im verlangsamten Fall durch die der stratiformen Gebiete repräsentiert sein.

Bewertung der konvektiven Niederschlagsprognose auf KONRAD-Basis

Im Projekt wurde die Verlagerung konvektiver Zellen mit einem existierenden Verlagerungsvektor nach KONRAD-Muster als exemplarisch angesehen und in eine Anforderung der Hydrologie umgesetzt. Beträchtliche Niederschlagshöhen mussten einer fortlebenden Zelle zugesprochen und ihr Zugvektor musste genau einhaltbar sein (Abb. 4.19). Die momentanen Flankengradienten der Regenrate würden starke lokale Unterschiede erzeugen.

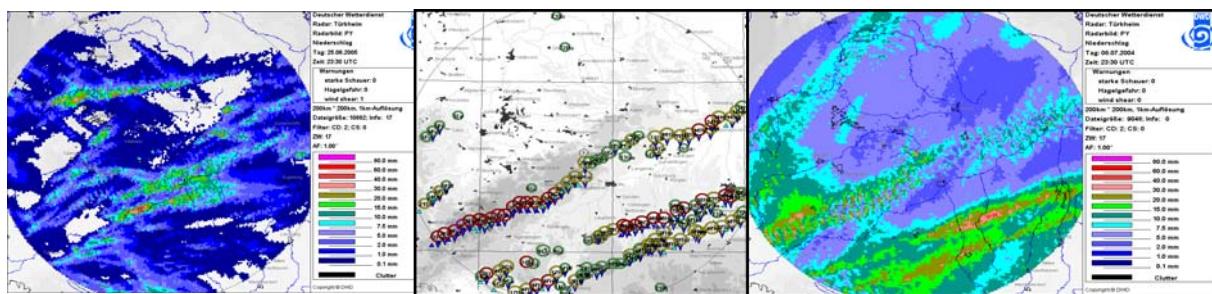


Abb. 4.19: Zugbahnen und Prognosen. Links: Die Problematik der unterschiedlich gerichteten und ein- und aussetzenden Zellzugbahnen erkennbar an den Streifen im PY-Produkt (06:30-23:30). Mitte und rechts: Beispiel der mehrstündigen, hier beständigen KONRAD-Zellzugbahnen und der entsprechenden Niederschlagsspuren im PY-Produkt vom 8.7.04 (Türkheim, KONRAD-Legende s. Abb. 4.18)

Die Summe der Unsicherheiten von Zellstadium, Zugbahn und weiterer Lebensdauer sowie Summierung ließ kaum verifizierbare Ergebnisse erwarten. Die 1h-Prognosen basierten auf der aktuellen Regenverteilung und konnten über Trajektorien mehr Proben zum Ergebnis einbeziehen als die 5min-Radarbestimmungen. Somit können nur die späteren Sammlermessungen ergänzt durch Aneichung diese Prognosegüte bewerten.

Für Beispiele Fälle wurden die konvektiven Niederschlagsakkumulationen aus Modul1 mit den anderen Prognosen der stratiformen und konvektiven Regenverteilungen des Rosenow-Verfahrens kombiniert und abgestimmt.

Die schmalen Streifen mit Prognosen starkkonvektiver Schauerzonen auf der Basis von KONRAD-Verlagerungen sind, eingebettet im Prognosefeld der restlichen Niederschläge, nicht recht überzeugend.

Eine Verifikation der beiden Module des RADAR-Nowcasting-Verfahrens wird die Vorhersagequalität für die erste Vorhersagestunde bestimmen. Möglicherweise muss dann aus fachlichen Gesichtspunkten die rein konvektive Niederschlagsvorhersage weiter verbessert werden.

4.2.5 Verlagerung stratiformer Niederschlagsfelder

Die Verlagerung der vorhandenen Niederschlagsfelder bis zwei Stunden im Voraus wird durch Übernahme der Methoden aus dem Produktpaket „Satellitenwetter“ realisiert. Diese ist eine Spezialanwendung eines beim DWD entwickelten Verfahrens zur kombinierten Assimilation von konventionellen bodengebundenen Wettermeldungen mit den Bildern der Wettersatelliten unter Einbeziehung numerischer Feldverteilungen sowie der Blitzortungsdaten und weiterer Beobachtungssysteme. Es handelt sich hierbei im Kern um eine bildorientierte Analyse bestimmter Klassen stündlich gemeldeter markanter Wettererscheinungen und Bewölkungsangaben aus SYNOP-Wetterbeobachtungen in der Geometrie des METEOSAT-Bildes in stereographischer Projektion mit 327 680 Bildpunkten und 10 km horizontaler Auflösung.

Zum Zwecke der Ableitung prognostischer Nowcasting-Aussagen in den analysierten Wetterelementen wurde ein spezielles Verfahren der Ableitung von Verlagerungsvektoren entwickelt. Diese werden bei der Satellitenwettervorhersage aus METEOSAT-IR-Bildsequenzen gewonnen und orientieren sich damit hauptsächlich an Wolkenstrukturen. Bei der Anwendung des Verfahrens auf Radarbildsequenzen war dem besonderen Charakter der nicht immer flächendeckenden Radarinformation Rechnung zu tragen.

Der Verlagerungsvektor ergibt sich prinzipiell aber ebenfalls aus der Verschiebung von Teilbildern einer zeitlichen Abfolge eines ausgewählten Radarformates (15 min Differenzen) und Bestimmung der größten Ähnlichkeit einer speziellen räumlichen Metrik (s. Abb. 4.20).

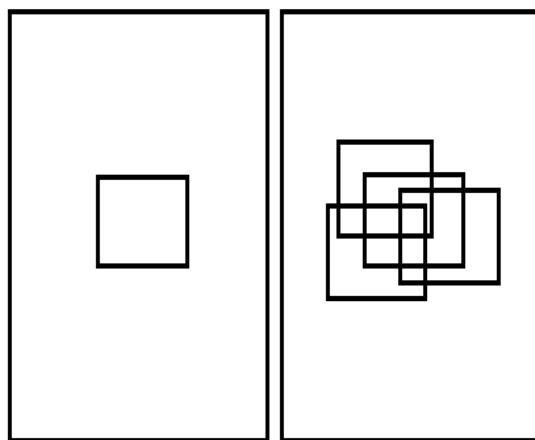


Abb. 4.20: Schema zur Ableitung ähnlicher Strukturen in Bildsequenzen

Dieses Verfahren ist seit Jahren im Einsatz und hat sich bewährt. Es wurde für die Radarverlagerung des PI- und RZ-Formats (Radarechostufen in 2 km bzw. mit einer verfeinerten Z-R-Beziehung ermittelte Niederschlagsintensitäten in 1 km Auflösung) in einer weiterentwickelten Form übernommen. Grundlage beim PI ist das qualitative internationale Radar-Komposit aus MAP (MAP-Radarkomposit). Aus Rechenzeitgründen erfolgt die Ableitung jeweils alle 40 Bildpixel (80 km). Nach einer Glättung erfolgt eine Zwischeninterpolation auf die komplette Bildmatrix von 900x900 Pixeln. Weitere Daten werden nicht verwendet. Die Vorhersage der Radarpattern erfolgt also hauptsächlich aus sich heraus (ohne Modellwinde u.ä.) und orientiert sich ausschließlich an den Radarechos. Wegen

vorhandener vertikaler Scherungen, schneller Entwicklungen und orographischer Effekte dürfte dies für die Zwecke einer Niederschlagsvorhersage auch kaum anders möglich sein.

In einer weiterentwickelten Version des Verfahrens werden PI- und RZ-Felder zur Deckung gebracht, um daraus verbesserte Verlagerungsvektoren abzuleiten. Das Verfahren ist so abgestimmt, dass entsprechend der Definition des Nowcastingzeitraumes eine Vorhersage von 2 Stunden erstellt werden kann. Wegen des Zusammenhangs von Lebensdauer und charakteristischer Größenordnung der zu verlagernden Phänomene liegt bei diesem Verfahren der Schwerpunkt auf dem Meso-β-Bereich (20-200 km). Der Scalebezug ist durch die Wahl der Größe der Teilausschnitte gegeben. Da der Meso-β-Bereich auch noch relativ breit ist, wird zur Erfassung der innerhalb dieses Bereiches charakteristischen Phänomene mit variablen Kantenlängen gearbeitet, wobei ein ausgewogenes Mittel zwischen Pixel- und Nichtpixelwerten angestrebt wird.

Nach Übertragung der Verlagerungsvektoren auf die Bildmatrix und einer räumlichen und zeitlichen Mittelung erfolgt die Berechnung der Vorhersagen nach einem Lagrangeschen Schema. Dabei besteht eine schwache Wechselwirkung zwischen den Radarverlagerungen und den Verlagerungsvektoren, die aus Satellitendaten gewonnen werden. Sowohl bei den Radarvorhersagen als auch bei der Satellitenwettervorhersage werden beide Felder von Verlagerungsvektoren verarbeitet. Die Vorhersage ist wegen der Art der Ableitung der Verlagerungsvektoren natürlich auf Radar- und Wolkenpattern beschränkt.

Sowohl bei PI als auch bei RZ erfolgt eine Filterung der Ausgangsdaten zur provisorischen Behebung bekannter Probleme. Vorgesetzte Filterungen werden damit aber nicht überflüssig.

Bei der technischen Realisierung werden bei PI 8 Einzelbilder im Abstand von je 15 Minuten erzeugt. Die Prozedur wiederholt sich alle 15 Minuten. Bei RZ werden jeweils 12 Einzelvorhersagen in Schritten von 5 Minuten erzeugt (Ausgabe in Schritten von 10 Minuten), was sich alle 5 Minuten wiederholt. Das Ergebnis sind Einzelfiles im PI- bzw. RZ-Format: Im Format der Germany-Karte (ca. 900 m Auflösung), im TRIVIS-Format (ausgehend von PI) und in diversen bildorientierten Grafikformaten (GIF und BMP), die zu Radarfilmen zusammengesetzt und als kompaktes animiertes GIF bereitgestellt werden. Diese können mittels eines HTML-Scripts mit eingeblendetem Hintergrund und automatischer Aktualisierung visualisiert werden oder an andere Grafiksysteme (z.B. JavaMap) übergeben werden. Der Informationsgehalt eines solchen Films liegt bei ca. 10 MByte, seine Filegröße bei ca. 200 kByte. Externe Grafiksysteme (wie z.B. TRIVIS) erzeugen auch einen eigenen Film.

Zur vollständigen Abdeckung des Deutschlandausschnitts sollte das Ausgangs-Radarbild ca. 200-300 km über den Rand des darzustellenden Ausschnitts hinausreichen. Dies ist beim MAP-Radarkomposit nach W und S gewährleistet. Im E ist es eher knapp und im N (Nord- und Ostsee) nicht gewährleistet. Bei den quantitativen Radarformaten (z.B. DX, DH usw.) ist dies ebenfalls nicht gewährleistet. Von der räumlichen Erstreckung sowie der räumlichen und zeitlichen Auflösung her sollte das MAP-Radarkomposit (PI) und dessen Verlagerung also stets mit herangezogen werden.

Beim GIF-Format und bei den daraus produzierten Filmen wird hinsichtlich der Intensitätsstufen eine (an das Satellitenwetter angelehnte Vereinfachung) vorgenommen. Es sind jedoch noch keine bodengestützten Beobachtungen oder Messdaten eingearbeitet (weder bei PI noch bei RZ), sodass sich diese Intensitätsstufen nicht immer mit der tatsächlichen Niederschlagsintensität treffen. Es besteht daher ein dringender Bedarf, vorhandene Niederschlags-Analyseschemata an die Nowcasting-Radarvorhersage anzupassen.

Unabhängig davon sind innerhalb des 2h-Vorhersagelaufs natürlich Änderungen der Niederschlagsintensität durch Vertikalbewegung, orographische Effekte oder Konvektion zu beachten. Zur Lösung dieses Problems sollten vermutlich die Parametrisierungsmodule (zusammen mit dem Masse- und Windfeld) aus der NWV herausgelöst werden und in einer 1D-Variante gerechnet werden. Wegen der Plötzlichkeit bestimmter Entwicklungen ist es schwer vorstellbar, "on demand" ein komplettes NWV-Modell zu rechnen. Hinzu kommen auch noch die Einschwingprobleme.

Das vorliegende Ergebnis kann einigermaßen gut die Verlagerung von Pattern - auch konvektiven (!) erfassen. Die bisherigen operationellen Läufe sind mit den RZ-Daten vorgenommen worden. Angaben zu quantitativen Niederschlagsraten sind also als Schätzung anzusehen. Die Online-Aneichung von fünf-minütlichen Radardaten ist ein separater Arbeitspunkt. Dennoch sind die Ergebnisse schon sehr sinnvoll im Warnmanagement einsetzbar. Bei Konvektion können Neubildungen mit einem Extrapolationsverfahren natürlich nicht erfasst werden.

Als Beispiel einer vorhergesagten Niederschlagsverteilung bis zwei Stunden im Voraus soll die Hochwasserlage in Bayern am 10./11. Juli 2005 dienen. In Abb.4.21 ist die aus den Einzelvorhersagen integrierte einstündige Niederschlagshöhe von 06 UTC bis 07 UTC des 11. Juli 2005 dargestellt.

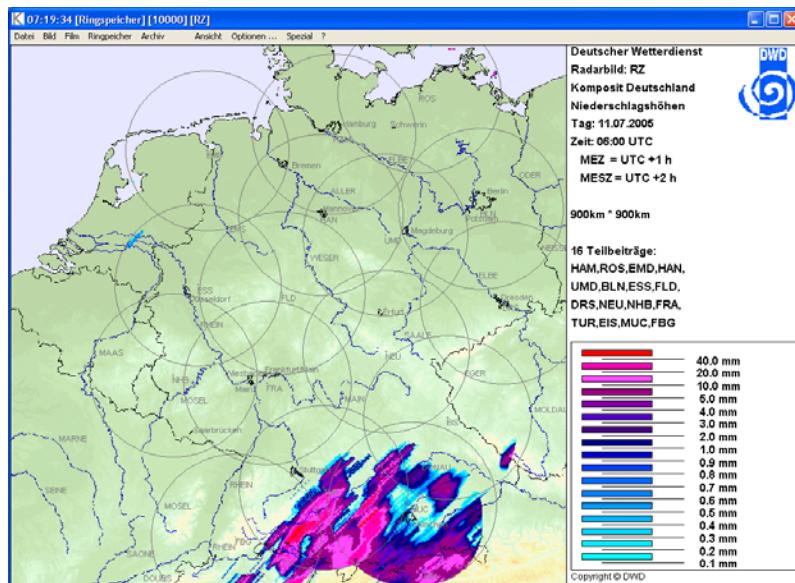


Abb. 4.21: Vorhersage der 1h-Niederschlagshöhe am 11.07.2005 um 06 Uhr UTC

Umgesetzt in Landkreiswarnungen für die erste Vorhersagestunde mit einem Schwellenwert von 2 mm/h als mittlerem Gebietsniederschlag ergeben sich die in Tab. 4.2 aufgeführten Werte (RS = Gesamtniederschlag für den Landkreis in 10^6 l/h).

Landkreis	Länge	Breite	Beginn	RR [mm/h]	RS [10^6 l/h]	Ende
Konstanz	8.55	47.48		3.0	2 535	
Augsburg	10.43	48.21		4.9	5 022	
Sigmaringen	9.15	48.02		7.4	8 561	
Unterallgäu	10.22	48.02		3.0	3 450	
Bodenseekreis	9.25	47.44		2.2	1 400	
Landkreis	Länge	Breite	Beginn	RR [mm/h]	RS [10^6 l/h]	Ende
Konstanz	8.55	47.48		5.2	4 373	
Günzburg	10.23	48.21		2.0	1 475	
Unterallgäu	10.22	48.02		4.8	5 624	
Bodenseekreis	9.25	47.44		2.4	1 522	
Oberallgäu	10.15	47.36		2.6	3 840	

Tab. 4.2: Vorhersage der 1h- und 2h-Niederschlagshöhen für den 11.07.2005, von 06 bis 07 UTC bzw. von 07 bis 08 UTC für Landkreise

Die für die zweite Vorhersagestunde ermittelten Ergebnisse sind graphisch in der Abb. 4.22 dargestellt sowie - analog der ersten Vorhersagestunde - tabellarisch in der Tab. 4.2 integriert.

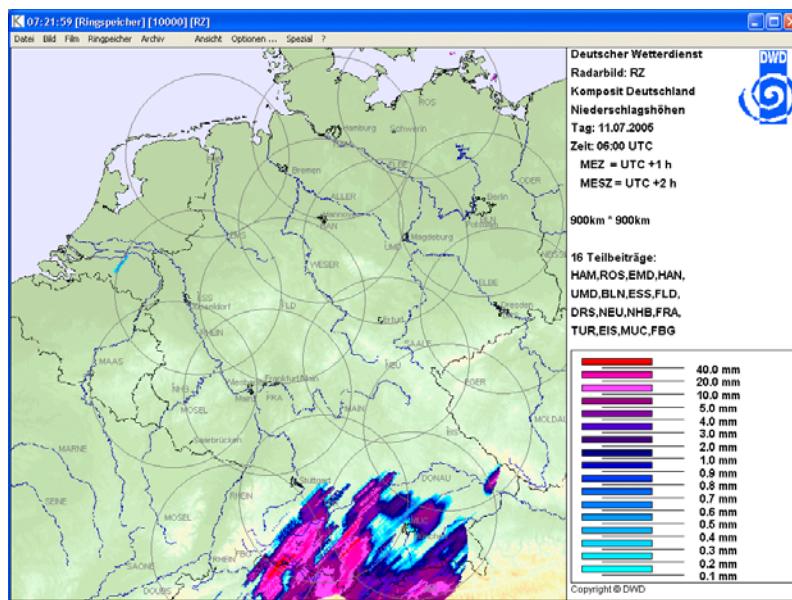


Abb. 4.22: Vorhersage der 1h-Niederschlagshöhe am 11.07.2005 um 06 Uhr UTC für 07 bis 08 UTC

4.2.6 Verschneidung der unterschiedlichen Verlagerungen zu einer Vorhersage

Die methodisch unabhängigen Lösungsansätze zur Vorhersage konvektiver und stratiformer Niederschlagsfelder (siehe Abschnitte 4.2.4 und 4.2.5) ermöglichen es nicht, eine gemeinsame (direkte) Vorhersage abzuleiten. Die Hauptursache hierfür ist die Anwendung unterschiedlicher Verfahren zur Identifikation und Charakterisierung von

Niederschlagsgebieten, die jeweils für die unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen (einzelne konvektive Zellen ~1-10 km, stratiforme Niederschlagsgebiete 100-500 km) optimiert sind. Beide Verfahren liefern sowohl berechnete Verlagerungsvektoren, als auch den für einen bestimmten zukünftigen Zeitpunkt abgeleiteten Zustand, d.h. extrapolierte Niederschlagsintensitäten.

Für die Verknüpfung oder Überlagerung der Ergebnisse beider Teilmodule sind prinzipiell zwei Vorgehensweisen denkbar: (1) Ableitung eines gemeinsamen Feldes von Verlagerungsvektoren, welches für die Extrapolation der Niederschlagsfelder angewendet wird oder (2) Überlagerung der getrennt extrapolierten Niederschlagsfelder zu einem gemeinsamen Ergebnisfeld. Bei der Auswahl der anzuwendenden Verschneidungsmethode waren weiterhin folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Bedingt durch verfahrenseigene Charakterisierungen der Niederschlagsgebiete darf der jeweilige Suchbereich für die Analysekomponenten der (Extrapolations-) Module nicht durch eine vorgeschaltete Klassifikation eingeschränkt werden.
- Es können keine Bereiche festgelegt werden, in denen ausschließlich eine Verlagerungskomponente (konvektiv oder stratiform) wirksam wird.
- Die Extrapolationsmodule liefern keine direkt miteinander vergleichbaren objektiven Gütekriterien für die berechneten Verlagerungsvektoren oder die vorhergesagten Niederschlagsintensitäten.

Damit ist für die Extrapolation von Niederschlagsfeldern aus komponentenweise vorhergesagten Anteilen nur ein relativ einfaches und robustes Verfahren anwendbar. Als Lösung hierfür bietet sich eine pixel- bzw. flächenbezogene Auswahl der berechneten Ergebnisfelder (Niederschlagsintensitäten) an, welche aber aufgrund fehlender Gütekriterien beide Vorhersagen zunächst als gleichwertig betrachten muss. Ein allgemeingültiges Verfahren, mit dem ausgehend von der Niederschlagsverteilung zum Zeitpunkt $t = 0$ als Analyse abweichende Vorhersagen für den Zeitpunkt $t > 0$ miteinander verschnitten werden können, ohne dass extrem hohe oder geringe Niederschlagsintensitäten geglättet werden, ist nicht definierbar, da durch die Überlagerung sowohl die Struktur der Niederschlagsverteilung als auch die „Gesamtbilanz“ geändert werden. Es ist somit festzustellen, dass ohne die Angabe vergleichbarer Qualitätsmaße die Ergebnisse einer bestimmten Vorhersage als vertrauenswürdiger einzuschätzen nicht durchführbar ist.

Für die Nutzung innerhalb RADVOR-OP wurde festgelegt, als Verschneidungsmethode ein auf einer Maximumauswahl basierendes Verfahren anzuwenden. Die Realisierung dieser Vorgabe erfolgte durch die Erstellung der Verschneidungsroutine „*mergeRdln*“. Im Hinblick auf die Validierung und Verifizierung der RADVOR-OP-Produkte sowie das mögliche Entwicklungspotential der Vorhersagekomponenten wurden zusätzliche Algorithmen zur „Integration“ implementiert. Es stehen folgende Verschneidungsmethoden zur Auswahl:

- **SIMPLEMAX (Integration):** Das Verschneiden der Eingangsdatensätze erfolgt über die Auswahl des maximalen Niederschlagswertes für jedes Pixel (Default).
- **GUIDEDMAX (Integration):** Liefert zwei oder mehr Eingangsdatensätze für ein Pixel einen Niederschlagswert ($> 0 \text{ mm/h}$), wird jener Wert übernommen, der am vertrauenswürdigsten ist. Hierzu ist es erforderlich, Wertungsfaktoren als Maß für die

Vertrauenswürdigkeit festzulegen. Entscheidend sind hierbei nicht die Absolutwerte der Faktoren, sondern nur deren relative Größe zueinander, z.B. $F(\text{Ergebnis Modul 1})$ größer oder kleiner als $F(\text{Ergebnis Modul 2})$.

