

**Bestimmung von Flächenniederschlägen
über Zentral- und Nordeuropa
aus Wetterradardaten**

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Magistra der Naturwissenschaften
an der
Fakultät für Naturwissenschaften und Mathematik
der Universität Wien

Eingereicht von

KATHARINA BRUGGER

Wien, Februar 2004

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Danksagung

1	Einleitung	9
1.1	Motivation	9
1.2	Historischer Überblick	10
2	Niederschlagsmessung mit Radar	13
2.1	Das Radargerät	13
2.1.1	Das Funktionsprinzip	13
2.1.2	Die Wellenlängen	13
2.1.3	Die Darstellungsarten	14
2.1.4	Das Dopplerradar	15
2.1.5	Das polarisierte Radar	15
2.2	Die Radargleichung	16
2.2.1	Herleitung und Annahmen	16
2.2.2	Abschwächung und Ausbreitungsdämpfung	20
2.2.3	Clear air Echos	21
2.2.4	Die Einheiten der Reflektivität Z	22
2.3	Niederschlagsmessung und ihre Fehlerquellen	22
2.3.1	Das Tropfenspektrum und die ZR-Beziehung	23
2.3.2	Probleme aufgrund der Charakteristik und Standort des Radars	27
2.3.3	Probleme aufgrund der Charakteristik des Niederschlag und der atmosphärischen Bedingungen	32
3	Verwendete Daten	35
3.1	Die Radarnetzwerke	35
3.1.1	CERAD	36
3.1.2	BALTRAD	38

3.2	Das Ombrometer Netzwerk	42
4	Methode	45
4.1	Akkumulation	45
4.2	Fehlererkennung	46
4.2.1	Qualitative Aspekte	50
4.3	Methoden der Fehlerfilterung	58
4.3.1	Die Defaultsmasken	58
4.3.2	Die Schwellwertdefinition beim BALTRAD	59
4.3.3	Der Medianfilter	59
4.3.4	Die Pixelfilter	61
4.3.5	Der Gradientenfilter	63
4.3.6	Häufung von hohen Werten	64
4.3.7	Ausblenden	64
4.3.8	Subjektives Ausblenden	65
4.4	Rekonstruktion gefilterter Werte durch Interpolation	66
4.5	Der CERAD Korrekturalgorithmus	66
4.6	Der BALTRAD Korrekturalgorithmus	68
4.7	Beurteilung der aufbereiteten Radardaten	68
5	Ergebnisse	71
5.1	Fallstudie 20. - 25. Mai 2000	71
5.1.1	CERAD	71
5.1.2	BALTRAD	80
5.2	Verifikationsergebnisse für die gesamte Periode	87
6	Diskussion	89
A	CERAD - vorhandene Termine	91
	Literatur	95
	Lebenslauf	98

So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig,
man muß sie für fertig erklären,
wenn man nach Zeit und Umständen
das mögliche getan hat.

J.W. Goethe
Italienische Reise, 1787

Zusammenfassung

Zur Verbesserung von numerischen Wettervorhersagemodellen wurde das Demonstrationsprojekt ELDAS (Development of an European Land Data Assimilation Systems to predict floods and droughts) gestartet. Dieses sieht vor, dass die Bodenfeuchte in den Assimilationszyklus eingeht, mit der Absicht die Niederschlagsvorhersage zu verbessern. Ziel dieser Arbeit ist es, Radardaten zur quantitativen Bestimmung der Bodenfeuchte bereitzustellen.

Dazu werden die beiden europäischen Radarnetzwerke BALTRAD (Baltic Weather Radar Network) und CERAD (Central European Weather Radar Network) verwendet. Die Radardaten werden für die Periode Oktober 1999 bis Dezember 2000 auf 3-stündige Werte akkumuliert. Besonders berücksichtigt werden die radarspezifischen Fehler, wie Bodenechos, inhomogene Kalibrierung und Fehlwerte. Die in den Radardaten enthaltenen Artefakte werden mit einem entwickelten teilautomatischen Algorithmus, der auf der Methode der multitemporalem objektiv vergleichenden Bildverarbeitung basiert, reduziert. Zusätzlich wurden die Daten einer visuellen Kontrolle unterzogen. Ein Problem stellt die Unvollständigkeit der Daten dar. So fehlen beim CERAD rund 14 % der Daten, beim BALTRAD lediglich 0.16 %.