- **SIMPLESUM (Integration)**: Dient der Berechnung von Niederschlagshöhen z.B. Ableitung von Stundenwerten des Niederschlags aus Intensitäten.
- **WEIGHTEDSUM1 (Integration)**: Hierbei wird der pixelbezogene Niederschlagswert aus der Summe der gewichteten Teilbeiträge der Eingangsfelder berechnet, wobei alle Teilbeiträge, d.h. auch 0.0 mm/h, berücksichtigt werden. Die anzuwendenden Wichtungsfaktoren sind explizit zu definieren.
- **WEIGHTEDSUM2 (Integration)**: Der abzuleitende Niederschlagswert wird als Summe der gewichteten Teilbeiträge der Eingangsfelder berechnet. Im Gegensatz zu WEIGHTEDSUM1 werden aber nur Intensitäten > 0.0 mm/h bei der Berechnung berücksichtigt. Die Wichtungsfaktoren der beitragenden Datensätze werden auf einen Wert von 1.0 normalisiert.
- **INTERSECTION (Validierung/Verifikation)**: Berechnung der „Schnittmenge“ der Teilbeiträge. Ausgegeben wird eine Maske, welche jene Bereiche kennzeichnet, in denen die Niederschlagswerte der Eingangsdatensätze ungleich NODATA sind.
- **MASKADD (Validierung/Verifikation)**: Suche nach gleich „klassifizierten“ Pixeln. Die Klassifikation beruht auf der Suche nach Pixeln, an denen die Intensitäten größer 0 mm/h ist.

Die im Folgenden dargestellten Resultate zeigen an einem Testfall exemplarisch die mittels *mergeRdn* ableitbaren Ergebnisse aus der Verschneidung extrapoliert konvektiver und stratiformer Niederschlagsfelder. Die Überlagerung wurde mittels SIMPLEMAX berechnet.

Die Graphiken der Abbildung 4.23 zeigen aus Radarmessungen über die verfeinerte Z-R-Beziehung abgeleitete Niederschlagsintensitäten (mm/5min) für den Zeitraum 18:00 bis 19:00 UTC des 08.07.2004. Sowohl im Raum Emden als auch in der Region des Böhmischen und Thüringer Waldes erreichten die Niederschlagsintensitäten Werte bis zu 10 mm/5min (hellgrüne Flächen). Die unter Einbeziehung aller Radarmessungen aus dem Zeitraum 18:00 – 18:55 UTC (12 Scans) berechnete Niederschlagshöhe (60 min) ist in Abbildung 4.24 dargestellt. Bedingt durch die Tatsache, dass nur alle 5min ein Scan aller Radarstandorte verfügbar ist, ergeben sich in der stündlichen Niederschlagsverteilung Sprünge bzw. Lücken. Markante Belege hierfür sind beispielsweise in der Region zwischen Harz, Rhön und Thüringer Wald zu finden. Die Erhöhung der zeitlichen Abtastrate wurde als mögliche Lösung für dieses Problem bereits im Abschlußbericht zum Projekt RADOLAN (DWD, 2004a) diskutiert. Als Alternative bietet sich eine synthetische Ableitung einer ausreichenden Anzahl an Zwischenschritten über Interpolation aus den mittels Radar gemessenen Niederschlagsverteilungen an.

Die in Abbildung 4.24 dargestellten gemessenen Niederschlagshöhen wurden als Referenz für eine einstündige kombinierte Vorhersage (stratiform und konvektiv) ausgehend vom 08.07.2005, 18:00 UTC verwendet.

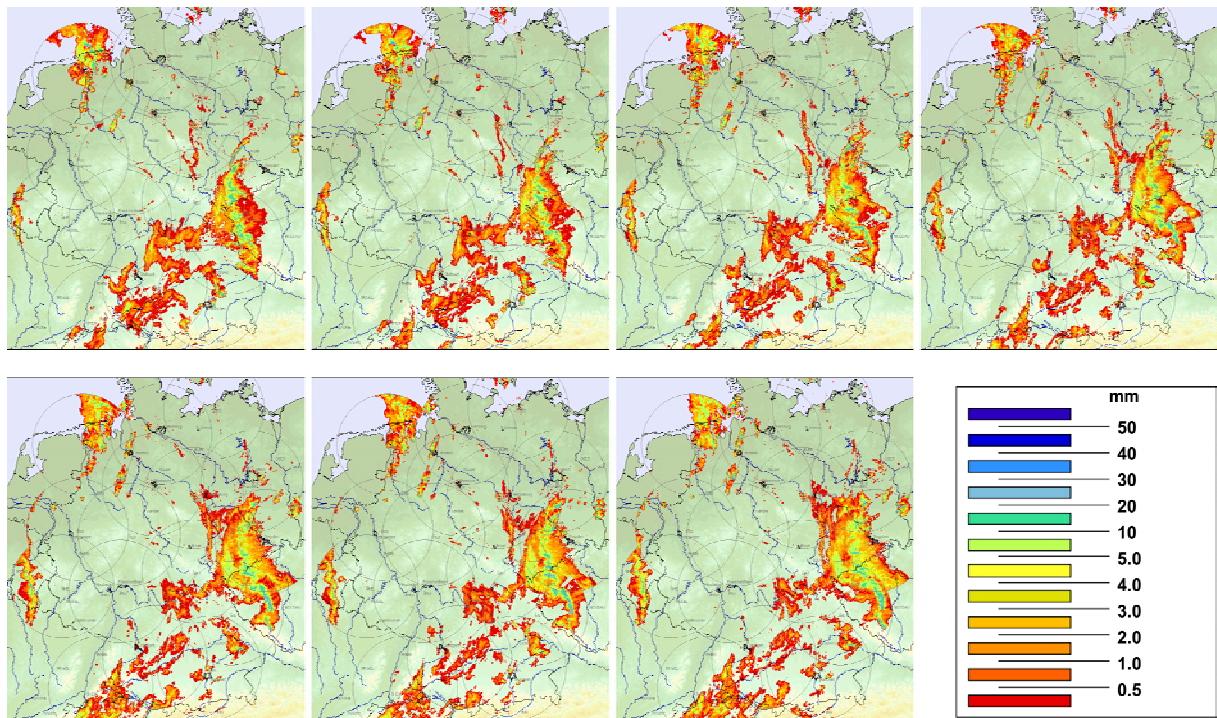


Abbildung 4.23: Niederschlagsintensitäten (mm/5min), abgeleitet aus Radarmessungen für den 08.07.2004, 18:00 UTC (oben links), alle 10 min bis 19:00 UTC (unten rechts)

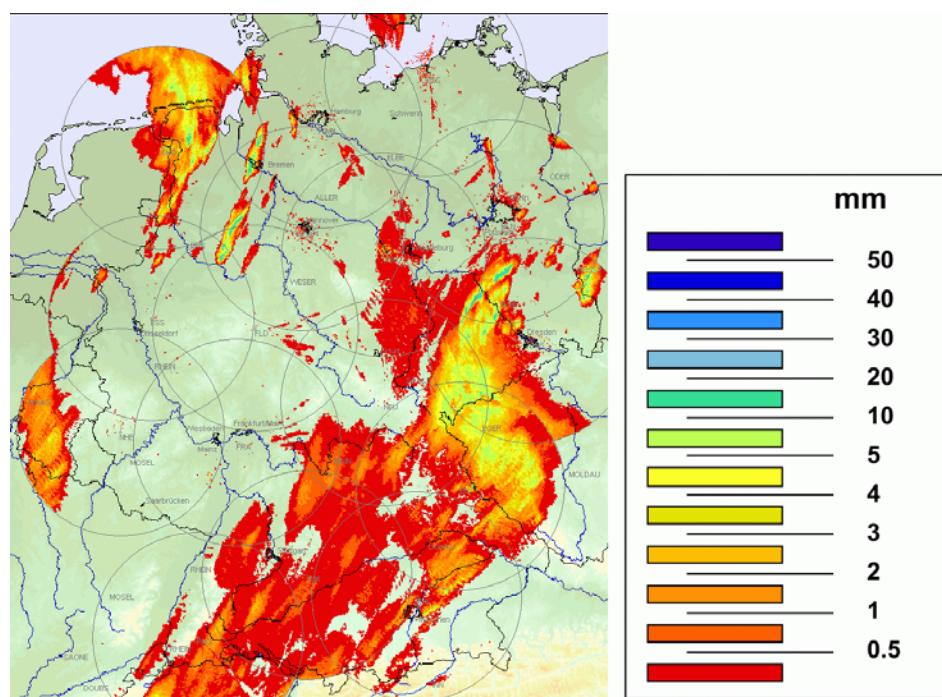


Abbildung 4.24: Stundenwerte des Niederschlags, abgeleitet aus Radarmessungen für den 08.07.2004, 18:00 – 19:00 UTC

Ein einfacher visueller Vergleich zwischen den extrapolierten (Abbildung 4.25) und gemessenen Niederschlagsfeldern zeigt, dass die beobachtete Struktur der Niederschlagsverteilung (nur Aussage Niederschlag ja/nein) relativ gut prognostiziert wurde. Größere Abweichungen sind für die Regionen festzustellen, in denen es erst nach dem als Analysezeitpunkt gewählten Termin (18:00 UTC) zur Niederschlagsbildung kommt. Aus den in Abbildung 4.23 enthaltenen Graphiken wird ersichtlich, dass dies beispielsweise für die Region zwischen Harz und Thüringer Wald zutrifft. Größere Niederschlagsintensitäten konnten hier erst ab ca. 18:30 UTC aus den Radarmessungen erkannt werden. Weitere Abweichungen sind am westlichen und südlichen Rand des vom Radarverbund erfassbaren Bereiches zu erkennen. Ursache hierfür ist das „Hineindriften“ von Niederschlagsgebieten aus dem von den Radarstationen nicht mehr erfassbaren Bereich.

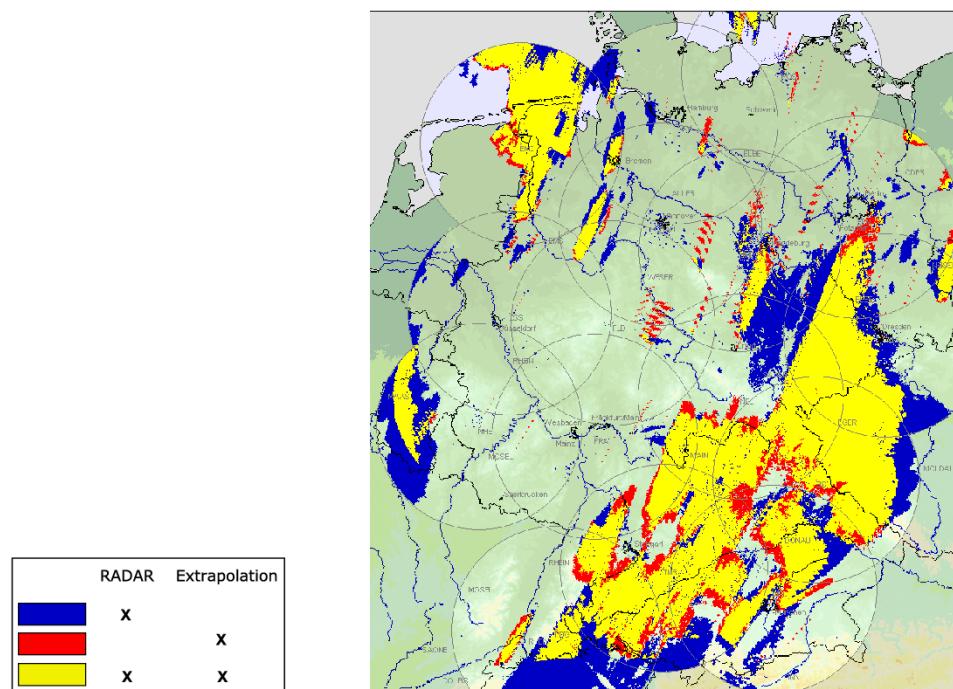


Abbildung 4.25: Vergleich vorhergesagter und gemessener Niederschlagsfelder (nur Aussage Niederschlag ja/nein), 08.07.2004, 18:00-19:00 UTC

Wie aus dem Vergleich der Abbildungen 4.24 und 4.26 deutlich wird, haben die Werte der prognostizierten Niederschlagshöhen die gleiche Größenordnung wie die gemessenen. Die Maximalwerte des Niederschlags wurden in der Vorhersage allerdings für den Böhmischem und Thüringer Wald sowie Nordwestdeutschland überschätzt. Die prognostizierten Niederschlagshöhen liegen hier, mit Werten von teilweise größer als 50 mm/h, deutlich über den gemessenen (ca. 10-20 mm/h). Für die anderen Regionen, z.B. Schwäbische und Fränkische Alb zeigen die prognostizierten Niederschlagswerte gegenüber der Radarmessung nur geringe Abweichungen.

Eine einfache Abschätzung der Anteile der unterschiedlichen Beiträge aus den Teilergebnissen der stratiformen und konvektiven Niederschlagsprognose zur integrierten Vorhersage kann aus der Darstellung der Abbildung 4.27 entnommen werden. Entsprechend der Anzahl und der Größe der als konvektiv erkannten Niederschlagsfelder (gelb und rot) ist deren Anteil am Gesamtresultat sehr gering. Der größte Anteil an den vorhergesagten

Niederschlagsflächen resultiert erwartungsgemäß aus den Ergebnissen der „stratiformen“ Verlagerung. Es ist sehr gut ersichtlich, dass nur in einzelnen Fällen (rot markierte Flächen) aus der Extrapolation der Zugbahn konvektiver Zellen Niederschläge für abweichende

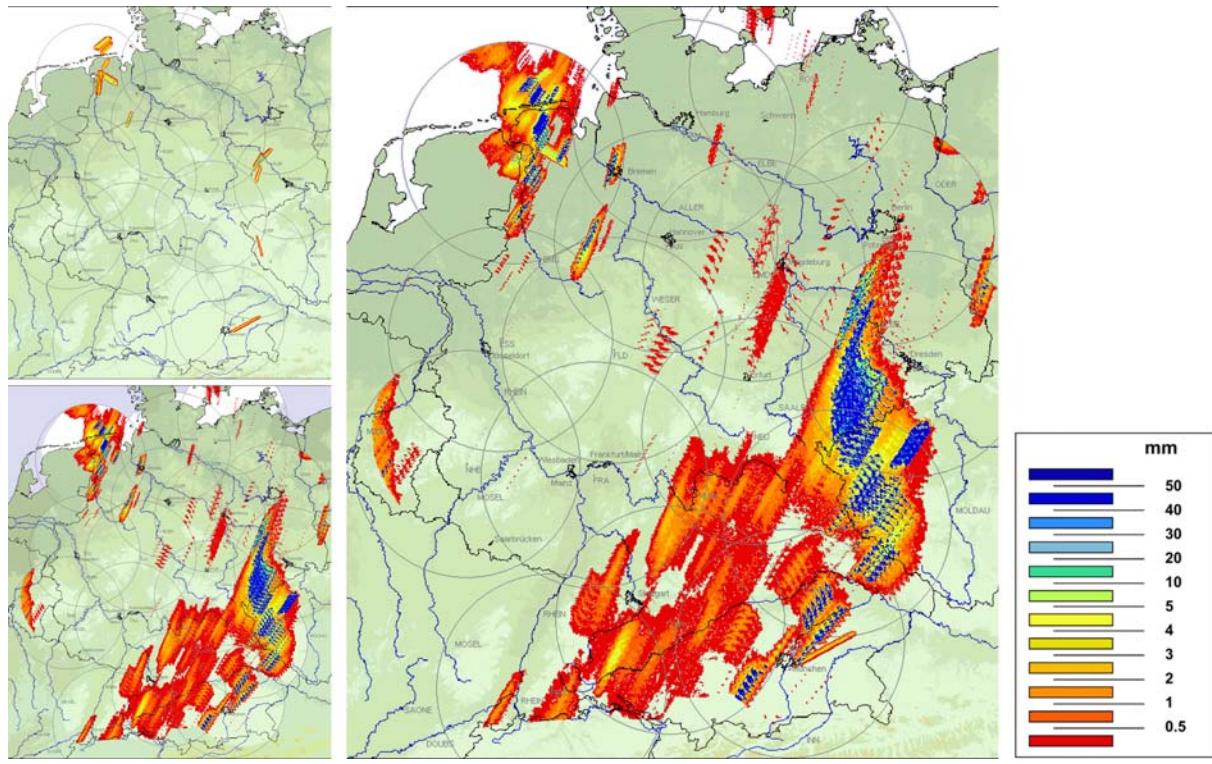


Abbildung 4.26: Vorhersage der Niederschlagshöhe als Ergebnis aus der Integration (rechtes Teilbild) der als konvektiv (links oben) und stratiform (links unten) ermittelten Anteile für den 08.07.2004, 18:00 – 19:00 UTC

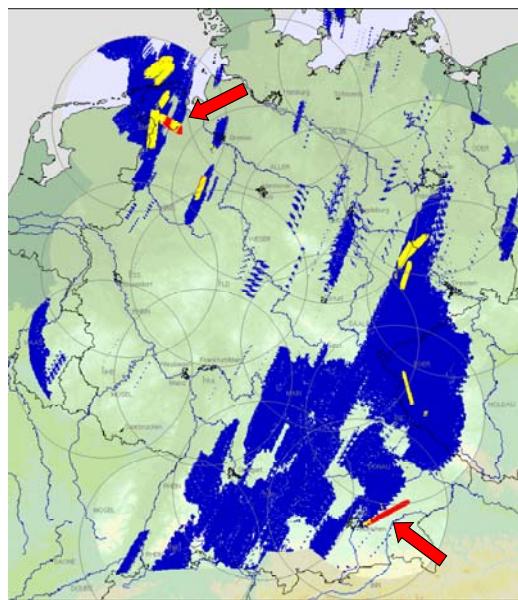


Abbildung 4.27: Komponentenweise Beiträge für die Prognosen: blau – nur stratiform, rot – nur konvektiv, gelb – stratiform und konvektiv.

Bereiche vorhergesagt werden. Außerdem ist festzustellen, dass die Abweichung der allein aus der stratiformen Verlagerung prognostizierten Niederschlagshöhe gegenüber der aus der „verschnittenen“ Prognose abgeleiteten nur sehr gering und räumlich sehr begrenzt ist.

Das dargestellte Beispiel zeigt weiterhin, dass es erforderlich ist, ein Qualitätsmaß für die Vorhersagen beim Verschneiden zu berücksichtigen. Auffällig wird dies durch die Zugbahn einer konvektiven Zelle in Nordwestdeutschland (nahe Emden), deren prognostizierte Zugbahn deutlich von denen der benachbarten Zellen abweicht (Abbildung 4.27, rot markierter Pfeil). Ähnliches gilt für eine Zellbahn südlich von München, wobei für diese anzumerken ist, dass die vorhergesagte Zugrichtung mit der tatsächlichen für den Vorhersagezeitraum 18:00-18:20 UTC gut übereinstimmt. Die Überschätzung der Lebensdauer dieser Zelle und somit der Länge der Zellbahn resultieren aus der zum Analysezeitpunkt sehr schwer abschätzbarer weiteren Zellenentwicklung.

4.2.7 Quantifizierung der Verlagerung

Eine entscheidende Voraussetzung für die Vorhersage von Niederschlägen durch prognostische Verlagerung von Niederschlagsgebieten ist die Quantifizierung der Ausgangsprodukte.

Die Vielzahl der Voruntersuchungen zur operationellen Aneichung von Radarniederschlagsfeldern im Rahmen des Projektes RADOLAN (DWD 2004a) hat gezeigt, dass eine Aneichung von Radarniederschlagsdaten für Zeitintervalle von weniger als einer Stunde keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert. Allein der Zeitversatz zwischen dem *precipitation scan* im Höhenniveau der Niederschlag erzeugenden Wolke und der bodengebundenen Messung mit Hilfe eines Ombrometers hat die gleiche Größenordnung wie das Messintervall eines RZ-Komposit-Produktes.

Allerdings zeigen die Erfahrungen bei der Aneichung von Radarniederschlagsdaten auch, dass die Verwendung des RZ-Produktes allein, d.h. die Umrechnung der Radarreflektivität nur mit Hilfe der verfeinerten Z/R-Beziehung, zu Fehlern führen kann, die in einer Größenordnung des Mehrfachen der mit dem Radar bestimmten Niederschlagshöhe liegt. Es ergibt sich mithin ein Dilemma, dessen Lösung nur ein Kompromiss sein kann.

Grundlage dieses Kompromisses bildet das Ergebnis des mit dem Verfahren RADOLAN durchgeführten Aneichprozesses, das best-angepasste, sogenannte RW-Komposit auf der Basis von Stundenwerten.

Die Ausgangsbasis für das RW-Produkt stellen neben den am Boden mittels Ombrometern gemessenen Niederschlagshöhen die fünfminütigen RZ-Daten, die nach Akkumulation zu einem Stundenkomposit und mehreren weiteren Verarbeitungsschritten (vgl. DWD 2004a) unter Einbeziehung der Bodenniederschlagsdaten zum RW führen. Es liegt nahe, die einzelnen RZ-Komposita mit einer Art Inversionsverfahren anhand des RW zu quantifizieren.

Seien x und y die Pixelkoordinaten des zu bearbeitenden Punktes im Komposit und t der Index des zu quantifizierenden RZ-Komposita (*precipitation scan*), so ergibt sich an diesem Punkt ein Stundenwert

$$r_{\cdot|xy}^{(RZ)} = \sum_{t=1}^N r_{t|xy}^{(RZ)}, \quad (4.5)$$

wobei die Anzahl N der Scans pro Stunde in der Regel (vorbehaltlich irgendwelcher Datenausfälle) zwölf betragen wird.

Der Niederschlagswert des angeeichten Komposit $r^{(RW)}$ wird von dem nach Gleichung (4.5) bestimmten $r^{(RZ)}$ um einen bestimmten Faktor abweichen. Im Gegensatz zum Aneichfaktor sei dieser Quotient (Gl. 4.6) als Quantifizierungsfaktor f_Q und das aus Gleichung (4.7) resultierende quantifizierte Fünf-Minuten-Komposit als RQ bezeichnet:

$$f_{Q|xy} = \frac{r_{\cdot|xy}^{(RW)}}{r_{\cdot|xy}^{(RZ)}} \quad (4.6)$$

Anhand dieses Faktors lassen sich nun die einzelnen RZ-Komposita quantifizieren:

$$r_{t|xy}^{(RQ)} = f_{Q|xy} \cdot r_{t|xy}^{(RZ)}, \quad t=1, \dots, N=12 \quad (4.7)$$

Ein Beispiel für die Quantifizierung zeigt Abb. 4.28.

Der Hauptnachteil dieses Vorgehens besteht in der zeitlichen Verzögerung. Der Faktor aus Gleichung (4.6) und damit das durch Gleichung (4.7) definierte RQ-Produkt kann in dieser Form erst nach erfolgter Aneichung bestimmt werden, das heißt erst etwa dreißig Minuten nach Beendigung der Messung (vgl. Zeitschema RADOLAN, DWD 2004a). Für das erste verwendete RZ-Komposit genau eine Stunde zuvor ergibt sich eine maximale Verzögerung der Vorhersage um 90 Minuten. Diesen Nachteil wiegt die Genauigkeit der Quantifizierung, wie sie in Abb. 4.28 belegt werden kann, allerdings nicht auf. Eine mögliche Lösung dieses Dilemmas wird im Folgenden vorgestellt.

Zunächst sei aber noch auf eine andere potentielle Fehlerquelle hingewiesen, nämlich auf die im Rahmen von RADOLAN statistisch erfassten und durch Interpolation eliminierten Bodenechos. Ein Beispiel dafür zeigt Abb. 4.29.

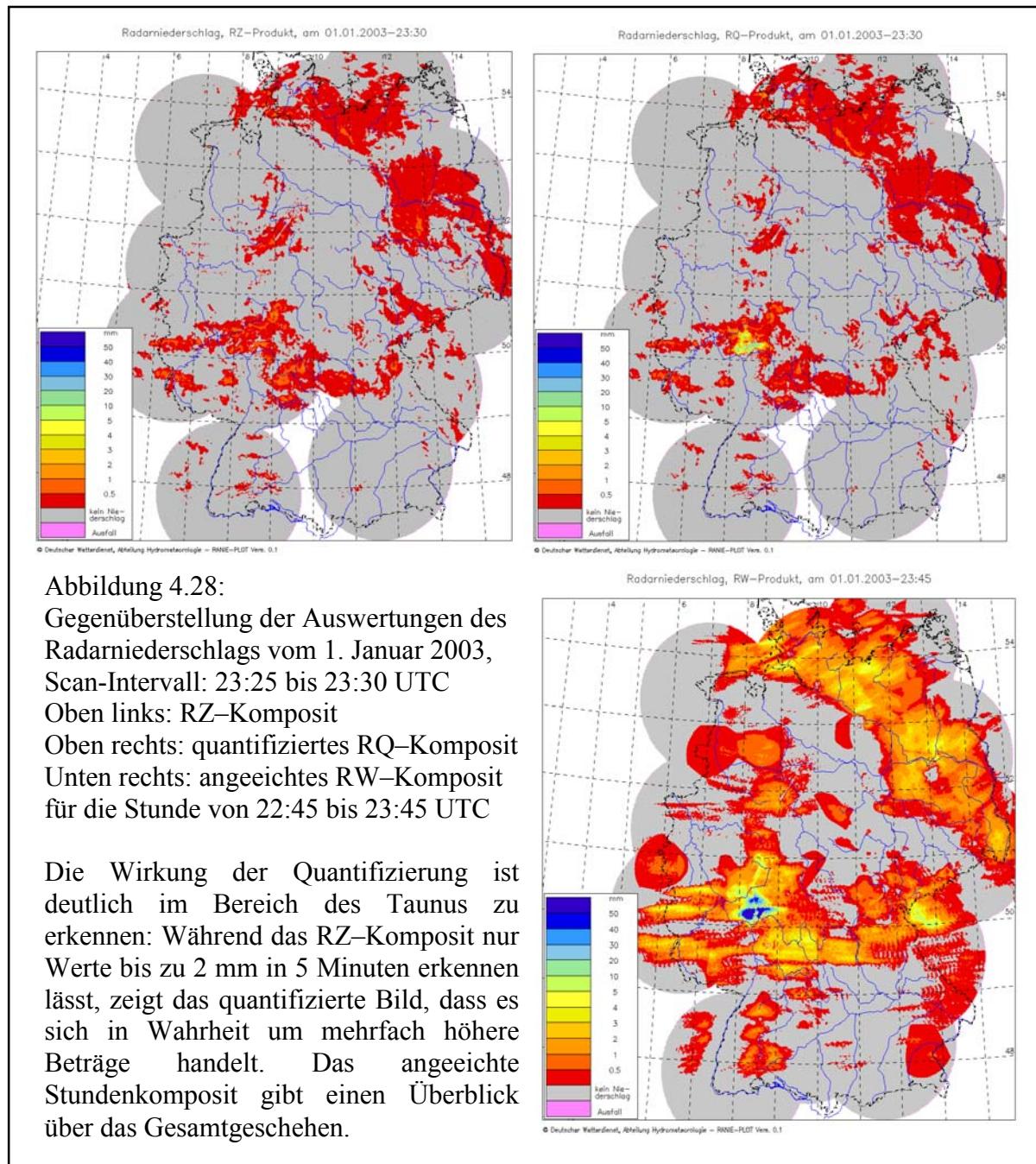
In dem aus dem RC-Produkt durch Selektion der Clutterkennung extrahierten RN-Produkt – es enthält keine Radar-Niederschlagsdaten mehr, sondern nur noch die zu eliminierenden Festziele – zeigt sich, dass ein Teil der in RZ und RQ erkennbaren Niederschlagsechos durch das verwendete Interpolationsverfahren gleichsam "verschmiert" wird. Es muss allerdings deutlich gemacht werden, dass es sich hier nicht um ein Problem des Quantifizierungsalgorithmus, sondern um eine Eigenschaft von RADOLAN handelt, die der Verbesserung bedarf.

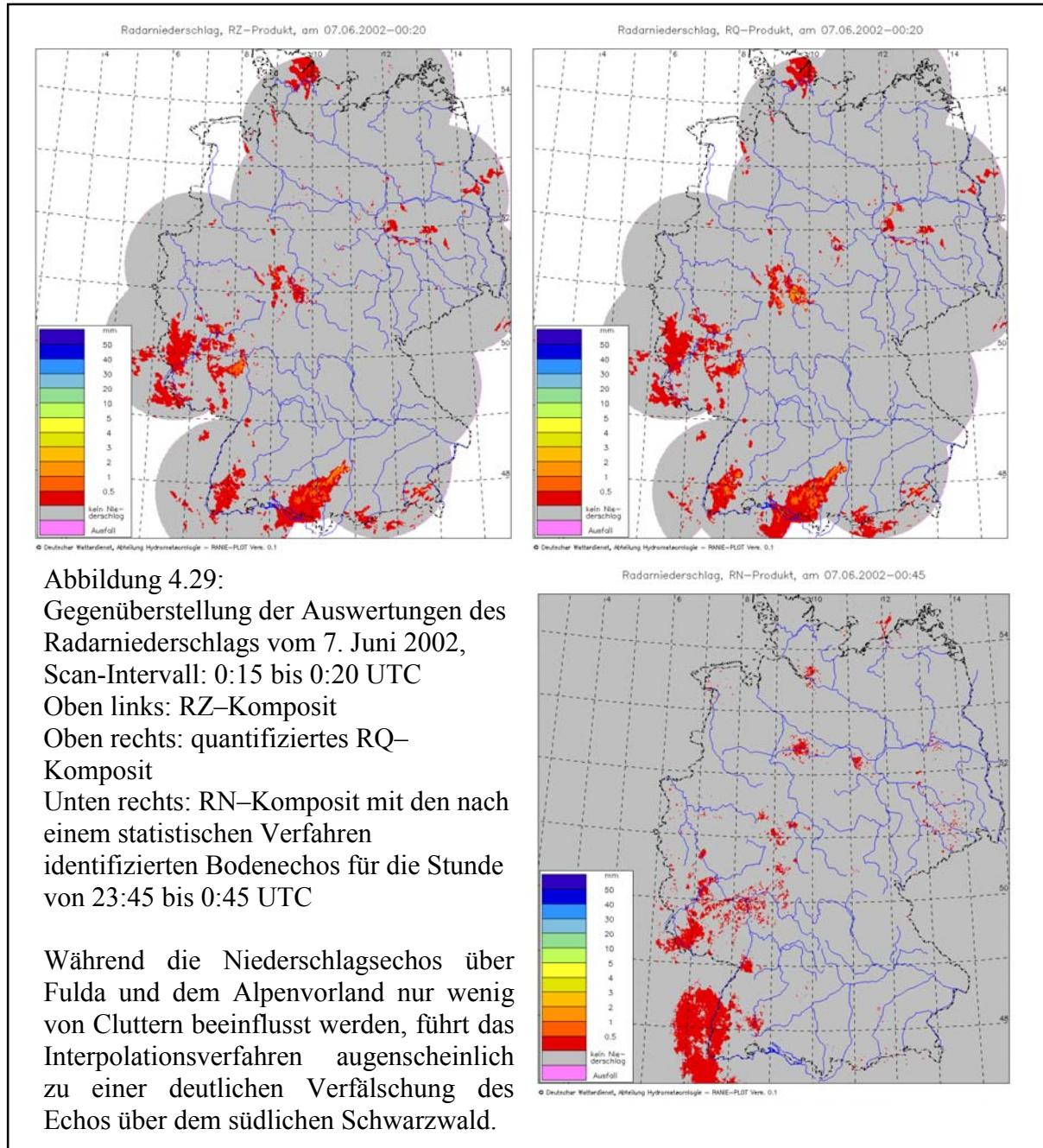
Das oben genannte Hauptproblem des Quantifizierungsalgorithmus – die beträchtliche zeitliche Verzögerung bei Verwendung des angeeichten RW-Komposit – ist allein dadurch zu umgehen, dass auf das gleiche Produkt der Vorstunde zurückgegriffen wird. Dadurch wird zwar der zeitliche Rückstand weitgehend vermieden, allerdings auf Kosten zweier Prämissen:

1. Es muss angenommen werden, dass keine Abschwächung oder Intensivierung des Niederschlagsprozesses stattfindet; andernfalls müssten die Faktoren für die Quantifizierung vermindert oder erhöht werden.

2. Außerhalb der durch die Aneichung der Vorstunde erfassten Flächen, d.h. in den im vorausgehenden Zeitintervall echofreien Bereichen des Komposit muss mit einem konstanten Faktor gerechnet werden. Dieser Faktor kann mehr oder weniger von den Aneichfaktoren der Vorstunde abweichen und damit zu vergleichsweise starken Gradienten führen.

In Anlehnung an Gleichung (4.6) lässt sich nun ein Quotient aus dem angeeichten RW-Komposit der Vorstunde und dem gleichzeitigen RB-Komposit – der Zusammenfassung der zwölf fünfminütigen RZ-Kompositen nach der statistischen Clutterfilterung und einer





Voraneichung – bilden, sofern ein Radarecho am jeweiligen Punkt definiert ist; andernfalls ist der Faktor 1 zu verwenden:

$$\begin{aligned}
 f_{Q-l|xy} &= \frac{r_{|xy}^{(RW-1)}}{r_{|xy}^{(RB-1)}} & \forall xy \Leftrightarrow r_{|xy}^{(RB-1)} > 0 \\
 f_{Q-l|xy} &= 1 & \forall xy \Leftrightarrow r_{|xy}^{(RB-1)} = 0
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Analog zu diesem Vorgehen wäre die Verwendung der lokalen Aneichfaktoren oder Aneichdifferenzen aus dem jeweiligen speziellen Aneichverfahren möglich. Da aber das endgültige RW-Komposit in der Regel Resultat einer Mischung beider Verfahren darstellt,

dürfte die in Gleichung (4.8) formulierte Relation zwischen End- und Ausgangsprodukt eine plausible Zwischenlösung darstellen. Wie in Gleichung (4.7) lässt sich dann das quantifizierte Vorhersageprodukt für die erste und zweite Stundenvorhersage aus den entsprechend aufsummierten Werten der verlagerten fünfminütigen RV-Kompositen (RS-Kompositen) berechnen:

$$r_{|xy}^{(RQ+I|2)} = f_{Q-1|xy} \cdot r_{|xy}^{(RS+I|2)} \quad (4.9)$$

Konsequenterweise sollte anstelle einer derartigen linearen Funktion eine direkte Abbildung in Form einer Transformation der Häufigkeitsverteilungen verwendet werden. Gesetzt, die Niederschlagswerte des RW-Kompositen folge der Häufigkeitsverteilung $\Phi_1(r_{|xy}^{(RQ-1)})$, und die des RS-Kompositen einer analogen Verteilung $\Phi_2(r_{|xy}^{(RQ-1)})$, so existiert eine Transformationsfunktion $T^{(\Phi_1 \rightarrow \Phi_2)}$, durch die die Überführung der Pixelwerte entsprechend

$$r_{|xy}^{(RQ+I|2)} = T^{(\Phi_1 \rightarrow \Phi_2)}(r_{|xy}^{(RS+I|2)}) \quad (4.10)$$

ermöglicht wird. Ein derartiges Vorgehen wäre überdies eine geeignete alternative Methode zur Aneichung der Niederschlagswerte. Zur Bestimmung der Transformationsfunktion müssen allerdings die Verteilungsfunktionen der Niederschlagswerte bekannt sein, was Untersuchungen voraussetzt, die im Rahmen dieses Projektes noch nicht durchgeführt werden konnten.

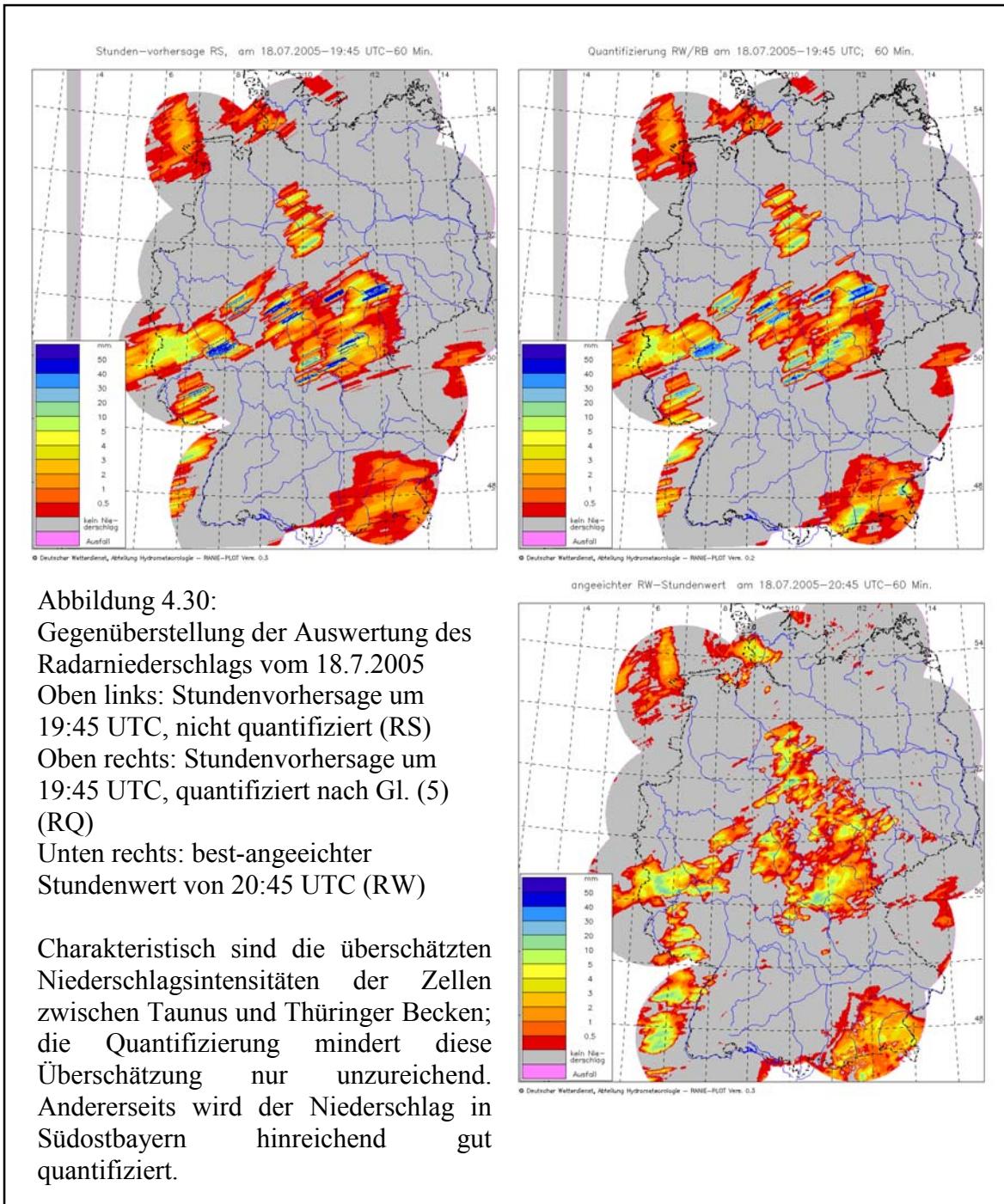
Ungeachtet dessen lassen sich aber auch mit Hilfe von Gleichung (4.9) brauchbare Ergebnisse erzielen, wie das Beispiel in Abb. 4.30 zeigt. Das Verfahren führt zwar nicht bei allen verlagerten Zellen zu einer korrekten Extrapolation der Niederschlagsintensität, die an dem a posteriori gewonnenen best-angeeichten Komposit (RW) gemessen werden kann, dämpft aber die im allgemeinen vom Radar überschätzten konvektiven Niederschläge auf ein akzeptables Maß.

Künftige intensive Vergleichsuntersuchungen zwischen den Schätzungen nach Gleichung (4.8) und (4.9) einerseits und dem Modell von Gleichung (4.10) andererseits müssen zeigen, ob sich dieses Ergebnis verbessern lässt.

Die Alternative, die in Abschnitt 4.2.5 verwendeten Verlagerungsvektoren zur Verschiebung der nach Gleichung (4.8) ermittelten Quantifizierungsfaktoren zu verwenden, erscheint zunächst zwar plausibel, weist bei näherer Betrachtung aber ebenfalls Schwächen auf.

Dabei steht zunächst das rein technische Problem der Definition neuer Speicher- bzw. Dateiformate für die Schnittstelle von Verlagerungs- und Quantifizierungsmodul im Vordergrund; es ist technisch durchaus lösbar, aber mit nicht zu unterschätzendem Arbeits- und Koordinationsaufwand verbunden. Darüber hinaus verringert eine Erweiterung des Umfangs an Inputdaten die Robustheit des Algorithmus.

Ungeachtet dessen aber beschreiben die Verlagerungsvektoren als eine der Eingangsgrößen einen Prozess in einer zeitlichen Auflösung von fünf Minuten, die nach Gleichung (4.8)



bestimmten Faktoren aber das Integral eines parallel dazu ablaufenden Prozesses, das nicht ohne Weiteres wieder in kurze Zeitschritte aufgelöst werden kann.

Es gibt mithin keine Garantie dafür, dass die mit Hilfe der Fünf-Minuten-Vektoren verlagerten Stunden-Quantifizierungsfaktoren den gleichen Ort erreichen, an dem die mittels Fünf-Minuten-Vektoren verlagerten Radarechos liegen. Diese Unsicherheit vergrößert sich mit dem Vorhersagezeitraum.

Eine andere Lösungsmöglichkeit besteht in der Verwendung von Gleichung (4.10) durch Ansatz einer geeigneten Transformation, etwa nach dem Modell einer Exponential- oder

Weibull-Verteilung. Damit einher ginge die Reduktion des Umfangs der Inputdaten, die nur noch aus dem aktuellen RS-Komposit und dem RW-Komposit der Vorstunde bestünde, mithin eine Erhöhung der Robustheit des Verfahrens. Auch diese Lösungsmöglichkeit erfordert zusätzlichen Entwicklungsaufwand.

4.2.8 Unterscheidung der Vorhersage in flüssigen und festen Niederschlag

Das im Rahmen der Verfahrensentwicklung zum RADAR-Nowcasting geplante Modul zur Unterscheidung der Vorhersage nach flüssigem und festem Niederschlag konnte nicht erstellt werden.

Die Ursache dafür lag zunächst in dem erhöhten Entwicklungsaufwand für die Quantifizierung, die im vorausgehenden Abschnitt beschrieben worden ist.

Eine weitere Ursache liegt darin, dass bei dem geplanten Modul auf die Erfahrungen des Projektes SNOW zurückgegriffen werden soll (vgl. DWD 2004b). Die bisherigen Erfahrungen mit Vorhersagewerten der Temperatur in definierten Höhen zeigen allerdings wegen unterschiedlicher Möglichkeiten bei der Modellierung des bodennahen Temperaturprofils keine eindeutigen Ergebnisse, so dass es geraten scheint, abschließende Erfahrungen aus dem Projekt SNOW abzuwarten.

4.3 Teilprojekt 3: RADAR-Verifikation

4.3.1 Aneichung hochwasserrelevanter Niederschlagsereignisse

Auf der Basis der von der LAWA vorgegebenen hochwasserrelevanten Niederschlagsereignisse wurden Offline-Aneichungen nach dem RADOLAN-Schema (DWD, 2004a) durchgeführt. Als Input wurden hoch aufgelöste Niederschlagsdaten des gemeinsamen Ombrometermessnetzes des DWD und der Bundesländer sowie die lokalen, fünf-minütlichen und hoch aufgelösten Radarniederschlagsdaten des DWD-Radarverbundnetzes genutzt.

Da sich erst während der Durchführung der Aneichung herausgestellt hat, dass die Radardatenqualität für die ersten acht Ereignisse bis März 2000 mangelhaft ist, werden nunmehr auch aktuellere Termine aus dem experimentellen Testbetrieb von RADOLAN in die Untersuchung mit einbezogen. So umfasst der Zeitraum mit vorliegenden RADOLAN-Analysen, die entweder offline im Rahmen dieses Projektes oder online im Rahmen des Projekts RADOLAN gewonnen wurden, alle wichtigen Hochwasserereignisse vom Mai 2000 bis August 2005 (s. Tab. 4.3).

In dieser Tabelle sind bereits einige wichtige Informationen integriert, wie die vom Hochwasser betroffenen Gebiete und die Verfügbarkeit von Ombrometer- und Radardaten.

Die Ergebnisse umfassen alle Zwischenprodukte des RADOLAN-Verfahrens – angefangen mit den unkorrigierten fünf-minütlichen Radarniederschlagskompositen (noch mit originärer Radarreflektivitäten-Einheit) über die abschattungskorrigierten und mit einer verfeinerten Z-R-Beziehung in Niederschlagsintensitäten umgerechneten fünf-minütlichen Radarniederschlagskompositen und die mit verschiedenen aufeinanderfolgenden Korrekturen bearbeiteten stündlichen Radarniederschlagskompositen bis hin zu den sog. „best-angeeichten“ stündlichen Radarniederschlagskompositen. Eine stichprobenartige Prüfung der Daten wurde vorgenommen. Die bereits im RADVOR-OP-Zwischenbericht (DWD, 2003) festgestellten fachlichen Defizite konnten während der weiteren Bearbeitung großenteils beseitigt werden.

Die Bereitstellung der RADVOR-OP-Ergebnisse für die Ereignisse 9 – 23 erfolgte sukzessive vom Dezember 2004 bis Februar 2005. Eine frühere Bearbeitung konnte im Einvernehmen mit der LAWA zugunsten notwendiger Entwicklungsarbeiten bei dem Projekt RADOLAN aus Ressourcengründen nicht erfolgen.