Das Ergebnis dieser Arbeit sind 3-stündige Niederschlagsfelder auf dem 0.2° ELDAS-Gitter, die im ECWMF Mars Archive archiviert werden. Die Qualität der Radardatenbearbeitung wird durch Verifikationsmaßzahlen für das Jahr 2000 angegeben. Im CERAD-Gebiet wurde ein mittlerer Niederschlag von 2.48 mm/Tag (Analysefehler 0.15 mm/Tag) gemessen. Während das unkorrigierte CERAD diesen Wert um 0.22 mm/Tag überschätzt, beträgt der mittlere Wert nach der Korrektur 2.19 mm/Tag. Jedoch kommt es zu einer Abnahme des RMS-Fehlers um rund 23 % (RMSE: uncorr. = 7.92 mm/Tag, corr. = 6.10 mm/Tag). Die Zunahme der Rang-Korrelationskoeffizient und des *True Skill Score* verdeutlicht die höhere Genauigkeit des korrigierten Niederschlags (R: uncorr. = 0.62, corr. = 0.63; TSS: uncorr. = 0.47, corr. = 0.50). In Einzelfällen ist der Genauigkeitsgewinn bedeutend höher. Beim BALTRAD wird der tatsächliche Niederschlag 2.40 mm/Tag um 1.64 mm/Tag unterschätzt. Der RMS-Fehler hingegen ist bedeutend niedriger als der beim CERAD (RMSE = 4.17 mm/Tag).

Abstract

To improve Numeric Weather Prediction models the EU-funded project ELDAS (Development of an European Land Data Assimilation Systems to predict floods and droughts) was launched. According to ELDAS the soil moisture enters the assimilation cycle with the purpose to improve the precipitation forecast. Aim of this work is to provide radar data for the quantitative determination of the soil moisture.

For this purpose the two European radar networks BALTRAD (Baltic Weather Radar Network) and CERAD (Central European Weather Radar Network) are combined. 3-hourly values of the radar data have been accumulated for the period October 1999 to December 2000. Radar-specific shortcomings like ground clutter, inhomogeneous calibration and other errors have been considered. Radar data, which contain artefacts, are reduced with a developed semi-automatic algorithm, that is a method based on multitemporal objective image processing. Additionally, these data are checked by a visual control. The incompleteness of the data is one of the most common failures. While in CERAD approximately 14 % of the data are missing, about 0.16 % are missing in BALTRAD.

The result of this work are 3-hourly precipitation fields on the 0.2° ELDAS grid, which are stored in the ECWMF Mars Archive. The quality of radar data processing is given by objective measures, developed for verification of weather forecast models, for the year 2000. In the CERAD domain a mean precipitation of 2.48 mm/day (analysis error 0.15 mm/day) was measured. Whereas the uncorrected CERAD overestimates this value about 0.22 mm/day, mounts the mean value after the correction 2.19 mm/day. Although the RMS error decreases about 23 % (RMSE: uncorr. = 7.92 mm/day, corr. = 6.10 mm/day). The increase of the Rank-order correlation coefficient and the True Skill Score clarifies the higher accuracy of the corrected precipitation (R: uncorr. = 0.62, corr. = 0.63; TSS: uncorr. = 0.47, corr. = 0.50). With relation to individual cases the accuracy gain is significant higher. According to the BALTRAD the real precipitation of 2.40 mm/day is underestimated about 1.64 mm/day. Whereas the RMS error is significant lower than those for CERDAS (RMSE = 4.17 mm/day).

Danksagung

Sie ist Abschluss und Neubeginn zugleich . . .

Bedanken möchte ich mich bei A.Univ. Prof. Dr. Franz Rubel, der meine Diplomarbeit betreute und stets ein offenes Ohr für Fragen hatte. Durch die Mitarbeit am ELDAS-Projekt ermöglichte er es mir die Meteorologie in einem anderem Bereich kennen zu lernen. Bei Univ. Prof. Dr. Dipl.Ing. Gerhard Windischbauer möchte ich mich für die Benutzung der Ressourcen des Institut für Medizinische Physik und Biostatistik bedanken. Gebührend möchte ich mich auch bei Mag. Paul Skomorowski und Mag. Markus Kottek bedanken, die mir bei allen computertechnischen Problemen mit viel Geduld helfend zur Seite standen. Mein Dank gilt auch meinen Studienkollegen, von denen viele im Laufe des Studiums zu guten Freunden wurden. Meinen Eltern danke ich, dass sie mir halfen, mich unterstützten meinen Weg zu finden und immer für mich da sind. Herzlich möchte ich mich auch bei Johanna und Mathias bedanken, sie wissen warum.