Im Unterschied zur derzeit im operationellen Routinebetrieb von RADOLAN eingesetzten Maximalwertmethode bei der Kompositerstellung wurde das im experimentellen Testbetrieb von RADOLAN ebenfalls genutzte Verfahren des bodennächsten Wertes für die im Offline-Modus berechneten RADVOR-OP-Ereignisse herangezogen: Ist ein Kompositpixel in Überlappungsbereichen mehrerer Radars schon durch ein Pixel aus einem zuvor abgearbeiteten lokalen Radardatensatz belegt, so werden zwei Fälle unterschieden: (1) Der vorhandene Wert ist Null oder (2) der vorhandene Wert ist größer als Null. Im Fall 1 wird der vorhandene Wert mit dem konkurrierenden Wert überschrieben, während im Fall 2 der Wert des Pixels in das Komposit eingebbracht wird, dessen Elevation (über NN) am niedrigsten ist. Besitzen die Pixel beider konkurrierender lokaler Radardatensätze dieselbe Elevation, so wird das Pixel mit der maximalen Niederschlagshöhe verwendet.

Nr	Zeitraum		Anzahl der Tage	Bundes- land	Fluss bzw. Gebiet	Ombro- meter- daten (Anzahl)	Radardaten	
	von	bis					DX	PZ
29	21.08.05	24.08.05	4	BY	Iller, Lech, Isar, Inn, Donau	s. Anm. 2	s. Anm. 2	
28	11.02.05	13.02.05	3	BW, BY, RP	BY: Regnitz, Itz, Fränkische Saale, Main, Altmühl, Wörnitz, Naab, Regen, Donau, Rott, Vils	s. Anm. 2	s. Anm. 2	
27	20.01.05	23.01.05	4	BW, BY, RP	BY: Fränkische Saale, oberer Main, Regnitz, Wörnitz, Altmühl, Naab, Regen, Ilz	s. Anm. 2	s. Anm. 2	
26	15.11.04	20.11.04	6	TH	Werra, Gebiet: Thüringer Wald	s. Anm. 2	s. Anm. 2	
25	12.08.04	12.08.04	1	NW	Gebiet: NW (lokal)	s. Anm. 2	s. Anm. 2	
24	01.05.04	08.05.04	8	TH	Werra, Gebiet: Rhön	s. Anm. 2	s. Anm. 2	orange
23	29.12.02	04.01.03	7	TH	Main, Werra, Saale/Unstrut	315		red
22	10.09.02	11.09.02	2	TH	Gebiet: Rhön	343		
21	28.08.02	31.08.02	4	BW, RP, NW, TH	Sieg, Gebiet: BW (lokal)	371		
20	09.08.02	13.08.02	5	BY, SN, TH	Elbe	345		
19	05.08.02	07.08.02	3	BW, BY	Gebiet: Chiemgau	344		
18	05.06.02	07.06.02	3	BW, BY	Mindel, Günz, Schmutter, Zusam	343		
17	02.05.02	10.05.02	9	BW, TH	Leine, Auma, Weida, Ilm, Neckargebiet	343		
16	17.03.02	22.03.02	6	BW, RP	Neckar, Kocher, Rems	341		
15	19.02.02	28.02.02	10	BW, TH	Werrazuflüsse aus Rhön, mittlere Werra, Ilm, Neckar, Kocher, Fränkische Saale	341	orange	
14	01.02.02	06.02.02	6	RP	Gebiet: RP	336		
13	19.01.02	30.01.02	12	RP, TH	Obere Saale	342	orange	
12	01.05.01	03.05.01	3	NW, RP	Gebiet: NW (lokal), RP (lokal)	329	orange	
11	18.03.01	20.03.01	3	RP	Gebiet: RP	311		
10	05.08.00	06.08.00	2	BY	Gebiet: Alpenvorland	301		
9	07.05.00	07.05.00	1	TH	Hasel	307	orange	red
8	08.03.00	14.03.00	7	TH	Werra, Steinach, Saale, Schwarza, Harz-Zuflüsse der Unstrut	308	s. Anm. 1	red
7	05.12.99	08.12.99	4	RP	Gebiet: RP	308	s. Anm. 1	
6	14.09.99	18.09.99	5	TH	obere Werra, Steinach Schwarza, Zuflüsse zur Unstrut	307	s. Anm. 1	
5	04.07.99	07.07.99	4	TH	Hörsel, Pleiße	304	s. Anm. 1	
4	20.05.99	23.05.99	4	BW, BY	Iller, Lech, Isar, Donau, Argen	301	s. Anm. 1	
3	01.03.99	04.03.99	4	TH	Werra, Steinach, Saale, Schwarza, Harz-Zuflüsse der Unstrut	302	s. Anm. 1	
2	01.12.98	14.12.98	14	RP	Gebiet: RP	298	s. Anm. 1	
1	27.10.98	01.11.98	6	BW, BY, RP, TH	Werra, Steinach Saale, Weiße Elster Harz-Zuflüsse der Unstrut, Main	296	s. Anm. 1	

Tab. 4.3: Hochwasserrelevante Niederschlagsereignisse; Anm. 1: Ereignisse 1 – 8 können wegen mangelhafter DX-Radardatenqualität nicht bearbeitet werden; Anm. 2: Ereignisse 24 – 29 sind als Ersatz für die Ereignisse 1 – 8 hinzugekommen, Datenlage (In- und Output) im Rahmen des experimentellen Testbetriebs bzw. operationellen Routinebetriebs von RADOLAN; Erklärung der Füllfarben: grün für gute, orange für ausreichende und rot für ungenügende Datenverfügbarkeit

Zur Bedeutung, wie wertvoll die Ergebnisse sind - auch wenn sie offline angeeicht erst Monate bzw. im vorliegenden Fall Jahre nach dem Ereignis zur Verfügung stehen -, möge einmal mehr am Beispiel des Elbehochwassers vom August 2002 (Ereignis Nr. 20) veranschaulicht werden.

Die in Abbildung 4.31 wiedergegebenen Niederschlagsverteilungen zeigen für den 12. August 2002 die Stundenwerte für 12.50, 13.50 und 14.50 Uhr UTC im Gebiet von Weesenstein im Müglitztal, welches von dem Starkniederschlag besonders stark getroffen worden ist. Die drei nächsten, allesamt ca. 25 km entfernt liegenden Ombrometerstationen Dresden-Klotzsche, Lichtenhain und Zinnwald zeigen bereits die heterogene Niederschlagsverteilung (s. Tab. 4.4).

Station / Uhrzeit	12.50 UTC	13.50 UTC	14.50 UTC
Dresden-Klotzsche	3,9 mm	2,6 mm	12,7 mm
Lichtenhain-Mittelndorf	0,7 mm	0,3 mm	0,4 mm
Zinnwald-Georgenfeld	7,8 mm	18,1 mm	23,2 mm

Tab. 4.4: Stündliche Niederschlagshöhen der drei Ombrometer in der Umgebung von Weesenstein am 12. August 2002

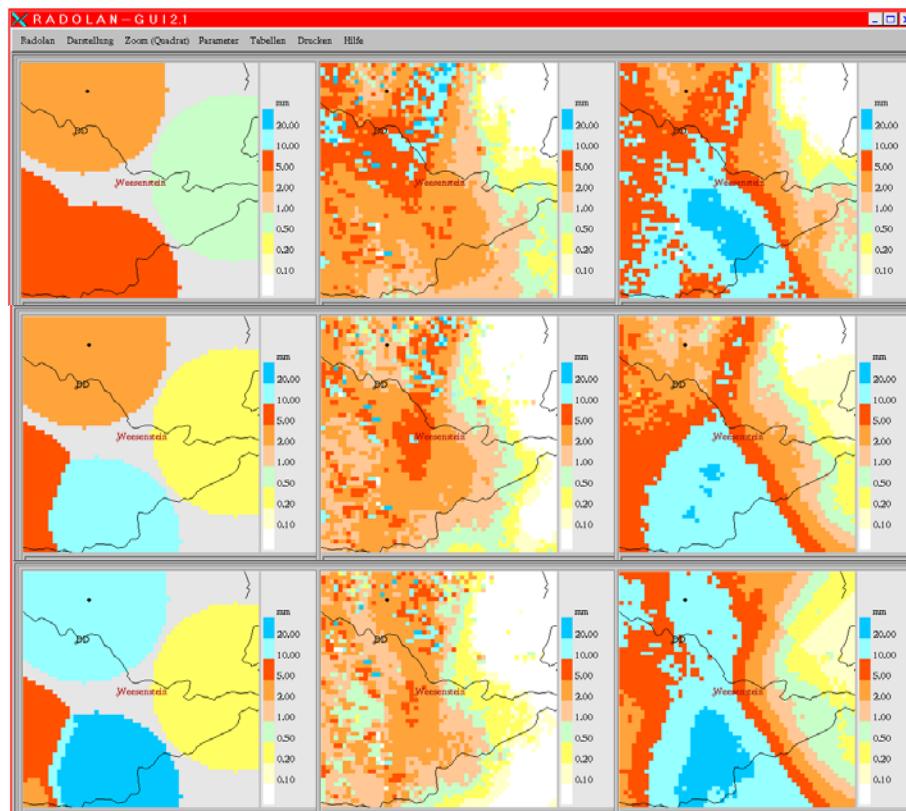


Abb. 4.31: Stündliche Niederschlagshöhen am 12.08.2002 für 12.50 UTC (obere Reihe), 13.50 UTC (mittlere Reihe) und 14.50 UTC (untere Reihe) im Gebiet von Weesenstein im Müglitztal; links: interpolierte Ombrometermessungen (Interpolationsradius: 20 km); Mitte: Original-Radarmessung; rechts: offline durchgeführte „Radar-Online-Aneichung“

Während die originären Radarniederschlagsmessungen den Niederschlag insbesondere zum Kamm des Erzgebirges hin deutlich unterschätzen, wird durch die Aneichung – obwohl nur drei Stationen in diesem Gebiet zur Verfügung stehen – die relativ kleinräumige Niederschlagsintensität sehr gut wiedergegeben: So summieren sich allein in den hier gezeigten drei aufeinanderfolgenden Stunden die lokalen Niederschläge auf über 60 mm, womit die Wiederkehrzeit von einmal in 100 Jahren übertroffen wurde.

Die auf einem Rechner als Filmlauf visualisierbaren fünf-minütlichen Radarniederschlagskompositen (Abb. 4.32: RZ-Produkt, jeweils im ca. 30 km * 30 km großen Ausschnitt um Weesenstein) der zwei Stunden von 12.00 bis 13.55 Uhr UTC am 12.08.2002 zeigen - auch nicht-angeeicht -, dass das Müglitztal besonders intensiv von diesem Niederschlagsereignis erfasst worden ist. Das im gezeigten Beispiel von 12.20 UTC zu sehende lokale Maximum des Niederschlagsfeldes zieht in der nächsten halben Stunde über Weesenstein hinweg südwärts in das Erzgebirge und bleibt in dessen Luv längere Zeit liegen.

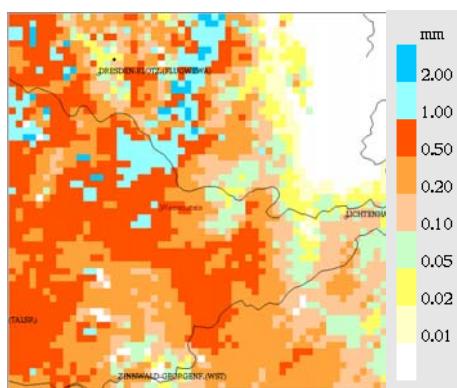


Abb. 4.32: Ausschnitt des RZ vom 12.08.2002 um 12.20 UTC ([Animation per Mausklick](#))

4.3.2 Methoden der Niederschlagsverifikation

Im Teilprojekt „RADAR-Verifikation“ muss eine Verifikation von Niederschlagsvorhersagen mit angeeichten quantitativen Radarniederschlagsdaten durchgeführt werden.

Hierzu erfolgte in einem ersten Schritt eine Auswahl von historischen, hochwasserrelevanten Starkniederschlagsereignissen. In einem zweiten Schritt wurden die Starkniederschlagsereignisse nach dem RADOLAN-Verfahren angeeicht und die dafür zu Grunde liegenden DX-Komposit-Daten für eine Anwendung in der LM-Vorhersage und im RADAR-Nowcasting bereitgestellt (s. Abschnitt 4.3.1). Im Teilprojekt 1 „LM-Kürzestfrist“ erfolgt mit diesen Daten eine Berechnung von quantitativen LM-Niederschlagsvorhersagen. Eine quantitative Radarniederschlagsvorhersage wird mit diesen Daten im Rahmen des Teilprojekts 2 „RADAR-Nowcasting“ erstellt. Die Qualität dieser Vorhersagen ist dann mit Hilfe der angeeichten Radarniederschlagsdaten im dritten Schritt zu verifizieren. Die hierfür notwendigen Methoden der Verifikation sollen zunächst im Rahmen eines fachlichen Feinkonzept für die Durchführung dieser Verifikation ausgearbeitet werden.

Die Ausarbeitung des fachlichen Feinkonzepts erfolgt dabei in den folgenden Schritten:

1. Vertiefende Einarbeitung in die Aufgabenstellung.

2. Zusammenstellung von Verifikationsverfahren und -maßen aus zur Verfügung gestellter Fachliteratur, aus meteorologischen Bereichen mit ähnlicher Aufgabenstellung und aus Vorschlägen von Fachleuten.
3. Bewertung der Zusammenstellung im Hinblick auf die Aufgabenstellung und die Frage der Differenzierung der Verfahren für die Verifikation der LM-Niederschlagsvorhersagen und der Vorhersagen aus dem RADAR-Nowcasting.
4. Auswahl geeigneter Verifikationsverfahren und -maße.
5. Nachvollziehbare Beschreibung der ausgewählten Verifikationsverfahren und -maße als Grundlage für die spätere Realisierung.
6. Definition der für die Verifikationsverfahren und -maße benötigten Datenbasis.
7. Ausarbeitung und Beschreibung der empfohlenen Vorgehensweise.
8. Zeitplanung für die Durchführung der Verifikation.

Das vorzulegende fachliche Feinkonzept beinhaltet schließlich die Beschreibung der Verfahren und Maße, die benötigte Datenbasis, die empfohlene Vorgehensweise und die Zeitplanung. Bei der Erstellung des fachlichen Feinkonzeptes werden insbesondere die Vorschläge der LAWA zu einer hochwasserbezogenen Verifikation vom 17.11.2004 berücksichtigt. Die Ausarbeitung des fachlichen Feinkonzeptes ist bis zum 30.11.2005 geplant.

4.3.3 Verifikation der Niederschlagsvorhersagen aus dem LMK und dem RADAR-Nowcasting mit angeeichten quantitativen Radarniederschlagsdaten

Den Modellierergruppen waren als Input-Datensätze stündliche angeeichte quantitative Radarniederschlagsdaten für die hochwasserrelevanten Starkniederschlagsereignisse zur Verfügung gestellt worden. Die Umsetzung des unter Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Feinkonzepts in die eigentliche Verifikation der Niederschlagsvorhersagen als Output aus dem LMK-Modell und aus dem RADAR-Nowcasting-Verfahren ist Ziel des prä-operationellen Betriebs bzw. des experimentellen Testbetriebs. Verknüpft damit ist eine Bewertung der jeweiligen Vorhersagegüte und eventuell notwendiger Anpassungsarbeiten. Voraussetzung ist allerdings die Freigabe der Abschlussrate aus dem Länderfinanzierungsprogramm Wasser und Boden der LAWA für RADVOR-OP.

5 Ausblick auf zukünftige Arbeiten

5.1 Entwicklungen im Bereich der LM-Kürzestfrist

In diesem Abschnitt werden die Planungen zur weiteren Entwicklung des LMK bis zu seiner für Ende 2006 geplanten operationellen Einführung und der für dieses Modell geplante Vorhersagezyklus dargestellt.

In der Maßnahme Radardaten des AP2003 wird im Zuge der Entwicklung von Erkennungsverfahren für Falschechos bzw. „Nicht-Niederschlagsechos“ auch an einer Bereitstellung eines Qualitätsprodukts für die DX-Radardaten gearbeitet. Dieses Qualitätsprodukt soll so genannte „Qualitätsflags“ für jeden Pixel des Radarprodukts enthalten. Für jeden Radarpixel sollen dann Informationen darüber vorliegen, ob an diesem Radarpixel zum vorliegenden Zeitpunkt überhaupt eine Reflektivitätsmessung vorliegt, und wenn ja, ob diese möglicherweise durch Erkennungsverfahren für Falschechos als zweifelhaft bewertet wird. Da in diesem ersten Schritt vorrangig noch keine Korrekturverfahren für Falschechos entwickelt werden sollen, bleiben die eigentlichen Radardaten fehlerbehaftet. Mit Hilfe des an jedem Radarpixel mitgelieferten Qualitätsflags können dann aber trotzdem innerhalb der Datenassimilation als fehlerhaft erkannte Radar-Niederschlagsraten weniger stark berücksichtigt oder ganz ausgeschlossen werden. Dafür soll eine Transferfunktion erstellt werden, die die Qualitätsflag-Informationen auf das in der Gleichung für den analysierten Niederschlag RR_{ana} auftretende Gewicht abbildet.

Das zuletzt beschriebene Arbeitspaket „Qualitätsprodukt und Gewicht für den analysierten Niederschlag“ ist somit auch ein Aufgabenpunkt in der Maßnahme „Wirkungsweise Latent Heat Nudging“ bzw. LHN allgemein. Weitere kurzfristig geplante Entwicklungen für das Gebiet „Datenassimilation für das LMK“ wurden bereits in Abschnitt 4.1.6 aufgeführt. Langfristig muss darüber nachgedacht werden, ob noch weitere Radarinformationen wie z.B. Radialwinde in das LMK assimiliert werden können und sollen. Untersuchungen von Xiao et. al. (2004) zeigen, dass innerhalb eines variationellen Assimilationsverfahrens die gleichzeitige Nutzung von Reflektivitäten und Radialwinden zu einer verbesserten Vorhersage führen als bei alleiniger Verwendung der Reflektivitätssensoren.

Im Bereich der Numerik und Dynamik des LMK stehen Weiterentwicklung und Test eines 3D-Turbulenzschemas an, dessen Verwendung im operationellen LMK noch nicht feststeht. Weitere Aufgaben bestehen noch im Test einer modifizierten vertikalen Schichteneinteilung und in der Entwicklung und Implementierung eines expliziten Schemas zur Berechnung der Vertikaladvektion. Diese beiden Punkte werden auch Auswirkungen auf die Simulation von Konvektion und Niederschlag haben.

Im Bereich der Parametrisierungen wird es Tests zu alternativen Aufrufstrategien des an sich unveränderten Strahlungsschemas geben. Dieses wird eventuell im LMK viertelstündlich, dafür aber nur an jedem zweiten Gitterpunkt aufgerufen werden, im Gegensatz zum stündlichen Aufruf an jedem Gitterpunkt im LM oder LME.

Wichtige Meilensteine im Projekt LMK sind der Start von Testsuiten im 3. Quartal 2005, die in die Datenassimilation für das LMK auch das LHN-Verfahren aufnehmen, die Aufnahme

eines präoperationellen Testbetriebs im 1. Quartal 2006 und schließlich die operationelle Einführung von LMK Ende 2006.

An dieser Stelle soll noch einmal der für das LMK vorgesehene Vorhersagezyklus dargestellt und erläutert werden. In Abb. 5.1 kann man sich die unten dargestellte Zeitleiste (x-Achse) als fortlaufenden Assimilationsprozess vorstellen. In jeweils 3-stündigen Zeitabschnitten werden die aktuellen Beobachtungsdaten assimiliert (z.B. von 00 UTC bis 03 UTC, von 03 UTC bis 06 UTC usw.). Zu den Analysezeitpunkten 00 UTC, 03 UTC, 06 UTC usw., zu denen der jeweils vorlaufende 3-stündige Assimilationslauf abgeschlossen ist, werden die LMK-Vorhersagen gestartet. Diese werden in Abb. 5.1 durch die schräg von links unten nach rechts oben verlaufenden Pfeile symbolisiert. Für einen gegebenen Zieltermin (z.B. 12 UTC, dargestellt durch die vertikal angebrachte gestrichelte Linie) hat man somit bis zu sechs Vorhersagen zur Verfügung, die alle nicht älter als 18 Stunden sind. Die jüngste und damit aktuellste Prognose für den 12 UTC Termin ist die 3-Stunden Vorhersage des 9 UTC Laufs, die vermutlich im operationellen Betrieb ab 10 UTC bereit stehen würde. Zu diesem Zeitpunkt kennt man aber bereits die 6-Stunden Vorhersage des 06 UTC Laufs für 12 UTC, die 9-Stunden Vorhersage des 03 UTC Laufs für 12 UTC, usw. Aus allen diesen Vorhersageläufen lässt sich somit ein so genanntes „Lagged Average Forecast Ensemble“ (LAF-Ensemble) bilden. Man könnte also auf ein Ensemble von 6 zeitlich versetzt gestarteten Vorhersageläufen zurückgreifen und darauf bereits bekannte und getestete Ensemble-Techniken anwenden. Damit ließen sich Produkte wie Mittelwerte oder Wahrscheinlichkeiten für die Überschreitung bestimmter Schwellenwerte berechnen.

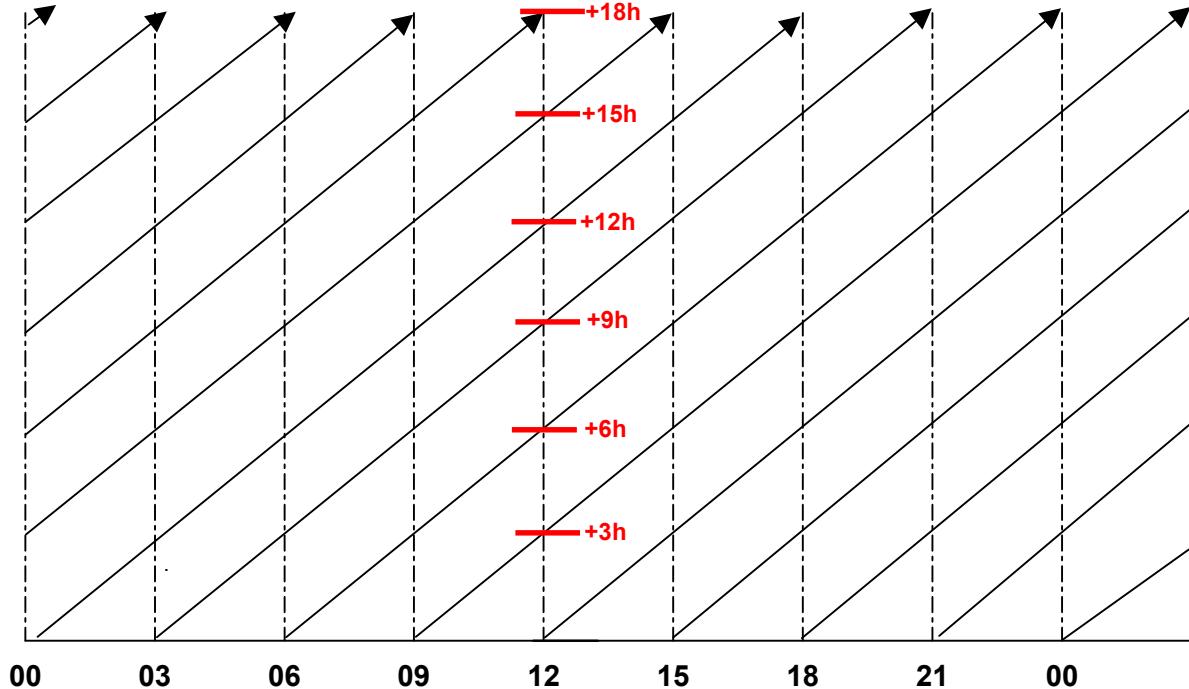


Abbildung 5.1: Vorhersagezyklus LMK und LAF-Ensemble-Konfiguration.

5.2 Entwicklungen im Bereich des RADAR-Nowcasting

5.2.1 Weiterentwicklung des konvektiven Moduls

Ein hydrologisch bedeutsames Niederschlagsereignis lässt sich eher selten auf eine klare Verlagerung von A nach B konzentrieren. Das bisherige Modul versucht die Niederschläge höchster Intensitäten mit den spezifischen Verlagerungen bestmöglich zu prognostizieren - und dies vor dem Hintergrund kürzester Reaktionszeiten.

Die Vorstellung von verschiedenen Zellstadien erfordert eine größtmögliche Aktualität mit ggf. typischen Lebenszyklen. Die Trendaussage bzgl. der jüngsten Zellkernänderung ist vielleicht bei Zellabschwächung nutzbar. Auch der jeweils schärfste Echogradient ist bestenfalls als Anzeichen für ein Jung- bzw. Reifestadium der Zelle nutzbar (Abb. 5.2).

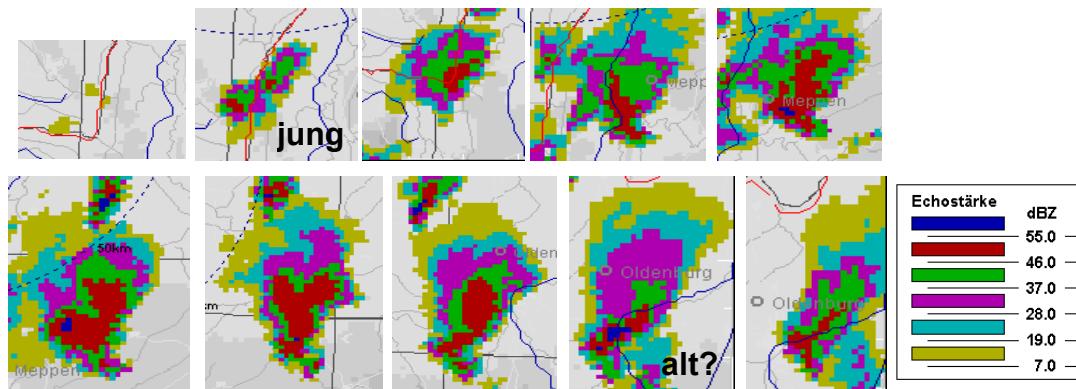


Abb. 5.2: Zur Frage von typischen prognostizierbaren Zellstadien und -abläufen: Beispiel einer individuellen starken Zelle, Emden 18.6.2002, 15:10-17:00 UTC (Endstadium außerhalb des Bereiches)

In einem Prognosezeitraum von einer Stunde bilden sich Zellen neu oder lösen sich auf. Selbst wenn die Zugbahn noch verbessert wären, bleibt die Unsicherheit der Fortdauer der erkannten Zelle für 1h. Ein sicheres (dann aber spätes) Auflösungsanzeichen einer Zelle wäre ein Schritt in die richtige Richtung. Neubildungen sind vorerst nicht vorhersagbar. In diesem Sinne wäre auch ein Anzeichen für Verlangsamung oder Stillstand als solches wichtiger als ein genauerer Vektor.

Denkbar wäre, dauerhafte, bzw. stark geglättete Systeme zu verlagern und zu akkumulieren. Naheliegend wäre es, die erwartete Punktgenauigkeit (das Aneichkonzept "Prognose" unterstreicht dies) für die hydrologische Modellierung seitens der meteorologischen Datenlieferanten zu entspannen, um Verifikationsmisserfolge zu relativieren.

Eine weitere Problematik bleiben die Vektoren in und von Zellverbänden, wo die einzelne Zelle anders zieht als der Verband. Dies könnte auch Beispiel für zu erwartende Unterschiede von Musterverfolgung und Zellverfolgung sein. Die Summenabweichungen werden im stratiformen Modul häufig geringer sein.

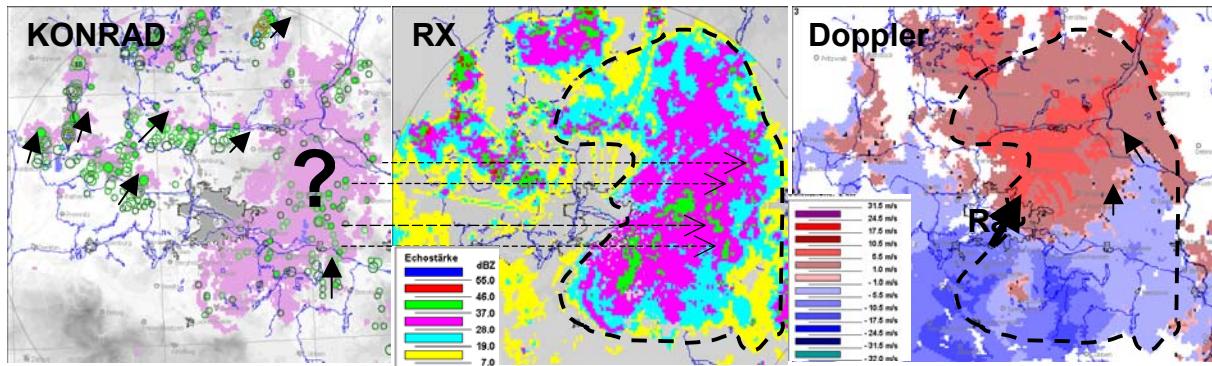


Abb. 5.3: Verlagerungsspur und -pfeile von "freien" Schauerkernen (grüne Punkte) ~10mm/h (KONRAD) gegenüber integrierten diffusen Schauerkernen (Regengebiet in RX, Mitte) sowie dem Doppler-Radialwindfeld mit Windpfeilen und gebietsweisen Richtungsfarben blau (zum Radar) und rot (vom Radar weg), Berlin 14.6.05, 18:24 UTC

Die Vorstellung, schwache Zellkerne in Form von Schauerkernen in Regengebieten als Marker zu benutzen, wurde schon in KONRAD mit den sog. Sekundärzellen eingebracht, mit unterschiedlichem Erfolg bzgl. der Zugbahnen (Abb. 5.3). Dabei zielt das Auge auf kleine und isolierte Schauer als Tracer ab.

Der Übergang zur Musterverlagerung wird bei schwachkonvektiven Feldern erforderlich sein. Hier kann das Doppler-Windfeld der 3km-Schicht bei der Strukturverlagerung die grobe Richtung und Mindestgeschwindigkeit bestimmen helfen und damit Fehler eingrenzen (Abb. 5.3).

Als Fazit ist noch einmal festzustellen, dass die Nicht-Verlagerung meist Ursache für ein hydrologisch bedeutsames Niederschlagsereignis ist und nicht eine genaue Verlagerung unter glatten Strömungsvektoren. Somit ist auch die Verlagerungsverbesserung nicht das eigentliche Thema, sondern die Erkennung der Stagnation.

5.2.2 Weiterentwicklung des stratiformen Moduls

Neben einem ständigen Qualitätsmanagement und der Überwachung des operationellen Betriebs sind folgende Weiterentwicklungen angedacht:

1. Eine Detailverifikation der abgeleiteten Niederschlagsraten im hochaufgelösten Lindenberger Niederschlagsmessnetz
2. Die Einbeziehung von Blitzortungsdaten in die Verlagerung und die Niederschlagsabschätzung und Aufbau eines automatisierten Warnmanagements
3. Experimente zur Niederschlagsmodellierung in Lagrangescher Betrachtungsweise zur Abschätzung der weiteren Entwicklung bei erzwungener Hebung und Konvektion
4. Die Aneichung des PI-Europakomposites (wegen der räumlich wesentlich weiter ausgreifenden Abdeckung) als Rückfallposition

Zu 1.: Seit dem DWD Projekt LITFASS werden am Meteorologischen Observatorium in Lindenberg neben den bodengebundenen Fernerkundungssystemen (Windprofiler, Radiometer, Wolkenradar, Mikrowellenradiometer) auch verschiedene kleinräumige Messnetze zur Erfassung der Energie- und Wasserbilanz betrieben (sowie weitere Messtechnik wie ein 100-Meter-Mast, Fesselballons, ein Ombrometer usw.). Lindenberg dient dabei als Referenzstandort im Rahmen nationaler und internationaler Projekte, als Vorbereitungsstation für die Einführung neuer operationeller Messverfahren sowie als Datenlieferant für andere DWD-Projekte. In der Abbildung 5.4 werden in Grün die Pluvio-Messgeber, in Blau die Pegelmesser und in Rot die Energiebilanzmessstellen bzw. eine Szintillometerstrecke dargestellt. Die Größe des Gebietes beträgt ca. 20 x 20 Kilometer. Durch diese hohe Auflösung ist es möglich, Konvektionszellen in ihrer Feinstruktur zu erfassen.

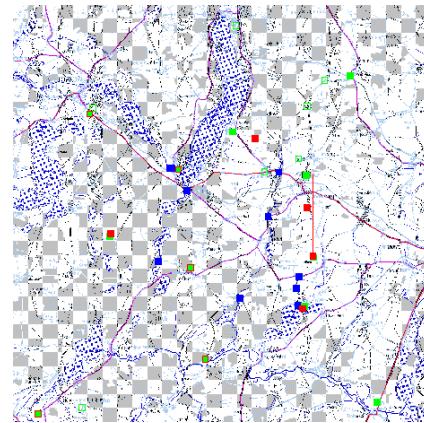


Abb. 5.4: Lindberger Forschungs-Messnetz

Zu 2.: Als Beispiel für eine Kombinationsdarstellung von Radarechos und Blitzortungsdaten sei der 29.07.2005, 10:45 UTC nebст 2h-Vorhersage (Abb. 5.5) angeführt. Die Gebiete in Rot und Violett stehen für bestimmte Werte der horizontal integrierten elektrischen Feldstärke. Aus diesen können dann unmittelbar Landkreiswarnungen für die nächsten 2 Stunden abgeleitet werden. Es sind auch statistische Untersuchungen hinsichtlich einer modifizierten Z-R-Beziehung in Abhängigkeit von der Feldstärke vorstellbar.

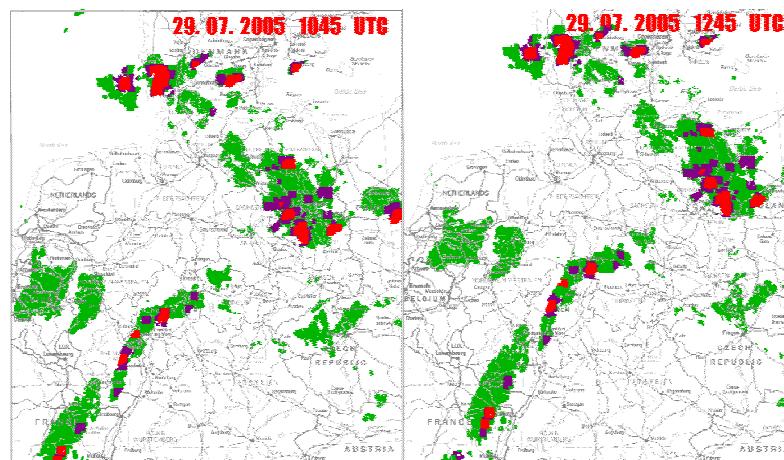


Abb. 5.5: Radar- und Blitzdatenanalyse am 29.07.05, 10:45 UTC (links) und 2h-Vorhersage (rechts)

Zu 3.: Es sei auf Nimrod sowie diverse Proceedings zur Nowcastingproblematik hingewiesen. So kann beispielsweise der Verlagerungsvektor – kombiniert mit einer detaillierten Topographie und einer Temperaturangabe zur Abschätzung des sättigungsbedingten Ausfalls von Niederschlag herangezogen werden. Auch der Einbau des Kessler-Schemas zur kompletten Niederschlagsparametrisierung könnte erfolgversprechend sein.

Zu 4.: Als Beispiel ist eine Vorstudie zur Hochwassersituation ab dem 20. August 2005 angeführt. Dargestellt ist die 24-stündige Niederschlagsverteilung vom 22.08.05, 06 UTC bis 23.08.05, 06 UTC einer aus dem 15 minütigen Europa-Radarkomposit (PI) grob abgeschätzten Niederschlagsrate (s. Abb. 5.6). Diese kann mit 24-stündigen synoptischen Niederschlagsraten (und weiter verfeinert über 12-, 6- und 3- bis zu 1-stündigen Meldungen) angeeicht werden. Eventuell wird eine zeitlich übergreifende Technik notwendig sein. Zu diesem Tag ist auch anzumerken, dass PI vom Ausfall des Radarstandortes bei München nicht beeinflusst war, da alle benachbarten Radars funktionsfähig waren.

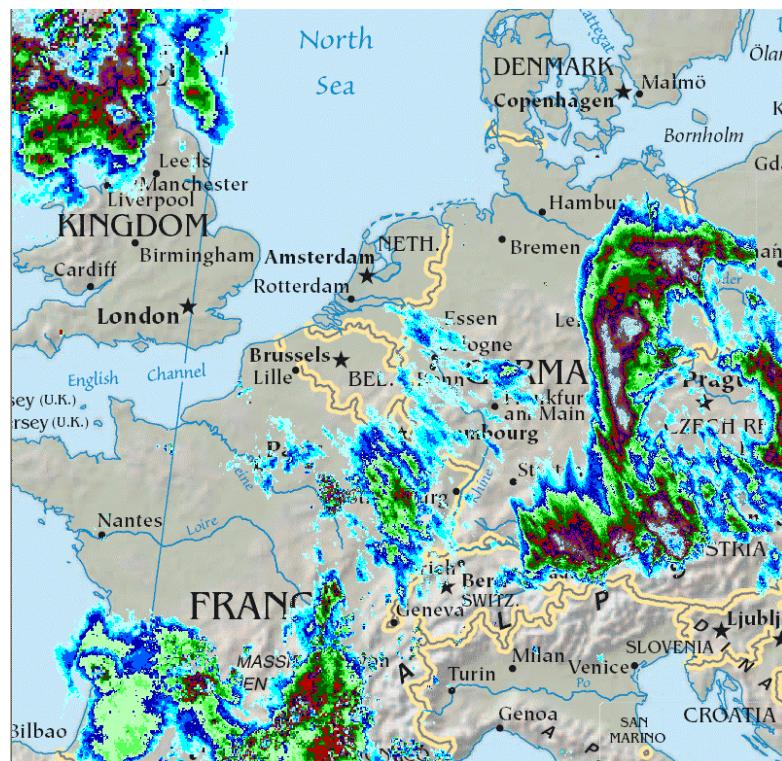


Abb. 5.6: 24-stündige Niederschlagsverteilung vom 22.08.2005 aus dem PI-Radarkomposit

5.2.3 Verlagerung mittels LM-Windfeldern

Das Modul zur Verlagerung von Niederschlagsmustern des Radarkomposit mit LM-Winden stellt eine Ergänzung zu den Modulen zur linearen Verlagerung in RADVOR-OP dar. Die Entwicklung des neuen Verlagerungsmoduls ist Teilaufgabe in der Maßnahme 13 des Projekts 3 des Aktionsprogramms 2003 am DWD. Der Projektstrukturplan sieht folgende in Tabelle 5.1 aufgeführte Punkte vor:

Teilaufgabe / Meilenstein	Kurzbeschreibung
Synergie RADVOR-OP Trackingverfahren 3 LM-Windfeld	Einarbeitung in Radarmeteorologie Verlagerung von Radarbildern mit LM-Winden: Datenbank-Retrieval der Windfelder; Kollokation LM-Wind mit Radarpixeln (Höhe, Position); Aufbau der operationellen Kette
Trackingverfahren 4 Vergleich der Verfahren	Vergleich der Radar-Trackingverfahren Rosenow / LM-Wind; Konzeption des Übergangs Rosenow - LM-Wind; Programmierung; Dokumentation der Ergebnisse; Implementation des Verfahrens in die operationelle Kette
Schnittstellen	Tracking: Schnittstellen zu M18 und NinJo einrichten und operationell bedienen
Dokumentation	Dokumentation Trackingverfahren und Schnittstellen

Tabelle 5.1: Ausschnitt aus dem Strukturplan der Maßnahme 13, Projekt 3 des Aktionsprogramms 2003, Stand 01.07.2005.

Eine vollständige Eingliederung in das Projekt RADVOR-OP war dabei zeitlich nicht möglich. Dieser Abschnitt stellt daher aus Sicht des AP2003 einen Zwischenbericht dar. Die bisher erreichten Ziele umfassen die Entwicklung und softwaretechnische Umsetzung des neuen Verlagerungsmoduls mit LM-Windfeldern, sowie erste Anwendungstests. Probleme, die in der Entwicklungsphase auftraten und gelöst wurden, umfassen die notwendige Entwicklung einer effizienten Clutterfilterung, sowie die Bereitstellung eines divergenzfreien Verlagerungswindfeldes. Beide Verfahren werden näher erläutert.

Das Modul

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Nowcastingmoduls, welches Niederschlagsmuster mit einem LM- (oder LMK-)Windfeld (Doms, 1999, 2004) verlagert und somit eine zeitlich und räumlich variable Verlagerung ermöglicht. Man erhofft sich dadurch eine mögliche Verlängerung der Vorhersagezeit der Nowcastingmodule von bisher ein (KONRAD) bis zwei (Rosenow) auf ca. vier Stunden.

Eingabedaten sind das Deutschlandkomposit des precipitation scans, die sogenannten RZ-Daten, die mit einer verfeinerten Z-R-Beziehung in Niederschlagshöhen umgerechnete Werte beinhalten. Die Daten werden effizient von Clutterpixeln befreit (s. *Clutterfilterung*).

Das Verlagerungsvektorfeld wird aus der Windvorhersage des LMs gewonnen. Hierzu wird das horizontale Windfeld der aktuellen LM-Vorhersage aus einem bestimmten Drucklevel verwendet. Das am besten geeignete Druckfeld wird im Rahmen von Testläufen mit den im Projekt RADVOR-OP zur Verfügung stehenden Testfällen ermittelt. Um die Entstehung unrealistischer Muster, wie z. B. neuer Maxima, zu verhindern, wird das Windfeld divergenzfrei gemacht (s. *Divergenzen des Windfeldes*). In jedem Zeitschritt des Advektionsschemas wird das entsprechende Windfeld durch Interpolation der Stundenwerte ermittelt. Die Verlagerung des Niederschlagsmusters erfolgt mit dem zweidimensionalen Eulerschen Advektionsschema von Bott [1989, 1992, 1993], welches eine nahezu diffusionsfreie Verlagerung der Niederschlagsfelder garantiert. Der Zeitschritt wird unter

Berücksichtigung des Courant-Friedrich-Lévy-Kriteriums in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit berechnet. Die Rechenzeit für eine Vorhersage von 4 Stunden beträgt in der momentanen Entwicklungsstufe etwa zwölf Minuten für den zeitkritischen Anteil.

Clutterfilterung

Die Verlagerung von Niederschlagsradardaten mit einem Eulerschen Advektionsschema verursacht naturgemäß numerische Diffusion. Das verwendete Advektionsschema von Bott (1989, 1992, 1993) zeigt in der Verlagerung der Niederschlagsfelder nur eine sehr geringe Diffusion. Für Clutterpixel, die als singuläre Pixel mit sehr hohem Wert auftreten, ist dieses jedoch nicht gewährleistet. Als Folge davon verschmieren die Punktwolken in den Ausgangsdaten zu kleinräumigen Gebieten, die vom Betrachter fälschlich als konvektive Zellen missinterpretiert werden könnten. Aus diesem Grund sind clutterfreie Eingabedatensätze eine Voraussetzung für die Anwendung des Verlagerungsmoduls. Da z. Z. die Filterungen so passiv angewendet werden, dass alle Niederschlagsdaten erhalten bleiben, die Clutterpixel jedoch nicht vollständig beseitigt werden, bestand die Notwendigkeit, eine effektivere Clutterfilterung zu entwickeln und dem Modul vorzuschalten. Eine teilweise Eliminierung kleinräumiger Niederschlagsstrukturen wird dabei billigend in Kauf genommen, da eine Verlagerung derartiger Strukturen über einen längeren Zeitraum nicht sinnvoll ist. Ob in Zukunft eine derartige komplettte Filterung vorgezogen und für bestimmte Anwendungen zur Verfügung gestellt wird, um z. B. auch im Bereich des Nudging einen realistischeren Input zu gewährleisten, ist noch in Diskussion.

Die Methode basiert auf der Annahme, dass Clutterpixel als Punktwolke einzelner Pixel auftreten, d. h. die Falschpixeldichte in einem bestimmten Umgebungsbereich ist relativ niedrig. Abbildung 5.7 zeigt eine Anhäufung von Clutterpixeln am Beispiel Ummendorf am 18.08.2004. Folgender Ansatz wurde entwickelt: Besitzen in einem 31 Pixel x 31 Pixel – Umgebungsquadrat mehr als 85% der Pixel einen Wert, der kleiner als 45% des zentralen Pixels ist, so wird dieses Pixel als Clutterpixel markiert. Sein Wert wird anschließend auf den Mittelwert aller unmarkierten Datenpixel im Umgebungsquadrat gesetzt. Sind im Umgebungsquadrat keine Datenpixel (Pixel, die einen bestimmten Schwellenwert überschreiten; dieser liegt z. Z. bei 0,01 mm/h) vorhanden, so erhält das Pixel den Wert Null. Mit diesem Verfahren lassen sich sehr effektiv Clutterpixel erkennen und entweder entfernen oder dem Niederschlagswert des Hintergrunds anpassen. Beispiele hierfür sind in den

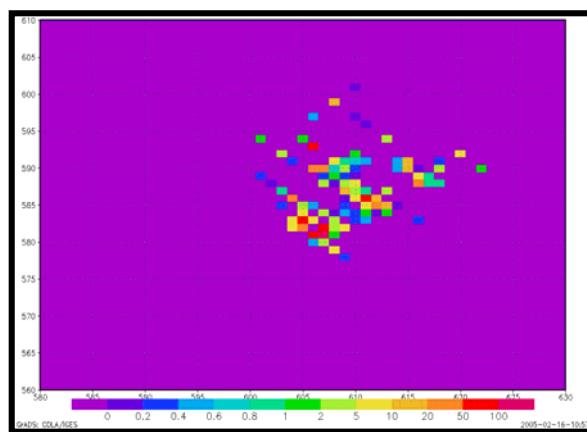


Abbildung 5.7: Clutterpixel im Bereich des Radarstandortes Ummendorf am 18.08.2004.