Gewidmet sei diese Arbeit allen, die mein Leben geprägt und beeinflusst haben.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Wasser ist eine der lebenswichtigsten Komponenten unseres Lebens. In der Meteorologie ist es unter anderem durch den Niederschlag in jeder Form repräsentiert. Der Niederschlag ist ein Teil des hydrologischen Zyklus und wirkt damit in allen ökologischen, ökonomischen, sozialen und kulturellen Bereichen. In jeder Wetterprognose ist der Niederschlag neben der Temperatur mittlerweile unentbehrlich. Dass der vorhergesagte Niederschlag nicht immer dem tatsächlich gemessenen Niederschlag entspricht, führt immer wieder zu Einschränkungen unseres täglichen Lebens und im Extremfall werden Güter und Personen in Mitleidenschaft gezogen.

Um die numerischen Wettervorhersagemodelle näher an die Realität zu bringen wird u.a. versucht die Eingangsdaten, z.B. hier die Bodenfeuchte, zu verbessern. Dazu werden SVAT¹-Modelle verwendet. Da die Bodenfeuchte nicht operationell gemessen wird, muss sie aus Niederschlags- und Strahlungsmessungen berechnet werden.

Die Verbesserung der Bodenfeuchtefelder ist eines der Ziele des von der Europäischen Union geförderten Demonstrationsprojekts ELDAS². Für das ELDAS-Projekt werden Modelle mit einer Auflösung von 0.2° bzw. 20 km verwendet. Für einen Zeitraum von 15 Monaten, von Oktober 1999 bis Dezember 2000, wird auf einem 266x186-Gitter die Bodenfeuchte assimiliert (van den Hurk, 2001).

Der Niederschlag kann direkt oder indirekt gemessen werden. Bei der direkten Methode wird zu bestimmten Zeitpunkten an den Messstationen der Niederschlag mit sogenannten Ombrometern gemessen. Im Rahmen des ELDAS-Projekts wurden an der VU-Wien bis jetzt rund 20.000 solche Punktmessungen gesammelt und auf das 0.2° -Gitter interpoliert. Diese 24-stündigen Felder sind Ausgangsbasis zur Disaggregation von 3-stündigen Niederschlagsfelder.

Eine der indirekten Methoden ist die Niederschlagsmessung mittels Radar. Vorteil ist na-

¹Soil Vegetation Atmosphere Transfere

²Development of an European Land Data Assimilation System to predict floods and droughts

türlich neben der hohen zeitlichen auch die hohe räumliche Auflösung. Bisher wurden Radarmessungen meist nur zur Erfassung und Kurzfristvorhersage von Niederschlagsgebieten benützt. Vor allem die in einem Radarbild enthaltenden Fehler und dadurch falschen Niederschlagsmengen machen es derzeit praktisch unmöglich Radardaten auch für numerische Wettervorhersagemodelle operationell zu verwenden. Im ELDAS-Projekt werden speziell aufbereitete Radardaten verwendet. Diese Aufbereitung - die Reduzierung der radarspezifischen Fehler wie Bodenechos, Abschattung durch die Orographie, inhomogene Kalibrierung und Fehlwerte, ist Ziel dieser Arbeit. Im Rahmen dieser wird nicht nur ein teilautomatischer Algorithmus zur Reduzierung der Fehler für die gesamte 15-monatige Periode entwickelt, sondern auch die Maßzahlen zur Verifikation der Fehlerbereinigung. Es werden Daten von zwei europäischen Radarnetzwerken, dem BALTRAD³ der nordeuropäischen Wetterdienste und dem CERAD⁴ der zentraleuropäischen Wetterdienste, verwendet. Diese zwei Radarnetzwerke werden in Kap. 3 noch näher beschrieben.

Als ein aktueller Gegenstand der Forschung finden sich in der Literatur mehrere Beispiele Radardaten unter zu Hilfenahme zusätzlicher Parameter, wie z.B. der Temperatur, zu korrigieren und Fehlechos zu eliminieren (Leitner, 1999; Ellis et al., 2003). Seltener jedoch finden sich Methoden, die direkt an der Bildverarbeitungsebene ansetzen. Hierbei können die Daten vor allem mit der Median-Substitution rasch verbessert werden (Jann, 1993; Lucchinetti, 2001).

1.2 Historischer Überblick

Radar ist das Akronym für Radio detection and ranging. Während des zweiten Weltkriegs wurde das Wort *Aim* (Flugziel) hinzugefügt, aber später wieder weggelassen, da Radar mittlerweile nicht nur Flugziele betrifft. Die Entwicklung bzw. Entdeckung der Radartechnik kann nicht auf eine einzelne Person reduziert werden, viel mehr war es ein Zusammenspiel von verschiedenen, teilweise parallelen Entwicklungen.

Eine der Grundlagen der Radartechnik legte 1865 der englische Physiker James Clark Maxwell mit seiner elektromagnetische Lichttheorie (Beschreibung der elektromagnetischen Wellen und ihrer Ausbreitung). Eine weitere, nämlich die Reflexion elektromagnetischer Wellen an metallischen und nicht metallischen Körpern, steuerte 1884 der deutsche Forscher Heinrich Hertz bei. Basierend auf diesen Ergebnissen versuchte 1904 der deutsche Hochfrequenztechniker Christian Hülsmeier die Ortung eines Objekts mittels Radiowellen. Sein sogenanntes *Telemobiloskop* konnte die Laufzeit von Wellen, die von einem Schiff zurückgeworfen wurden, messen und wurde zum Patent angemeldet.

In den folgenden Jahrzehnten kam es praktisch zeitgleich zur Entwicklung von unterschied-

³Baltic Weather Radar Network

⁴Central European Weather Radar Network

lichen Radaranlagen in den USA, Russland, Deutschland, Frankreich und Japan. Während des zweiten Weltkriegs wurde die Entwicklung forciert, da das Radar einen taktischen Vorteil darstellte.

Nach dem Krieg wurden diese Radargeräte vorwiegend von der zivilen Luftfahrtkontrolle und versuchsweise in der Meteorologie weiter verwendet, lediglich das *Feindbild* wandelte sich. Ab den 50iger bzw. 60iger Jahren wurden die herkömmlichen Radargeräte in der Meteorologie operationell, vor allem zur Entdeckung und Verfolgung von Gewitter und Zyklonen, genutzt.

Im Zuge der technischen Entwicklung von Computer und schneller Datenübertragung wurden einzelne Geräte zu Radarnetzwerken zusammengefasst. Heute haben viele Länder ihre eigenen Radarnetzwerke, die das gesamte Staatsgebiet abdecken. Einige dieser staatlichen Radarnetzwerke sind zu internationalen Netzwerken zusammengefasst. In Europa sind das z.B. CERAD und BALTRAD, die in dieser Arbeit verwendet werden.

Kapitel 2

Niederschlagsmessung mit Radar

Wie schon in der Einleitung erwähnt kann das Radarprinzip zur Ortung verschiedener Objekte verwendet werden. In diesem Kapitel wird auf die Funktionsweise eines Radargeräts, die Radargleichung und die Fehlerquellen, die bei der Niederschlagsmessung auftreten können, eingegangen.

2.1 Das Radargerät

2.1.1 Das Funktionsprinzip

Radar basiert auf dem Prinzip des Aussenden und Empfangen elektromagnetischer Wellen und der Messung deren Intensität. In Abb. 2.1 ist der Ablauf einer Messung schematisch dargestellt.

Von einer Antenne, die in den meisten Fällen sowohl Sender als auch Empfänger ist, wird unter einer starken Richtungs Bündelung, d.h. mit einem kleinen Öffnungswinkel, eine meist polarisierte, gepulste Mikrowellenstrahlung ausgesandt. Diese Welle breitet sich entsprechend den physikalischen Gesetzen in der Atmosphäre aus, bis sie von einem Objekt bzw. Partikel reflektiert wird. In der Meteorologie sind das Hydrometeore, wie Regentropfen, Hagelkörner, etc..

Durch eine Messung der reflektierten Leistung an der Antenne kann mittels der sogenannten Radargleichung auf das reflektierende Objekt geschlossen werden. Die Entfernung wird aus der Laufzeitmessung bestimmt.