Abbildungen 5.8 und 5.9 dargestellt. Abbildung 5.8 (links) zeigt das RZ-Produkt für den 18.08.2004. Man erkennt deutlich die Vielzahl der Clutterpixel im niederschlagsfreien Bereich. Abbildung 5.8 (rechts) zeigt am Beispiel des 08.07.2004 den Bereich Ummendorf, der von einem Niederschlagsfeld überdeckt ist. Abbildung 5.9 zeigt die Ergebnisse nach der Clutterfilterung. In Abbildung 5.9 (links) sind die Clutterpixel vollständig eliminiert worden, wohingegen das Niederschlagsfeld nahezu unberührt blieb. In Abbildung 5.9 (rechts) ist das Ergebnis der Clutterfilterung unter dem Einfluss eines Niederschlagsgebiets gezeigt. In diesem Fall wurden die Clutterpixel durch den Mittelwert der Datenpixel ersetzt und somit dem Niederschlagsfeld angepasst.

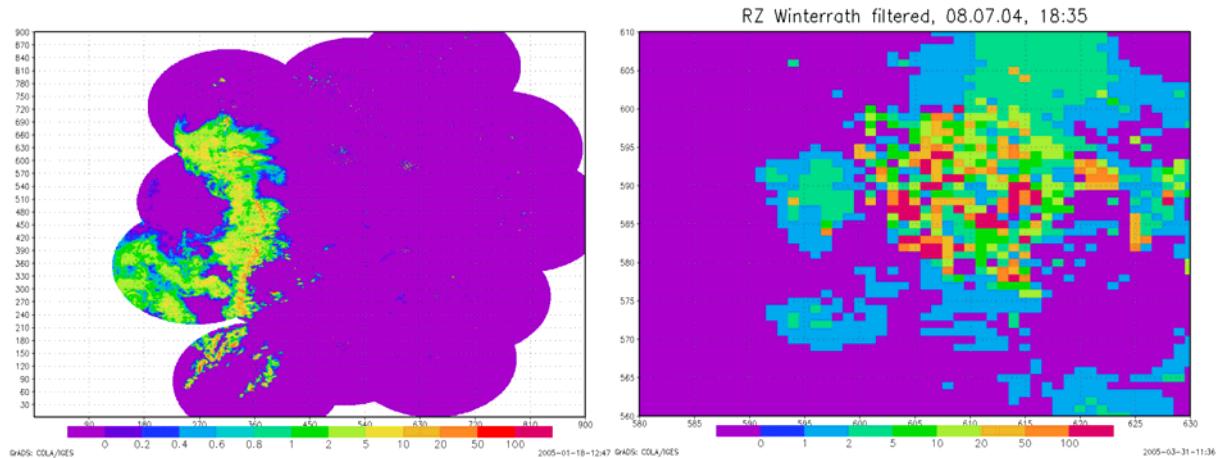


Abbildung 5.8: Clutterpixel im Deutschlandkomposit (links) am 18.08.2004 und innerhalb eines Niederschlagsfeldes im Bereich des Radarstandortes Ummendorf (rechts) am 08.07.2004.

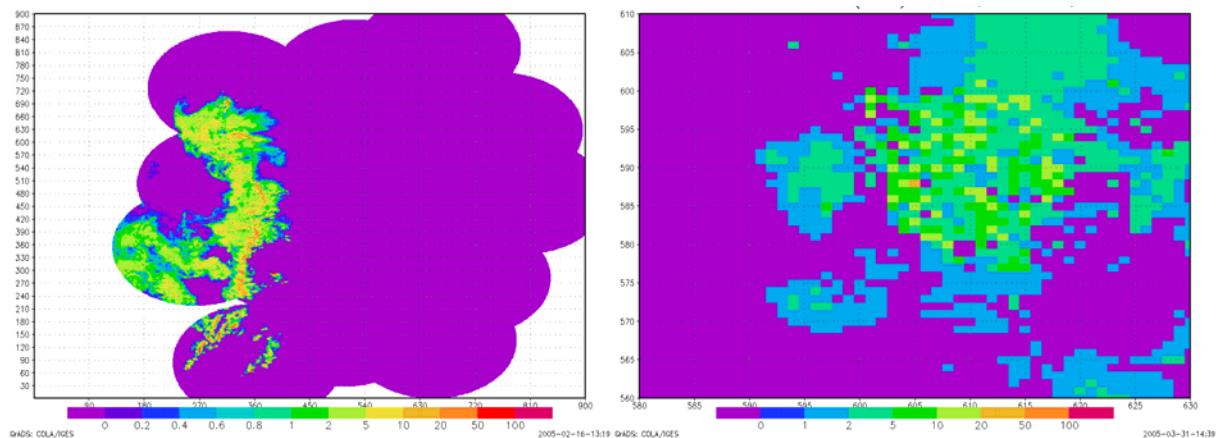


Abbildung 5.9: wie Abb. 5.8, nach Clutterfilterung

Divergenzen des Windfeldes

Eine grundsätzliche Annahme, auf der das Modul basiert, ist, dass die Verlagerung eines Niederschlagsfeldes mit dem horizontalen Windfeld korreliert ist. Diese Annahme ist eine starke Vereinfachung der wirklichen Vorgänge. Mikrophysikalische und vertikale dynamische Prozesse führen zu einer ständigen Veränderung des Wolken- und damit des

Niederschlagsfeldes. Konvergenzen im horizontalen Windfeld, die in der Realität eine vertikale Verlagerung der Luftmasse und mikrophysikalische Prozesse auslösten, verursachten im Modul eine Stauchung des Niederschlagsfeldes und eine Erhöhung der Niederschlagsrate, die weiterhin verlagert würde. Da eine Parametrisierung der mikrophysikalischen Prozesse nicht vorgesehen ist, muss, um eine derartige unrealistische Bildung neuer Extremwerte zu unterbinden, die Divergenzfreiheit des Verlagerungswindfeldes vorausgesetzt werden.

Die Divergenzfreiheit wird über die Minimierung folgender Funktion erreicht [Sherman, 1978]:

$$E(u, v, \lambda) = \int_A \left[\alpha_u^2 (u - u^0)^2 + \alpha_v^2 (v - v^0)^2 + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] dx dy, \quad (5.1)$$

wobei u, v die neuen, u^0, v^0 die Ausgangswindkomponenten, α_u, α_v , Gauß precision moduli und λ Lagrange-Multiplikatoren sind. Unter der Annahme $\alpha_u = \alpha_v$ fällt die Abhängigkeit von α_u und α_v heraus. Die Minimierung der Funktion ergibt als Lösung das divergenzfreie Windfeld, welches die geringste quadratische Abweichung in den Windkomponenten vom Ausgangswindfeld aufweist. Als iterative Lösungsmethode wurde Successive-Over-Relaxation mit Chebyshev-Acceleration gewählt [Press, 1994].

Das Modul zur Erstellung eines divergenzfreien horizontalen Windfeldes kann aus dem zeitkritischen Modell extrahiert und vorgezogen und, sobald die Modellvorhersagen des LMs vorliegen, angewendet werden.

Ergebnisse

Abbildungen 5.10 und 5.11 zeigen das RZ-Produkt am 18.08.2004 um 22:00 mit überlagertem Windfeld in 500 hPa sowie das Ergebnis einer zweistündigen Verlagerung mit dem divergenzfreien Windfeld. Die Wahl der Druckfläche resultiert aus der besten Übereinstimmung der Vorhersage mit den gemessenen Radardaten für den hier gezeigten Testfall. Die Farbskala gibt die Niederschlagsrate an, wobei lila den Wert Null symbolisiert.

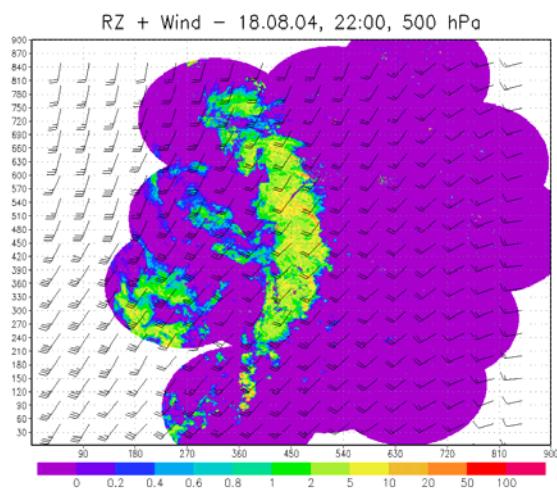


Abbildung 5.10: RZ-Produkt am 18.08.04, 22:00; LM-Windfeld in 500 hPa

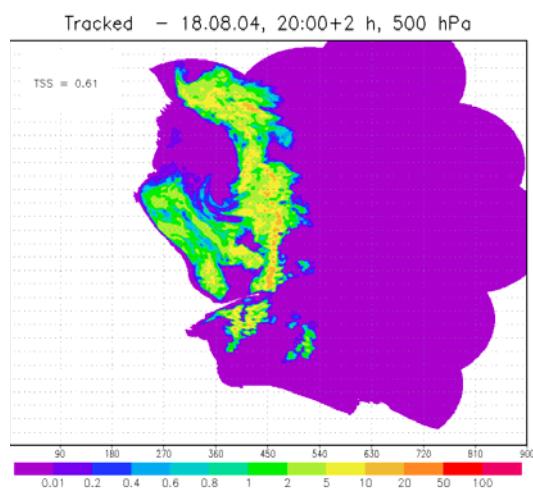


Abbildung 5.11: Zweistündige Vorhersage für den 18.08.04, 22:00; TSS = 61%.

Die weißen Flächen liegen außerhalb des Messbereichs des Radarverbunds. Die Verlagerung greift auf das gesamte dargestellte Gebiet zu; daher wird auch die weiße Hintergrundmaske verlagert und definiert somit den Bereich, in dem keine Vorhersage getätigten kann. Im Beispiel zeigt sich, dass die Verlagerung des Niederschlagsgebiets nach Nordosten gut wiedergegeben wird. Die Auflösung bzw. Neubildung von Niederschlagsgebieten kann mit einem reinen Verlagerungsansatz naturgemäß nicht repräsentiert werden. Durch die Eliminierung der Clutterpixel und der Divergenzen des Windfeldes wird eine flächenerhaltende Verlagerung gewährleistet. Das Gütemaß TSS (True Skill Statistics) zeigt einen Wert von 61% und deutet damit auf eine gute potentielle Vorhersageleistung des neuen Moduls hin.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Maßnahme 13 im Projekt 3 des Aktionsprogramms 2003 wurde ein Teilprojekt des Radarnowcastings zur Unterstützung des Projektes RADVOR-OP durchgeführt. Es wurde ein neues Modul zur Verlagerung von Radarniederschlagsmustern mit einem LM-Windfeld entwickelt und softwaretechnisch umgesetzt. Um eine realitätsnahe Verlagerung zu gewährleisten, wurden eine effiziente Methode zur Clutterfilterung sowie ein Algorithmus zur Eliminierung von Divergenzen im horizontalen Windfeld entwickelt bzw. implementiert. Erste Testergebnisse deuten auf ein hohes Vorhersagepotential hin.

Der weitere Projektplan beinhaltet:

- eine Validierung des Programmcodes,
- die Gewährleistung einer externen Konfigurierbarkeit im Hinblick auf z. B. Ausgabefrequenz, Vorhersagezeiten,
- eine Aufteilung der Softwarekomponenten in zeitkritische und nicht-zeitkritische Anteile,
- die Bestimmung eines optimalen Höhenniveaus (bzw. einer Kombination mehrerer), aus dem (denen) das Verlagerungswindfeld extrahiert wird; dies beinhaltet die Definition eines geeigneten Gütemaßes,
- eine Verifikation des Moduls mit dem RADVOR-OP-Testdatensatz,
- einen Vergleich mit dem Rosenow-Verfahren (s. Abschnitt 4.2.5); auch hierzu ist die Festlegung eines geeigneten Gütemaßes gefordert, und
- den Aufbau der operationellen Kette.

Im Gegensatz zu dem linearen Extrapolationsverfahren von Rosenow werden im hier vorgestellten Modul Verlagerungsvektoren aus einer externen Quelle, dem LM, verwendet. Auf der anderen Seite kann eine zeitlich und örtlich variable Verlagerung, jeweils mit den aktuellen Vorhersagedaten, durchgeführt werden. Aus diesem Grund wird erwartet, dass das lineare Verfahren, welches die Verlagerungsvektoren aus der vergangenen Verlagerung direkt bestimmt, für die zeitnahe Vorhersage bessere Ergebnisse liefert, die Verlagerung mit den LM-Winden jedoch Vorteile bei den längeren Vorhersagezeiten besitzt. Sollte sich diese Hypothese im Vergleich der beiden Module bestätigen, so bestünde eine Aufgabe darin, den optimalen Übergangszeitpunkt in der Vorhersage zu bestimmen, an dem in der operationellen Kette der Übergang zum LM-Wind-Modul stattfindet. In diesem Fall würde die Vorhersage des Rosenow-Moduls zu besagtem Zeitpunkt als Ausgangsdatensatz für das LM-Wind-Modul dienen.

Als Ausgangsdatensatz des Verlagerungsmoduls bzw. der Hierarchie der Verlagerungsmodule war ursprünglich die Verwendung des RQ-Produkts geplant, d. h. der quasi-angeeichten RZ-Daten der Online-Aneichung. Da die Bereitstellung des RQ-Produkts jedoch nur zeitverzögert erfolgen kann, ist die zeitkritische Verlagerung (quasi-) angeeichter Radardaten z. Zt. nicht möglich. Die Verlagerungsprodukte werden wiederum im Kompositformat zur Verfügung gestellt werden. Die geplanten Bezeichnungen sind RV für die Vorhersage aus dem fünfminütlichen RZ-Produkt, sowie RS für die auf eine Stunde aufsummierten RV-Produkte.

5.2.4 Niederschlagsentwicklung auf der Basis des dreidimensionalen Radarproduktes

Die Nutzung dreidimensionaler Radardaten hinsichtlich der Niederschlagsentwicklung sollte sich nach bisherigen Erfahrungen mit dem PZC-KONRAD-Verfahren nicht darauf konzentrieren, ein weiteres eigenständiges Modul zu schaffen, sondern als Zusatzinformation in die Weiterentwicklung bestehender Module einfließen. Diesbezüglich sind zwei unterschiedliche Ansatzmöglichkeiten zu erkennen.

Das KONRAD-Verfahren beruht derzeit ausschließlich auf 2D-Radardaten. Es ist vorgesehen, zukünftig auch 3D-Radardaten zu nutzen, da sich mit diesen die Zellstruktur erkennen und Hinweise auf Tendenzen ableiten lassen. Nachteilig wirken sich hierbei die in Abschnitt 4.2.2 bereits angesprochenen zeitlichen Probleme aus, der durchschnittlichen Lebensdauer von Gewitterzellen zum einen und die zeitliche Verfügbarkeit der PZ-Daten zum anderen. Dennoch sollte sich mit einer Kombination zweid- und dreidimensionaler Daten eine Verbesserung quantitativer Vorhersagen erzielen lassen.

Auch bei der Quantifizierung in RADVOR-OP wäre eine Nutzung von 3D-Daten als Zusatzinformation denkbar. Anders hingegen als bei KONRAD existieren diesbezüglich noch keine konkreten Überlegungen zu einer zukünftigen Integration dieser Informationen. Auch dürften im Gegensatz zu letzterem Verfahren eher eine flächenhafte Aussage als Punktinformationen von Nutzen sein, wie sie in der im Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Tendenzabschätzung der Niederschlagsentwicklung bereits vorgestellt wurde. Bei einer Integration über größere Flächen wirkt sich die bei Betrachtung von Einzelzellen als nachteilig erkannte zeitliche Auflösung der PZ-Komposit-Daten weit weniger gravierend aus. Zu untersuchen wäre allerdings noch, welche Größe der Integrationsfläche am geeignetsten ist und in welcher Form die Zusatzinformationen am geeignetsten verwendet werden können. Anstelle einer rasterorientierten Vorgehensweise wäre auch ein objektorientierter Ansatz vorstellbar, wobei allerdings eine Mindestgröße der Objekte nicht unterschritten werden sollte.

Allgemein lässt sich bereits bei den PZ-Komposit-Daten ein Verbesserungspotenzial erkennen. Eine Verfeinerung der Auflösung hinsichtlich der Anzahl der Klassen von derzeit sechs auf 16 oder mehr dürfte technisch relativ einfach zu bewerkstelligen sein und stellt fachlich kein Problem dar. Zu überprüfen wäre hingegen, ob eine Angleichung der horizontalen Auflösung von derzeit 2 km • 2 km auf die Abmessungen der DX-Daten (1 km • 1 km) zu rechtfertigen wäre, oder ob die Dauer des volume scans bereits fachliche Grenzen setzt. Aus letzterem Grund dürfte auch eine Änderung der zeitlichen Auflösung an die des DX-Produktes – obwohl wünschenswert – aus technischer Sicht nicht möglich sein.

6 Schlussfolgerungen

Obwohl in allen drei Teilprojekten die zeitlichen Vorgaben durch die dreijährige Projektlaufzeit äußerst eng bemessen waren, ist ein positives Fazit zu ziehen. Die mittels quantitativer Radarniederschlagsanalysen erstellten Nowcasting- und Kürzestfristvorhersagen des Niederschlags zeigen in den in diesem Bericht vorgestellten Fallstudien, dass sich der eingeschlagene Weg den wasserwirtschaftlichen Vorgaben annähert.

Die bei den Assimilationsexperimenten für das LM-Kürzestfrist, das als neues lokales NWV-Modell in den operationellen Routinebetrieb eingeführt werden soll, erzielten Ergebnisse lassen eine spürbare Verbesserung der Niederschlagsvorhersage in den ersten drei Stunden erwarten. Die noch ausstehenden Arbeiten werden vom Aktionsprogramm 2003 des DWD bis Ende 2006 weitergeführt. Durch die in 3-stündigem Rhythmus angestoßenen Berechnungen des LM-Kürzestfrist-Modells mit verkleinerter Maschenweite und jeweils aktuellen Radarniederschlagsfeldern wird die zeitnahe Anpassung an das Niederschlagsgeschehen sicher gestellt. Zudem wird die erforderliche Rechenzeit durch Reduzierung des Flächenausschnitts und Verkürzung des Vorhersagezeitraums auf + 18 h auf etwa 2 bis 3 Stunden herabgesetzt.

Das aus fachlicher Sicht höchst anspruchsvolle Ziel der Vorhersage von sich in kürzester Zeit stark verändernden lokalen Starkniederschlagsereignissen, die zu den gefürchteten Sturzfluten in einem nur wenige 100 km² großen Einzugsgebiet führen können, soll durch die Verlagerung von Niederschlagsfeldern mit dem RADAR-Nowcasting-Verfahren erreicht werden. Die hierfür getrennt entwickelten Module zur Verlagerung konvektiver und stratiformer Niederschlagsfelder müssen erst durch die im nächsten Jahr vorgesehene Verifikation in ihrer quantitativen Wirkungsweise geprüft werden. Hierbei soll auch das im Rahmen des Aktionsprogramms 2003 entwickelte dritte Modul der Verlagerung mittels LM-Windfelder einzogen werden.

Ein fast schon wie ein Damoklesschwert über allen Arbeiten zur Nutzung von Radarniederschlagsmessungen für quantitative Zwecke hängendes Problem stellt die Radardatenqualität dar. Dies hat sich insbesondere auch in diesem Projekt einmal mehr bestätigt. Die an den Radarrohdaten im DWD-Radarverbund operationell angewendeten Verfahren zur Clutterfilterung reichen nicht aus, um allen Nutzeranforderungen gerecht zu werden. Daher sind bei vielen Bearbeitern zusätzliche Arbeiten zur Clutterbeseitigung der für die jeweiligen Module als Eingangsdaten benötigten Radardaten vorgenommen worden. Auch hier werden im Rahmen des Aktionsprogrammes 2003 Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse im nächsten Jahr allen Nutzern quantitativer Radarniederschlagsdaten zu Gute kommen werden.

Wie bereits in diesem Abschlussbericht erwähnt, sind die zum Projekt RADVOR-OP gehörenden, aber nicht mehr im Zeitrahmen fertigzustellenden Arbeiten zur Unterscheidung der Niederschlagsart und zur Verifikation der Niederschlagsvorhersagen während des experimentellen Testbetriebs im Jahr 2006 fest eingeplant. Voraussetzung ist allerdings die Bereitstellung der Abschlussrate aus den LAWA-Fördermitteln. Die Ergebnisse zu diesen Arbeiten werden in einem eigenen Bericht veröffentlicht.

Die in den letzten Jahren enorm gewachsene Bedeutung der Nutzung quantitativer Radarniederschlagsdaten zeigt sich auch exemplarisch bei den folgenden, in diesem Jahr beginnenden und vom DWD und der Wasserwirtschaft unterstützten Entwicklungsvorhaben:

- HowisErft (Fernerkundungsgestütztes Hochwasservorhersage- und Informationssystem für das Erfteinzugsgebiet) durch das Land Nordrhein-Westfalen
- Rimax (Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse) durch das BMBF mit den Projektvorhaben OPAQUE (Operationelle Abfluss- und Hochwasservorhersage in Quellgebieten), URBAS (Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten), EXTRA (Bestimmung von Extremniederschlägen für kleine und mittlere Einzugsgebiete in Mittelgebirgen in Echtzeit mit erhöhter Redundanz) und Entwicklung integrativer Lösungen für das operationelle Hochwassermanagement.

Durch die Kooperation von Hochschulen und Forschungseinrichtungen mit Ingenieurbüros, Bundes- und Landesbehörden sowie kommunalen Einrichtungen wird einerseits der Stand von Wissenschaft und Technik und andererseits der Transfer von Entwicklungsergebnissen in die Praxis gewährleistet.