2.1.2 Die Wellenlängen

In der Meteorologie wird meist ein Wellenlängenbereich von 0.75 - 30 cm verwendet. Typischerweise werden drei Wellenlängen zur Niederschlagsmessung verwendet, wie in Tab. 2.1 aufgelistet. Radargeräte haben meist eine variable Strahlbreite von $0.5 - 3^\circ$. Die Impulsdauer schwankt zwischen 0.25 - 4 μs . Die Wahl der Wellenlänge stellt meist einen Kompromiss zwi-

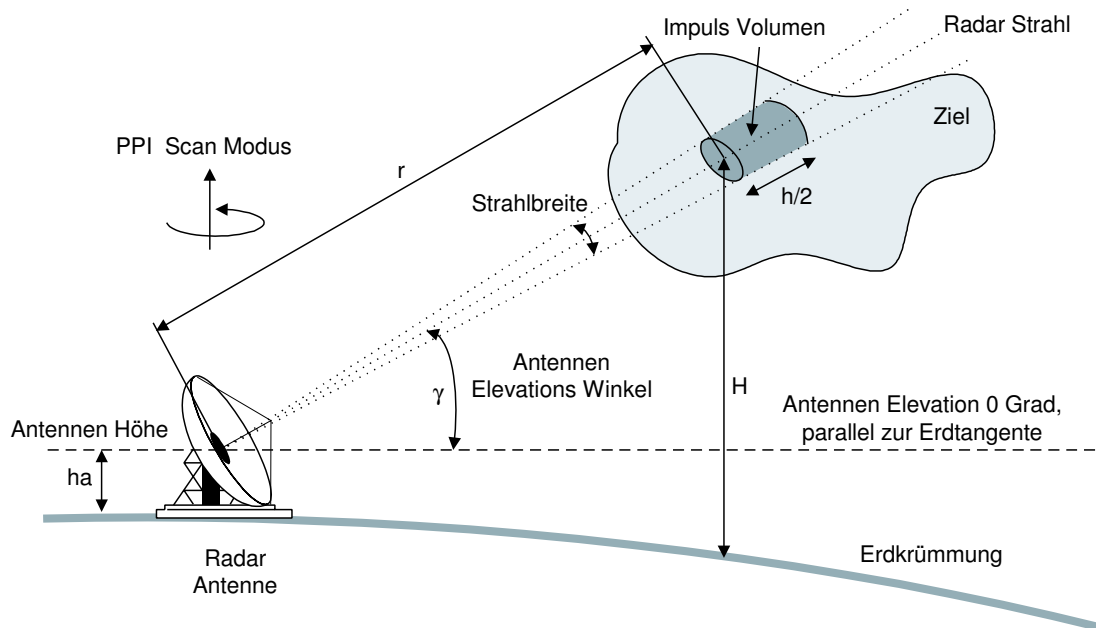


Abb. 2.1: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips des Radars (Leitner, 1999)

schen guten Rückstreuvermögen, kostengünstigen Antennensystem und geringer Dämpfung des Radarstrahls durch den Niederschlag dar. Generell gilt aber das C-Band-Radar als bester Kompromiss in außertropischen Gebieten.

Frequenzband	Wellenlänge	Frequenz	Einsatzgebiet
S-Band	10 cm	3 GHz	Tropen
C-Band	5 cm	5.3 GHz	Außertropen
X-Band	3 cm	10 GHz	Pol, polnahe Gebiete

Tab. 2.1: Radargeräte zur Niederschlagsmessung (Emeis, 2000; Köck, 1999)

Radargeräte mit Wellenlängen im Bereich von einem Meter nennt man Windprofiler (Frequenz 0.1 - 1 GHz). Ist das Radar als Doppler-Radar ausgelegt, so kann aus der beobachteten Frequenzverschiebung des rückgestreuten Signals gegenüber dem ausgesendeten Signal die horizontale Zuggeschwindigkeit der Niederschlagsgebiete berechnet werden.

2.1.3 Die Darstellungsarten

Ein Radargerät hat zwei Betriebsmöglichkeiten und dadurch gibt es zwei bzw. drei Arten der graphischen Darstellung der gemessenen Werte (Bader et al., 1995).

Der Radarstrahl wird von einer sich um eine vertikale Achse drehenden Antenne mit einem

konstanten Elevationswinkel, von maximal einigen Grad über dem Horizont, ausgesandt und wieder aufgefangen. Es entsteht dabei ein polares Bild der Umgebung. Die Ergebnisse werden aber, entsprechend der eingestellten Elevation, auf einer Kugeloberfläche interpretiert und meist auf dem Bildschirm mit der Position des Geräts in der Mitte dargestellt. Dies ist die am häufigsten verwendete **PPI-Darstellung** (plan position indicator). Zu beachten dabei ist, dass nahe Objekte eine geringere Höhe über dem Boden haben als entferntere Objekte.

Eine Alternative zu der PPI-Darstellung ist die **CAPPI-Darstellung** (constant altitude PPI). Bei dieser wird der Strahl mit verschiedenen Höhenwinkeln ausgesendet, niedrig bei großen Entfernungen und hoch bei kurzen Entfernungen. Diese PPI-Bilder werden dann auf konstante Höhe über Grund transformiert.

Bei der **RHI-Darstellung** (range height indicator) wird der Radarstrahl immer in dieselbe Himmelsrichtung ausgestrahlt, d.h. die Antenne hat einen konstanten Azimutwinkel. Aber der Elevationswinkel wird regelmäßig variiert. Auf diese Weise bekommt man einen Höhenschnitt durch Niederschlagsgebiete, die in dieser Himmelsrichtung liegen. Diese Darstellung wird häufig ergänzend zur PPI-Darstellung verwendet.

2.1.4 Das Dopplerradar

Der Doppler-Effekt wird benutzt, um aus der beobachteten Frequenzverschiebung des rückgestreuten Signals gegenüber dem ausgesandten Signal die Radialgeschwindigkeit der Hydrometeore zum Messgerät zu ermitteln und daraus das aktuelle dreidimensionale Geschwindigkeitsfeld zu berechnen.

Betrachtet man höhere Elevationen, entspricht - aufgrund der räumlichen Beschaffenheit des Radarstrahls - die Dopplermessung nicht mehr ausschließlich der horizontalen Verteilung der Windgeschwindigkeit, sondern es wird zusätzlich ein Abbild des vertikalen Windprofils erstellt. Dies geschieht, wenn man ausschließlich die PPI-Darstellung verwendet, und damit immer höhere Objekte beleuchtet, je weiter diese vom Standort entfernt sind (Krennert, 2001).

2.1.5 Das polarisierte Radar

Üblicherweise haben Wetterradaranlagen Antennen, die horizontal polarisierte Wellen ausstrahlen, da hierfür der Rückstreuquerschnitt der flüssigen Hydrometeore größer ist. Dies ist die Folge der Abplattung der Regentropfen durch ihre Fallgeschwindigkeit.

Mehr Informationen erhält man, wenn das Radargerät mit unterschiedlicher Polarisation arbeitet. Die Polarisation einer elektromagnetischen Schwingung ist horizontal bei Parallelität der Schwingungsebene zur Erdoberfläche und sie ist vertikal, wenn die Schwingungsebene normal dazu steht.

Allgemein ermöglicht die Polarimetrie exaktere Angaben über die Mikrophysik und Niederschlagsbildung, besonders in konvektiven Systemen (Krennert, 2001).

2.2 Die Radargleichung

2.2.1 Herleitung und Annahmen

Um von den in verschiedenen Rückstreuolumina gemessenen Rückstreuintensitäten auf die Niederschlagsraten am Boden zu schließen, verwendet man die sogenannte Radargleichung, die im Folgenden hergeleitet wird (Battan, 1973; Collier, 1996; Strümpel, 2001).

Das Radar emittiert über eine Antenne elektromagnetische Wellen. Die von einem Radar ausgestrahlte Leistung P_t breitet sich kugelförmig in alle Richtungen gleich aus. Dabei ist die Strahldichte¹ S in einer Entfernung r durch

$$S = \frac{P_t}{4 \pi r^2} \quad (2.1)$$

gegeben. Die emittierten elektromagnetischen Wellen breiten sich, durch das Antennensystem in eine Richtung gebündelt, mit Lichtgeschwindigkeit ($c=299\,793\text{ km/s}$) aus. Die Ausbreitung erfolgt auf Kugelflächen. Deshalb nimmt die Strahldichte mit $1/r^2$ ab, wobei r die Entfernung zum Radar ist. Die von einer Radarantenne emittierte Strahlung breitet sich jedoch nicht exakt kugelförmig aus, sondern in einem Raumwinkel gebündelt. Dies wird durch den Antennenfaktor G berücksichtigt.