7 Zusammenfassung

Mit dem vorliegenden Abschlussbericht zum Projekt RADVOR-OP werden die Arbeiten zu den Niederschlagsvorhersagen mittels quantitativer Radarniederschlagsdaten beim DWD dargestellt, so wie sie sich während der gesamten Projektlaufzeit von 2002 bis 2005 im Rahmen dieses Projekts entwickelt haben.

Die Datengrundlage besteht einerseits aus allen weltweiten, unter den nationalen Wetterdiensten ausgetauschten, zeitnah für die NWV-Modelle zur Verfügung stehenden Beobachtungen und Messungen. Andererseits werden die aus dem Radarverbundnetz des DWD mit seinen 16 Standorten und aus dem gemeinsamen automatischen Niederschlagsmessnetz des DWD und der Bundesländer abgeleiteten RADOLAN-Analysen der hoch aufgelösten Niederschlagsverteilungen Deutschlands in Echtzeit genutzt.

Zum Verständnis des ersten Teilprojekts „LM-Kürzestfrist“ wird auch ein kurzer Abriss zu den NWV-Modellen GME, LM bzw. LME und LMK gegeben. Dabei wird das jeweils räumlich höher aufgelöste Modell, das die Vorhersagerandwerte für ein flächenmäßig kleineres Gebiet liefert, in das „übergeordnete“ Modell genestet. Als Plädoyer für die in internationalen Projekten entwickelten und teilweise bereits operationellen Ensemble-Vorhersagesysteme (z.B. COSMO-LEPS) kann der Beitrag zu den Möglichkeiten und Grenzen der quantitativen Niederschlagsvorhersage gesehen werden.

Mit dem im Teilprojekt „LM-Kürzestfrist“ durchgeführten Latent Heat Nudging-Verfahren ist es möglich, während der Datenassimilation für das LMK den mit Radar gemessenen bodennahen Niederschlag zu assimilieren. Die explizite Simulation der Konvektion in der verkleinerten Modell-Maschenweite liefert - unterstützt durch eine Parametrisierung flacher Konvektion - realistischere Niederschlagsfelder als eine konventionelle Konvektionsparametrisierung im größeren Raster. Die zusätzliche Feuchteadjustierung während des LHN führt zu genaueren Analysen des Atmosphärenzustands und zu verbesserten Vorhersagen des Niederschlags. Die Vorhersageergebnisse für 18 Stunden stehen nach ca. 2 bis 3 Stunden Rechenzeit zur Verfügung. Der operationelle Routinebetrieb des mit der hohen räumlichen Auflösung von 2.8 km berechneten NWV-Modells LMK wird voraussichtlich Ende 2006 aufgenommen.

Das im Teilprojekt „RADAR-Nowcasting“ entwickelte Verfahren erstellt stündliche Niederschlagsvorhersagen für die nächsten zwei Folgestunden auf der Basis hoch aufgelöster quantitativer Radarniederschlagsdaten. Die aus den beiden getrennt entwickelten Verlagerungsmodulen für konvektive und stratiforme Niederschlagsfelder verschnittenen Niederschlagsvorhersagen werden mittels aktueller RADOLAN-Analysen quantifiziert und stehen innerhalb kürzester Zeit bereit. Die Einführung dieses alle 15 Minuten betriebenen RADAR-Nowcastings in den operationellen Routinebetrieb ist für Ende 2006 geplant. Sowohl die Charakterisierung der Niederschlagsfelder als auch die Abschätzung einer quantifizierten Niederschlagsentwicklung können in einem weiteren Schritt herangezogen werden.

Die im Teilprojekt „RADAR-Verifikation“ mit dem RADOLAN-Schema offline-angeeichten hochwasserrelevanten Niederschlagsereignisse umfassen alle wichtigen Hochwassereignisse

seit Mai 2000. Zusammen mit den operationellen RADOLAN-Analysen in Echtzeit ist somit gewährleistet, dass räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagsverteilungen in Deutschland für die Verifikation der Ergebnisse aus den beiden ersten Teilprojekten verfügbar sind. Diese Verifikationen sollen die vor allem beim RADAR-Nowcasting nicht ausreichend abgesicherte Kenntnis zur Vorhersagequalität erst ermöglichen. Aus Ressourcen- und Kostengründen erfolgt die Bearbeitung im Laufe des nächsten Jahres.

Die im Ausblick niedergelegten nächsten Arbeitsschritte betreffen vor allem die Weiterentwicklungen im regionalen (NWV-Modell LMK) und lokalen scale (RADAR-Nowcasting). Im zuletzt genannten Verfahren ist es unabdingbar, zusätzliche Datenquellen zu integrieren, damit die Vorhersage der sich schnell entwickelnden und lokal begrenzten Starkniederschlagsereignisse mit einer zeitlichen Andauer unterhalb von einer Stunde besser quantifiziert werden kann.

8 Anhang

8.1 Niederschlagsregelwerk

Übersicht der Regeln, Empfehlungen und Publikationen, die im Konsens folgender Institutionen geschaffen worden sind (alphabetisch geordnet):

- Abwassertechnische Vereinigung (ATV)
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK)
ab Januar 2005: ATV + DVWK = Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA)
- Deutscher Wetterdienst (DWD)
- Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)

Abkürzungen

- in der zweiten Spalte

A	ATV-Arbeitsblätter
BMV	Bundesministerium für Verkehr
DGM	Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen
M	DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft
Mi	DVWK-Mitteilungen
R	DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft
S	DVWK-Schriften

- in der dritten Spalte

verbindlich verbindliche Regel

Inhalt/Kurzbezeichnung		Herausgeber/ Erscheinungsjahr	Charakter
I.	Grundlagen	DWD/LAWA, 1996	verbindlich
	- Rahmenplan für die Zusammenarbeit zwischen dem Deutschen Wetterdienst (DWD) und den Ländern auf dem Gebiet der Hydrometeorologie/Wasserwirtschaft (RAPLA) - Rahmenvereinbarung zwischen dem DWD und dem Land(RaV)	DWD/Land	verbindlich
II.	Einrichtung und Betrieb von Niederschlagsstationen und -netzen	ATV (A 144), 1989 DVWK (R 126), 1988 DWD, 1988 DVWK (M 230), 1994 LAWA/BMV, 1993 DWD, 1999	verbindlich verbindlich verbindlich verbindlich verbindlich
	- Allgemeine Beobachteranweisung an Niederschlagsstationen (ABAN) - Niederschlag - Empfehlung für Betreiber von Niederschlagsstationen (BETREN) - Verzeichnis der Niederschlagsstationen (NISTAV) - Mindestanforderungen an automatische Niederschlagsmessgeräte/Ombrometer und deren Betrieb (MANOB) - Anleitung für die Abgabe von Meldungen über Niederschlag und Zustand der Schneedecke (NSDAN)	DWD, 1999	verbindlich

Inhalt/Kurzbezeichnung	Herausgeber/ Erscheinungsjahr	Charakter
III. Datenaufbereitung und –auswertung (Verfahren / Produkte) <ul style="list-style-type: none"> - Aufbereitung und Weitergabe von Niederschlagsregistrierungen - Starkregen auswertung nach Wiederkehrzeit und Dauer - Starkniederschläge in der Bundesrepublik Deutschland (Erläuterungen und Ergänzungen zu KOSTRA) - Starkniederschlagshöhen für Deutschland (KOSTRA-Atlas) - Regionalisierung der Extremwerte der Wasserabgabe aus Niederschlag und Schneedecke (REWANUS) - Hydrologisch repräsentative Niederschlagszeitreihen (HYRN) - Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland (MGN) - Außerordentlich extreme Niederschlagshöhen in den Flussgebieten Deutschlands (NIEFLUD) - Hydrometeorologische Untersuchung zur Klimaänderung (HUK) - Echtzeitvorhersage und Analyse der Wasserabgabe aus der Schneedecke und Regen (SNOW-D) - Anwenderkoordinierte Organisation von Radarniederschlagsdaten (AKORD I, II, III) - Routine-Verfahren zur Online-Aneichung von Radarniederschlagsdaten (RADOLAN) - Radargestützte, zeitnahe Niederschlagsvorhersage für den operationellen Einsatz (Niederschlag-Nowcasting-System – RADVOR-OP) 	ATV (A 136), 1985 DVWK (R 123), 1985 ATV (A 121), 1985 DVWK (R 124), 1985 DVWK (S 97), 1991 DWD, 1997 DWD, 2000 NN,NN DVWK (Mi 29), 1997 DWD, 1997 DWD, 2000 DWD, 2001 DGM, 1997 DWD, 1997/1998 DWD, 2004 www.dwd.de/RADOLAN DWD, 2005	verbindlich verbindlich Fachpublikation verbindlich *) verbindlich *) verbindlich *) (geplant) Fachpublikation Fachpublikation Fachpublikation Fachpublikation Fachpublikation Fachpublikation Fachpublikation Fachpublikation Fachpublikation Fachpublikation Fachpublikation Fachpublikation Fachpublikation (geplant)

*) Abweichungen im Einzelfall aufgrund vieljähriger gesicherter Messwerte sind zu begründen

Stand: Juli 2005

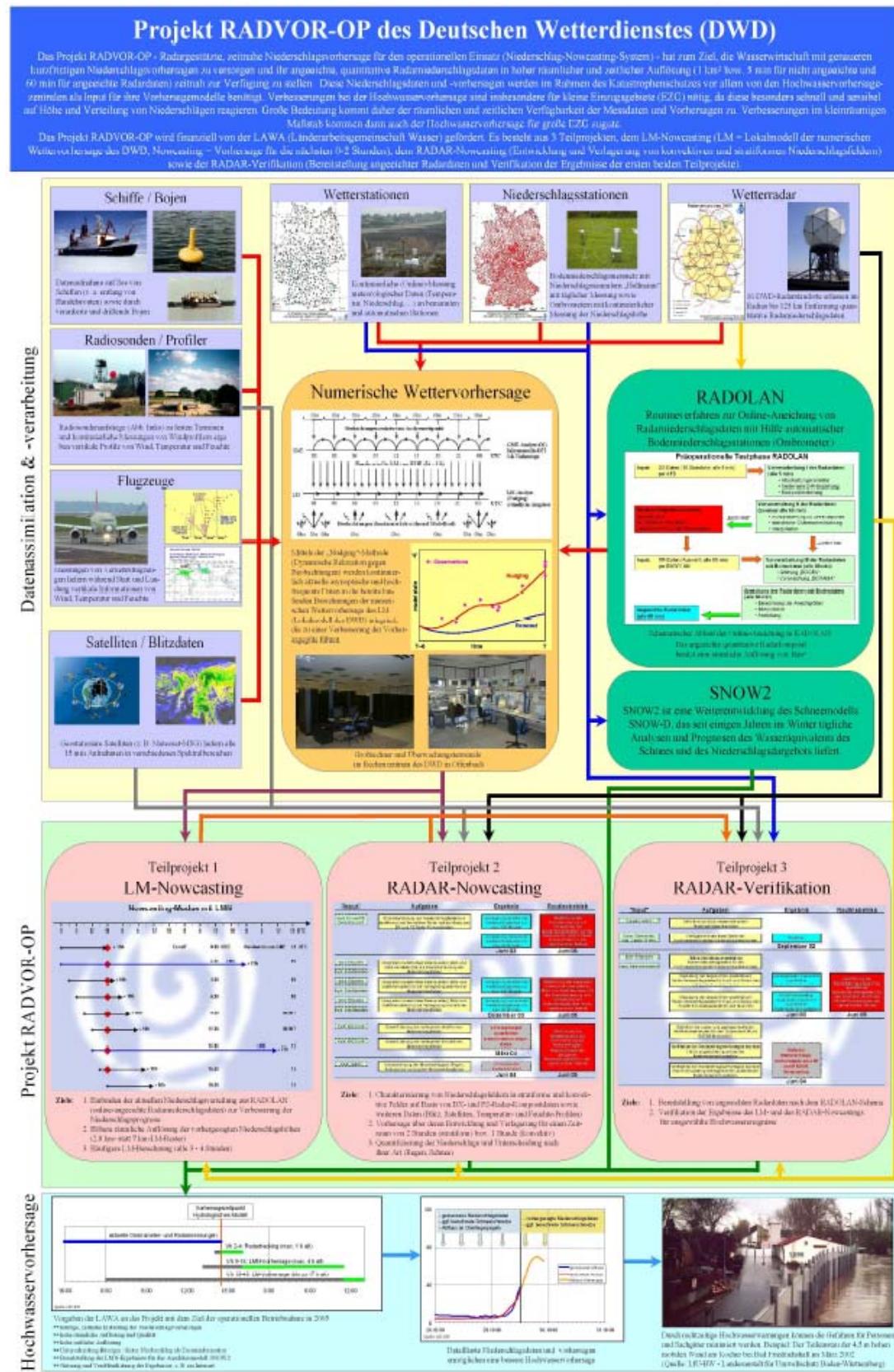
8.2 Überblick über operationell eingesetzte Nowcasting-Verfahren

System	Bezeichnung	Entwickler	Auflösung zeit- lich	Auflösung räum- lich	Vorher- sagezeit	Daten- quellen	Beschreibung / Einsatzzweck / Verwendung	Internet
AIFS	Australian Integrated Forecast System	BoM				Radar, Satellit, Bodenmessnetz, NWP, Blitz, ...	modularer Aufbau	www.bom.gov.au
SPROG (Spec PROG)	Spectral PROGnosis	BoM, Hydrology Branch			30min	Radardaten	short term forecasting of rainfall	www.bom.gov.au/hydro
KONRAD	Konvektion in Radarpunkten	DWD	5min	1km * 1km	30min - 60min	2D- und 3D-Radardaten (PZ, PX)	konvektive Niederschlagsentwicklung	www.dwd.de/de/SundL/Oeffentlich/Katastrophenschutz/Leistungen/KONRAD
URP	Unified Radar Processor	MSC - EC				Radar, Satellit, Bodenmessnetz, NWP, Blitz, ...	Weiterentwicklung des RDSS unter Einbeziehung zusätzlicher Datenquellen; 3. Version des URP soll im Herbst 2003 operationell werden	www.msc-smc.ec.gc.ca/contents_e.html
RDSS / CARDS	(Canadian) Radar Decision Support System	MSC - EC / IMT				Doppler-Radardaten	Classifies thunderstorms by their potential severity: Analyzes the internal structure of every storm in the area and flags those with supercell characteristics as green, yellow or red.	www.msc-smc.ec.gc.ca/contents_e.html
COTREC / RainCast	---	ETH-SpinOff: MeteoRadar Schmid	5min			Radardaten Meteo Schweiz, z. T. Bodenmessnetz, Blitz, ...	Nebst Kurzfrist-Vorhersagen von Regen, Starkregen und Hagel auch Vorhersagen von Schneefall, Schneeglätte, Eisglätte, Sturm- und Blitzschlagrisiko.	www.meteoradar.ch/de
ANC "Autonowcaster"	NCAR Auto-Nowcast System	NCAR	5min		30min / 60min	Radar, Satellit, Bodendaten, numerical boundary layer model	Routine nowcasts of thunderstorm position, prediction of boundary layer-forced storms. Provides 0-1 hour nowcasts of thunderstorms, rainfall rate, and winds.	www.ncar.ucar.edu

System	Bezeichnung	Entwickler	Auflösung zeit- lich	Auflösung räum- lich	Vorher- sagezeit	Daten- quellen	Beschreibung / Einsatzzweck / Verwendung	Internet
<i>ANC Autonow-caster COLIDE</i>	COncvergence LIne DEtection	NCAR					Identification, tracking and extrapolations of radar-detected surface convergence zones; Detection and extrapolation of stationary and moving radar detected boundary-layer convergence lines provides the ANC with information regarding probable locations of surface convergence and subsequently areas for potential thunderstorm initiation.	---
<i>ANC Autonow-caster TITAN</i>	Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting	NCAR	5min		60min	3D-Radardaten	Provides information about the current and forecast location and size of existing thunderstorms. TITAN uses radar data to find and follow individual storms, defined as regions of a certain size and radar reflectivity (typically 50 km ³ and 40 dB reflectivity). Past storm trends are used to predict future location, intensity, and size.	---
<i>ANC Autonow-caster TREC</i>	Tracking Radar Echoes by Correlation	NCAR		1km * 1km			Retrieval of 3-D boundary-layer winds from single Doppler radar data. Calculates an echo velocity vector on a horizontal grid by use of a cross-correlation technique.	---
<i>ANC Autonow-caster VDRAS</i>	Variational Doppler Radar Analysis System	NCAR					Used to monitor and nowcast boundary layer structure.	---
IWS	Intelligent Weather System	NCAR-RAP					The system design uses continuous set theory (fuzzy logic - FL) extensively as its core mathematical foundation. Other "expert system" related techniques including neural nets and even Boolean-based statistical techniques are often used within the system architecture.	www.ncar.ucar.edu/ncar/rap.html
WDSS-II	Warning Decision Support System Version 2	NSSL	5min			Doppler-Radar, Blitz	Warning Decision Support System developed to help forecasters make warnings of severe storms. - Modules: SCIT (Storm Cell Identification and Tracking), HDA (Hail Detection Algorithm), MDA (Mesocyclone Detection Algorithm), TDA (Tornado Detection Algorithm)	www.nssl.noaa.gov

System	Bezeichnung	Entwickler	Auflösung zeit- lich	Auflösung räum- lich	Vorher- sagezeit	Daten- quellen	Beschreibung / Einsatzzweck / Verwendung	Internet
GANDOLF	Generating Advanced Nowcasts for Deployment in Operational Landbased Flood Forecasts	UKMO	10min		0-3 hrs	Radardaten	GANDOLF identifies isolated convective cells, and applies the conceptual model to simulate their growth and decay thereby avoiding a detailed mathematical treatment of their thermodynamic properties. Provides 0-3 hour nowcasts of storm cells and rainfall rate.	www.met-office.gov.uk/water/gandolf.html
Nimrod	---	UKMO	15min / 30min	2km * 2km / 5km * 5km	0-6 hrs	Radar, Satellit, Bodenmessnetz, NWP, Blitz, ...	An automated weather analysis and nowcasting system based around a network of C band rainfall radars. Makes routine predictions of rainfall rate, rain accumulation, precipitation type, snow probability, cloud, visibility and wind gust speeds for up to six hours ahead. Higher resolution for England and Wales.	www.met-office.gov.uk/research/nwp/publications/nwp_gazette/mar02/nimrod.html
TRACE3D		IMK / FZ-KA				volume scan Radardaten		
Abkürzungen	BoM (Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia), IMK / FZ-KA (Institut für Meteorologie, Forschungszentrum Karlsruhe), IMT (InfoMagnetics Technologies Corporation, Winnipeg, CDN), MSC - EC (Meteorological Service of Canada - Environment Canada, Ottawa), NCAR (National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA), NSSL (National Severe Storms Laboratory, Norman, OK, USA), RAP (NCAR - Research Applications Program), UKMO (United Kingdom Meteorology Office, Bracknell, GB)							

8.3 RADVOR-OP-Schautafel



8.4 Abkürzungsverzeichnis

AFMS	Automatische fernmeldende Meteorologische Station
AKORD	Anwenderkoordinierte Organisation von Radardaten
AMDA	Automatische Meteorologische Datenerfassungsanlage
AP 2003	Aktionsprogramm 2003
ATV-DVWK	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
BD	Geschäftsbereich Basisdienste, DWD
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMP	Bitmap (Grafik-Format)
COSMO	Consortium for small scale modelling
COST	European Cooperation in the field of scientific and technical research
CRM	Cloud Resolving Model
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DWD	Deutscher Wetterdienst
E	Osten
EA	Referat Entwicklung von Anwendungen, DWD
ETS	Equitable Threat Score
EUMETNET	Conference of the European National Meteorological Services
EXTRA	Projekt „Bestimmung von Extremniederschlägen für kleine und mittlere Einzugsgebiete in Mittelgebirgen in Echtzeit mit erhöhter Redundanz“
EZMW	Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage
FBI	Frequency Bias
FE	Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung, DWD
FE HP	Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg, DWD
FK	Referat Fernerkundung, DWD
GB	Geschäftsbereich
GIF	Graphics Interchange Format (Grafik-Format)
GME	Global-Modell, NWV
GRIB	Gridded Binary
HIRLAM	High Resolution Limited Area Modelling
HM	Abteilung Hydrometeorologie, DWD
HowisErft	Projekt „Fernerkundungsgestütztes Hochwasservorhersage- und Informationssystem für das Erfteinzugsgebiet“
HRM	High-resolution Regional Model, NWV
HTML	Hyper Text Markup Language
INM	Instituto Nacional de Meteorología (Nationaler Wetterdienst von Spanien)
IR	Infra-Red
KONRAD	Konvektionsentwicklung in Radarprodukten
LAF	Lagged Average Forecasting
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LEPS	limited-area ensemble prediction system
LH	Latente Heizrate (latent heating)
LHN	Latent Heat Nudging
LITFASS	Lindenbergs Inhomogeneous Terrain Fluxes between Atmosphere and Surface - a long-term study '95 - 2000
LM	Lokal-Modell, NWV

LME	Lokal-Modell Europa, NWV
LMK	Lokal-Modell Kürzestfrist, NWV
MAP	Meteorologisches Applikations- und Präsentationssystem
METEOSAT	Meteorological Satellite
MIRIAM	Mikroprozessorgesteuertes Registriesystem des Instrumentenamtes München
MOS	Model Output Statistics
N	Norden
NABAM	ationales Basismessnetz
NinJo	Gemeinsames Graphisches System
NN	Normal Null
NRW	Nordrhein-Westfalen
NWV	Numerische Wettermöglichkeitsschätzung
OPAQUE	Projekt „Operationelle Abfluss- und Hochwasservorhersage in Quellgebieten“
PEPS	poor man's ensemble prediction system
PQP	DFG-Schwerpunktprogramm „Praecipitationis Quantitativa Praedictio“: Vorhersage des quantitativen Niederschlags
RADOLAN	Routineverfahren zur Online-Aneichung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer)
RADVOR-OP	Radargestützte, zeitnahe Niederschlagsvorhersage für den operationellen Einsatz (Niederschlag-Nowcasting-System)
Rimax	BMBF-Förderung „Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse“
RR	Niederschlagsmessung
RVP	Radar Video Processor
S	Süden
SNOW2	Weiterentwickeltes Modell der Schneeschmelzvorhersage
SRNWP	Short Range Numerical Weather Prediction
SYNOP	code for SYNOptic observation
TI	Geschäftsbereich Technische Infrastruktur, DWD
TP	Teilprojekt
TRIVIS	Weather Presentation System for Television
TSS	True Skill Statistics
UK	United Kingdom
UK Met Office	United Kingdom Meteorological Office
UKMO	United Kingdom Meteorological Office
URBAS	Projekt „Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten“
UTC	Universal Time Coordinated
VIS	Visible
W	Westen
WMO	World Meteorological Organization

8.5 Literaturverzeichnis

Alberoni, P. P., V. Ducrocq, G. Gregoric, G. Haase, I. Holleman, M. Lindskog, B. Macpherson, M. Nuret und A. Rossa, 2001: Quality and Assimilation of Radar Data for NWP – a Review, verfügbar bei <http://www.smhi.se/cost717/>

Anagnostou, E. N. und C. Kummerow (1997): „Stratiform and Convective Classification of Rainfall Using SSM/I 85-GHz Brightness Temperature Observations“, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology Vol. 14 (1997), S. 570-575

Arakawa, A. und Celal S. Konor, 1995: Vertical Differencing of the Primitive Equations Based on the Charney-Phillips Grid in Hybrid σ - p Vertical Coordinates. *Monthly Weather Review*, 124, 511-528

Biggerstaff, M. I. und S. A. Listemaa, 2000: „An Improved Scheme for Convective/Stratiform Echo Classification Using Radar Reflectivity“, Journal of Applied Meteorology Vol. 39 (2000), S. 2129-2150

Bott, A., 1989: A Positive Definite Advection Scheme Obtained by Nonlinear Renormalization of the Advective Fluxes. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1006-1015

Bott, A., 1992: Monotone Flux Limitations in the Area-preserving Flux-form Algorithm. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 2592-2602

Bott, A., 1993: The Monotone Area-preserving Flux-form Advection Algorithm: Reducing the Time-splitting Error in Two-dimensional Flow Fields. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2637-2641

Bremicker, M., 2002: Wasserwirtschaftliche Zielvorgaben an eine radargestützte, zeitnahe Niederschlagsvorhersage. Vortrag 1. RADVOR-OP-Projektsitzung, 23.05.2002, Offenbach/Main

COST 717, 2005: Quantitative precipitation forecasts (QPF) based on radar data for hydrological models. In: Use of radar observation in hydrological and NWP models, COST-Office, Brussels

Doms, G. und U. Schättler, 1999: The Nonhydrostatic Limited-area Model LM (Lokal-Modell) of DWD – Part I: Scientific Documentation. DWD, 134 Seiten

Doms, G. und J. Förstner, 2004: Development of a Kilometer-scale NWP-system: LMK. COSMO Newsletter, 4, 159-167

DWD, 2002: AKORD-Produktkatalog, 2. Überarbeitung Oktober 2002, DWD – Abteilung Hydrometeorologie

DWD, 2003: Projekt RADVOR-OP – Radargestützte, zeitnahe Niederschlagsvorhersage für den operationellen Einsatz (Niederschlag-Nowcasting-System), Zwischenbericht, Dezember 2003, DWD – Abteilung Hydrometeorologie

DWD, 2004a: Projekt RADOLAN – Routineverfahren zur Online-Aneichung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer), Zusammenfassender Abschlussbericht für die Projektlaufzeit von 1997 bis 2004, DWD – Abteilung Hydrometeorologie

DWD, 2004b: Bereitstellung von operativ nutzbaren Vorhersagedaten zur Schmelz- und Niederschlagswasserabgabe aus der Schneedecke für das Beratungsgebiet Rheinland-Pfalz, Saarland, für Teile von Nordrhein-Westfalen und Hessen sowie für das französische Moselgebiet, Luxemburg und Baden-Württemberg (Projekt SNOW-BW2003), Abschlussbericht, 15. Juni 2004

DWD, 2005a: RADOLAN – Niederschlagsmessung mit Radar. Internet-Beitrag unter <http://www.dwd.de/RADOLAN>

DWD, 2005b: Datenassimilation. Internet Beitrag incl. weiterführender Links unter <http://www.dwd.de/de/FundE/Analyse/Assimilation/Assimilation.html>

Gao, J., M. Xue, A. Shapiro, Q. Xu und K. K. Droege, 2001: Three-Dimensional Simple Adjoint Velocity Retrievals from Single-Doppler Radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18, 26-38

Golding, B. W., 1998: „Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts“, *Meteorol. Appl.* 5 (1998), S. 1–16

Golding, B. W., 2000: „Quantitative precipitation forecasting in the UK“, *Journal of Hydrology* 239 (2000), S. 286–305

Hong et al. (1999): „Separation of Convective and Stratiform Precipitation Using Microwave Brightness Temperature“, *Journal of Applied Meteorology* Vol. 38 (1999), S. 195-1213

Jones, C. D. und B. Macpherson, 1997: A Latent Heat Nudging Scheme for the Assimilation of Precipitation Data into an Operational Mesoscale Model. *Meteorol. Appl.*, 4, 269-277

Leuenberger, D. und A. Rossa, 2003: Latent Heat Nudging in aLMo: Experiments with Idealized Supercell Simulations. Konferenzbeitrag COSMO General Meeting, 24.-26.09.2003, Langen

Lorenz, E. N., 1963: Deterministic Nonperiodic Flow. *J. Atmoph. Sci.* 20, S. 130-141

Macpherson, B., 2001: Operational Experience with Assimilation of Rainfall Data in the Met Office Mesoscale Model. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 76, 3-8

Pierce, C. E., C. G. Collier, P. J. Hardaker und C. M. Haggett, 2000: „GANDOLF: a system for generating automated nowcasts of convective precipitation“, *Meteorol. Appl.* 7 (2000), S. 341–360

Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, und B. P. Flannery, 1994: Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing, Second Edition, Cambridge University Press, 964 Seiten

Richter, D., 1995: „Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers“, Ber. Dt. Wetterd., 194

Sacher, D. und J. Lang, 2001: RADOLAN – Routineverfahren zur Online-Aneichung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer) – Fünfter Zwischenbericht

Schraff, C. und R. Hess, 2002: Datenassimilation für das LM, in *promet – Meteorologische Fortbildung*, 27. Jg., Heft 3/4, 156-164

Schreiber, K.-J., 2000: Der Radarverbund – Informationen zum Weterradar-Verbundsystem. Deutscher Wetterdienst, GB TI, Offenbach am Main

Sherman, C. A., 1978: A Mass-consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain. *J. Appl. Meteor.*, 17, 312-319

Steiner, M., R. A. Houze jr. und S. E. Yuter, 1995: Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data, Journal of Applied Meteorology Vol. 34 (1995), S. 1978-2007

Tokay, A. und D. A. Short (1996): "Evidence of Tropical Raindrop Spectra of the Origin of Rain from Stratiform versus Convective Clouds", Journal of Applied Meteorology Vol. 35 (1996), S. 355-371

Wang, W. und T. T. Warner, 1988: Use of Four-Dimensional Data Assimilation by Newtonian Relaxation and Latent-Heat Forcing to Improve a Mesoscale-Model Precipitation Forecast: A Case Study. *Monthly Weather Review*, 116, 2593-2613

Wergen, W., 2002: Datenassimilation – ein Überblick, in *promet – Meteorologische Fortbildung*, 27. Jg., Heft 3/4, 142-149

Xiao, Q., Y.-H. Kuo, J. Sun, W.-C. Lee, D.M. Barker und E. Lim, 2004: Assimilation of Doppler radar observations and its impacts on forecasting of the landfalling typhoon Rusa (2002). *ERAD Publication Series Vol. 2* (Proceedings of ERAD (2004)), 178-182, verfügbar unter: http://www.copernicus.org/erad/2004/online/ERAD04_P_178.pdf

8.6 Abbildungsverzeichnis

2.1:	Niederschlagssensor PLUVIO	9
2.2:	Regionale Verteilung der Ombrometermessstellen	11
2.3:	Standorte der Wetterradargeräte des Deutschen Wetterdienstes	15
2.4:	Das Prinzip des Nudging für eine beliebige Variable als Funktion der Zeit	19
2.5:	Stündliche Niederschlagsverteilung am 11.07.2005 um 05.50 UTC aus Ombrometermessungen	21
2.6:	Fünf-minütliche Niederschlagsverteilung am 11.07.2005 um 05.20 Uhr UTC (links) bzw. 05.45 Uhr UTC (rechts) aus quantitativen Radarniederschlagsmessungen (RZ-Daten)	21
2.7:	Stündliche Niederschlagsverteilung am 11.07.2005 um 05.50 Uhr UTC (nicht angeeicht: a bis c; angeeicht: f) bzw. stündliche Aneichgrößen (Faktoren: d; Differenzen: e) aus RADOLAN	22
2.8:	Wolken- und Niederschlagsparametrisierung im Lokalmodell LM	25
2.9:	Modellgebiete des LME (rot), operationell ab Herbst 2005, und des LM (blau)	25
2.10:	Modellgebiet (rotes Rechteck) des LMK, operationell ab Ende 2006	26
3.1:	Darstellung der Lösungsfunktionen $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ im Phasenraum $Z=F(X,Y)$	33
3.2:	Darstellung dreier Lösungen der Funktion $X(t)$ des Lorenz-Systems bei unterschiedlichen Anfangsbedingungen als Zeitreihen	34
4.1:	Flussdiagramm: „Latent Heat Nudging“ im LMK	44
4.2:	Niederschlagshöhe in mm am 15. Juli 2004, 1-2 UTC: Radarmessung (a), Kontrolllauf ohne LHN (b), LHN-Lauf unter Berücksichtigung einer „Blacklist“ für Radardaten (c) und LHN-Lauf ohne Verwendung einer „Blacklist“ (d)	45
4.3:	„Blacklist“ für das DX-Komposit	46
4.4:	Niederschlagshöhe in mm am 9. Juni 2004, 8-9 UTC: Kontrolllauf (a), Radarmessung (b), LHN-Lauf mit diagnostischem Niederschlag (c) und LHN-Lauf mit prognostischem Niederschlag (d)	48
4.5:	Horizontale Felder der vertikal integrierten latenten Erwärmungsrate (farbige Schattierungen, interne Einheiten) und der aktuellen Niederschlagsrate am Boden (schwarze Konturen, in mm/h) für einen Lauf mit diagnostischem Niederschlag (a) und einen mit prognostischem Niederschlag (b)	49
4.6:	Stundenwerte des Niederschlags in mm am 14.07.2004, Assimilation: 17-18 UTC (a), 2. Stunde der Vorhersage: 19-20 UTC (b), 5. Stunde der Vorhersage: 22-23 UTC (c), jeweils 1. Spalte: Radar, 2. Spalte: LHN-Laufen, 3. Spalte: Kontrolllauf	52
4.7:	Stundenwerte des Niederschlags in mm am 17.07.2004, Assimilation: 11-12 UTC (a), 2. Stunde der Vorhersage: 13-14 UTC (b), 5. Stunde der Vorhersage: 16-17 UTC (c), jeweils 1. Spalte: Radar, 2. Spalte: LHN-Laufen, 3. Spalte: Kontrolllauf	54
4.8:	„Equitable Threat Score“ für die 12-UTC-Vorhersagen für 6 verschiedene Schwellenwerte der Niederschlagshöhe, gemittelt über den Zeitraum vom 07.-16.07.2004 und über dem Gebiet des DWD-Radarverbunds, Exp. 5263 ist der LHN-Laufen, Exp. 713 ist der Kontrolllauf	55
4.9:	„Frequency Bias“ für die 12-UTC-Vorhersagen für 6 verschiedene Schwellenwerte der Niederschlagshöhe, gemittelt über den Zeitraum vom 07.-16.07.2004 und über dem Gebiet des DWD-Radarverbunds, Exp. 5263 ist der LHN-Laufen, Exp. 713 ist der Kontrolllauf	57
4.10:	Datenflüsse und Module im Teilprojekt 2 „RADAR-Nowcasting“	60

4.11:	Horizontale Erstreckung von PZ-Komposit (gelbe Fläche), DX-Komposit (roter Rahmen) sowie die 125 km-Messradien der Radarstandorte für die quantitative Niederschlagsbestimmung	61
4.12:	PZ-Komposit vom 12.08.2002, 12:00 UTC; alle 12 Höhenschichten von 1 km bis 12 km (Höhe zunehmend von links nach rechts bzw. oben nach unten)	62
4.13:	Klasseneinteilung des PZ-Komposit	62
4.14:	Beispiel der Charakterisierung für den 12.08.2002, 12:00 UTC; links: die Summe der Klassenwerte von 2 bis 12 km Höhe, rechts: die daraus abgeleitete Einstufung in konvektiv bzw. stratiform	63
4.15:	Beispiel der Niederschlagsentwicklung für den 12.08.2002, 12:00 UTC; links oben: qualitative Niederschlagsverteilung am 12.08.2002 um 11:30 UTC in 2 km Höhe aus dem PZ-Komposit; Mitte oben: wie links oben, aber für 12:00 UTC; links unten: konvektive Niederschlagsentwicklung vom 12.08.2002, 11:30 auf 12:00 UTC; Mitte unten: wie links unten, aber stratiforme Niederschlagsentwicklung	65
4.16:	Die konvektive Starkregenwarnung >10mm/30min (blaue Pixel, links) in KONRAD am Beispiel Rostock, 21.6.05, 17:00 UTC. Aktueller Zugbahnektor: schwarzer Pfeil. Zum Vergleich die entsprechenden stündlichen Roh-Niederschlagswerte PH (Rahmen) bis 16:25 UTC (vorher) und plötzlich zunehmend bis 17:25 UTC (nachher)	67
4.17:	8.7.04, 16 UTC, München: Schema der Streifen der Prognosepunkte entlang der Zellzugbahnen auf der Basis der KONRAD-Zellvektoren. Mittlere Zelle 7 ergänzt durch den strömungsaufwärts beitragenden Streifen des aktuellen Niederschlags (Trajektorien, mittl. Bild PX). Rechts: Ausschnitt der 30min später ermittelten Rohniederschläge PH mit der eingetroffenen Verschmelzung der Zugbahnen der Zelle 7 und 9	67
4.18:	Divergierende Zellzugbahnen mit Starkregen (Rohniederschlag PY, 13h) und -warnung. "Neuansetzende Zelle" 4, vorangehende auslaufend. Hier ist die konvektive Niederschlagsprognose auf der Basis von Trajektorien bzw. zurückverfolgter Zugbahnen problematisch	68
4.19:	Zugbahnen und Prognosen. Links: Die Problematik der unterschiedlich gerichteten und ein- und aussetzenden Zellzugbahnen erkennbar an den Streifen im PY-Produkt (06:30-23:30). Mitte und rechts: Beispiel der mehrstündigen, hier beständigen KONRAD-Zellzugbahnen und der entsprechenden Niederschlagsspuren im PY-Produkt vom 8.7.04 (Türkheim, KONRAD-Legende s. Abb. 4.18)	69
4.20:	Schema zur Ableitung ähnlicher Strukturen in Bildsequenzen	70
4.21:	Vorhersage der 1h-Niederschlagshöhe am 11.07.2005 um 06 Uhr UTC	72
4.22:	Vorhersage der 1h-Niederschlagshöhe am 11.07.2005 um 06 Uhr UTC für 07 bis 08 UTC	73
4.23:	Niederschlagsintensitäten (mm/5,min), abgeleitet aus Radarmessungen für den 08.07.2004, 18:00 UTC (oben links), alle 10 min bis 19:00 UTC (unten rechts)	76
4.24:	Stundenwerte des Niederschlags, abgeleitet aus Radarmessungen für den 08.07.2004, 18:00 – 19:00 UTC	76
4.25:	Vergleich vorhergesagter und gemessener Niederschlagsfelder (nur Aussage Niederschlag ja/nein), 08.07.2004, 18:00-19:00 UTC	77
4.26:	Vorhersage der Niederschlagshöhe als Ergebnis aus der Integration (rechtes Teilbild) der als konvektiv (links oben) und stratiform (links unten) ermittelten Anteile für den 08.07.2004, 18:00 – 19:00 UTC	78
4.27:	Komponentenweise Beiträge für die Prognosen: blau – nur stratiform, rot – nur konvektiv, gelb – stratiform und konvektiv	78

4.28:	Gegenüberstellung der Auswertungen des Radarniederschlags vom 1. Januar 2003, Scan-Intervall: 23:25 bis 23:30 UTC; Oben links: RZ-Komposit; Oben rechts: quantifiziertes RQ-Komposit; Unten rechts: angeeichtes RW-Komposit für die Stunde von 22:45 bis 23:45 UTC.....	81
4.29:	Gegenüberstellung der Auswertungen des Radarniederschlags vom 7. Juni 2002, Scan-Intervall: 0:15 bis 0:20 UTC; Oben links: RZ-Komposit; Oben rechts: quantifiziertes RQ-Komposit; Unten rechts: RN-Komposit mit den nach einem statistischen Verfahren identifizierten Bodenechos für die Stunde von 23:45 bis 0:45 UTC.....	82
4.30:	Gegenüberstellung der Auswertung des Radarniederschlags vom 18.7.2005; Oben links: Stundenvorhersage um 19:45 UTC, nicht quantifiziert (RS); Oben rechts: Stundenvorhersage um 19:45 UTC, quantifiziert nach Gl. (5) (RQ); Unten rechts: best-angeeichter Stundenwert von 20:45 UTC (RW)	84
4.31:	Stündliche Niederschlagshöhen am 12.08.2002 für 12.50 UTC (obere Reihe), 13.50 UTC (mittlere Reihe) und 14.50 UTC (untere Reihe) im Gebiet von Weesenstein im Müglitztal; links: interpolierte Ombrometermessungen (Interpolationsradius: 20 km); Mitte: Original-Radarmessung; rechts: offline durchgeführte „Radar-Online-Aneichung“	88
4.32:	Ausschnitt des RZ vom 12.08.2002 um 12.20 UTC (Animation per Mausklick).....	89
5.1:	Vorhersagezyklus LMK und LAF-Ensemble-Konfiguration	92
5.2:	Zur Frage von typischen prognostizierbaren Zellstadien und -abläufen: Beispiel einer individuellen starken Zelle, Emden 18.6.2002, 15:10-17:00 UTC (Endstadium außerhalb des Bereiches)	93
5.3:	Verlagerungsspur und -pfeile von "freien" Schauerkernen (grüne Punkte) ~10mm/h (KONRAD) gegenüber integrierten diffusen Schauerkernen (Regengebiet in RX, Mitte) sowie dem Doppler-Radialwindfeld mit Windpfeilen und gebietsweisen Richtungsfarben blau (zum Radar) und rot (vom Radar weg), Berlin 14.6.05, 18:24 UTC.....	94
5.4:	Lindenberger Forschungs-Messnetz	95
5.5:	Radar- und Blitzdatenanalyse am 29.07.05, 10:45 UTC (links) und 2h-Vorhersage (rechts)	95
5.6:	24-stündige Niederschlagsverteilung vom 22.08.2005 aus dem PI-Radarkomposit ..	96
5.7:	Clutterpixel im Bereich des Radarstandortes Ummendorf am 18.08.2004	98
5.8:	Clutterpixel im Deutschlandkomposit (links) am 18.08.2004 und innerhalb eines Niederschlagsfeldes im Bereich des Radarstandortes Ummendorf (rechts) am 08.07.2004.....	99
5.9:	wie Abb. 5.8, nach Clutterfilterung.....	99
5.10:	RZ-Produkt am 18.08.04, 22:00; LM-Windfeld in 500 hPa.....	100
5.11:	Zweistündige Vorhersage für den 18.08.04, 22:00; TSS = 61%	100

8.7 Tabellenverzeichnis

2.1:	Überblick über die verwendeten Ombrometermessnetze	10
2.2:	Reihenfolge der Einrichtung der Radarstandorte des DWD	12
2.3:	Stationskennungen und derzeitige Koordinaten der Radarstandorte	13
2.4:	Globale NWW-Modelle weltweit (Stand Januar 2005).....	24
4.1:	Klasseneinteilung der Niederschlagsentwicklung anhand PZC-Daten.....	64
4.2:	Vorhersage der 1h- und 2h-Niederschlagshöhen für den 11.07.2005, von 06 bis 07 UTC bzw. von 07 bis 08 UTC für Landkreise	73
4.3:	Hochwasserrelevante Niederschlagsereignisse; Anm. 1: Ereignisse 1 – 8 können wegen mangelhafter DX-Radardatenqualität nicht bearbeitet werden; Anm. 2: Ereignisse 24 – 29 sind als Ersatz für die Ereignisse 1 – 8 hinzugekommen, Datenlage (In- und Output) im Rahmen des experimentellen Testbetriebs bzw. operationellen Routinebetriebs von RADOLAN; Erklärung der Füllfarben: grün für gute, orange für ausreichende und rot für ungenügende Datenverfügbarkeit	87
4.4:	Stündliche Niederschlagshöhen der drei Ombrometer in der Umgebung von Weesenstein am 12. August 2002	88
5.1:	Ausschnitt aus dem Strukturplan der Maßnahme 13, Projekt 3 des Aktionsprogramms 2003, Stand 01.07.2005.....	97

8.8 Im Rahmen des Projektes RADVOR-OP genutzte Radarprodukte

- DH Radardatensatz mit der stündlichen Niederschlagsverteilung
DX Radardatensatz mit der fünf-minütlichen Niederschlagsverteilung
DXC DX-Komposit
PH Picture, Rain over Hour — 1h—Niederschlagsverteilung
PI Radarbild: internationales Komposit der lokalen Reflektivitätsbilder (picture, international)
PX Picture, Extended — erweitertes lokales Radarbild
PY Picture, Rain over Day — mehrstündige Niederschlagsverteilung (1h – 24h)
PZ Radarbild: Reflektivitäten in zwölf Höhenschichten
PZC PZ-Komposit
RB stündliches Radar-Kompositprodukt nach Anwendung eines Faktors (Voraneichung mit dem sog. BORAMA-Verfahren)
RC stündliches Radar-Kompositprodukt nach statistischer Clutterkorrektur ohne Clutterpixel
RN „negatives“ RC-Produkt: von der RADOLAN-Clutterfilterung erkannte Clutter (keine Radardaten)
RQ mit der Verschneidung aus dem RW-Produkt quantifiziertes (quasi-angeeichtes) RS-Produkt
RS aus dem fünf-minütlichen RZ-Produkt vorhergesagtes und auf eine Stunde aufsummiertes Radar-Kompositprodukt
RV aus dem fünf-minütlichen RZ-Produkt vorhergesagtes Radar-Kompositprodukt
RW stündliches Radar-Kompositprodukt: Endergebnis der Aneichung nach Durchführung der gewichteten Mittelung
RX Original Radar-Kompositprodukt in qualitativen rvp-6-Einheiten
RZ Fünf-minütliches bzw. stündliches Radar-Kompositprodukt in mm-Werten (abschattungskorrigiert und mit verfeinerter Z-R-Beziehung)

Abschlussbericht zum Projekt RADVOR-OP

Deutscher Wetterdienst
Abteilung Hydrometeorologie

Dezember 2005

<http://www.dwd.de/de/wir/Geschaeftsfelder/Hydrometeorologie/Hydrometeorologie.htm>