Befindet sich im Strahlengang ein Partikel mit der Querschnittsfläche A_σ in der Entfernung r , so nimmt dieser einen Teil der ausgestrahlten Energie auf. Die aufgenommene Leistung P_σ ist durch

$$P_\sigma = \frac{P_t G A_\sigma}{4 \pi r^2} \quad (2.2)$$

gegeben. Dabei wird angenommen, dass das Partikel keine Energie absorbiert, aber dass es die aufgenommene Energie isotrop in alle Richtungen reflektiert. Somit ist die wieder vom Radar empfangene Energie P_r durch

$$P_r = \frac{P_t G A_\sigma A_e}{(4\pi)^2 r^4} \quad (2.3)$$

beschrieben, wobei A_e die effektive Querschnittsfläche der Antenne ist. Diese hängt vom Antennenfaktor G und von der Wellenlänge λ ab, mit der das Radar arbeitete. Durch theoretische Überlegungen wurde folgender Zusammenhang abgeleitet:

$$A_e = \frac{G \lambda^2}{4 \pi} \quad (2.4)$$

¹S=Energie pro Zeit, Fläche und Raumwinkel

Da die physikalische Größe eines Ziels nicht notwendigerweise auch die Größe, die das Radar sieht, ist, wird der Parameter A_σ durch den Rückstreuquerschnitt σ ersetzt. Der Rückstreuquerschnitt σ ist eine fiktive Größe mit der Einheit einer Fläche. Die Größe dieser Fläche entspricht der eines Körpers, der soviel Leistung aufnimmt, dass diese, wenn sie isotrop abgestrahlt wird, gleich der gemessenen rückgestreuten Leistungsdichte ist. Somit lässt sich die Radargleichung für ein Punktziel folgendermaßen schreiben:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{64 \pi^3 r^4} \sigma \quad (2.5)$$

Alle Partikel, die von einem Wetterradar betrachtet werden, werden als kugelförmig angenommen. Sind die Partikel groß im Vergleich zur Wellenlänge des Radars, ist der Rückstreuquerschnitt gleich dem geometrischen Querschnitt. Als groß gilt ein Partikel, wenn sein Durchmesser D mindestens zehnmals größer als die Wellenlänge ist. Allgemein lässt sich der Rückstreuquerschnitt eines kugelförmigen Teilchens über die Mie-Theorie bestimmen. Ist der Tropfendurchmesser klein im Vergleich zu der verwendeten Wellenlänge λ , dann gilt die Rayleigh-Approximation. Und der Rückstreuquerschnitt ist proportional zur sechsten Potenz des Durchmessers. Er kann als

$$\sigma_i = \frac{\pi^5 |K|^2 D_i^6}{\lambda^4} \quad (2.6)$$

mit

$$K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \quad (2.7)$$

geschrieben werden. Dabei ist $m^2 = \varepsilon_r$ die relative Dielektrizitätskonstante, eine Materialkonstante, und D der Partikeldurchmesser. In diesem Zusammenhang besteht der Unterschied zwischen Wasser und Schnee in erster Linie in den unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten. Diese ist für Schnee sehr viel geringer als für Wasser, Schnee hat nur 1/5 des Werts von Wasser. Einige Werte für $|K|^2$ sind in Tab. 2.2 aufgelistet. Daraus wird die starke Abhängigkeit des Rückstreuquerschnitts vom Aggregatzustand des Wassers deutlich. Beim Übergang von der Eis- in die Wasserphase lässt dieser Faktor das Radarecho um bis zu 7.2 dB ansteigen. Einheiten der Radarreflektivität siehe Kap. 2.2.4.

Die Radargleichung in der Form von Glg. 2.5 gilt nur für einzelne Punktziele. Bei der Beobachtung von Niederschlag befindet sich jedoch niemals nur ein einzelnes Teilchen im Rückstrevolumen. Für ein Radar, dessen Antenne Strahlung mit einem Öffnungswinkel von 1° emittiert, ist der Durchmesser des Strahls in 57 km Entfernung vom Radar auf 1 km angewachsen. Beträgt die Impulsdauer $1 \mu s$, so hat das Rückstrevolumen eine Dicke von 150 m. Der Rauminhalt des Rückstrevolumens beträgt etwa $1.3 \cdot 10^8 \text{ m}^3$. In einem Volumen dieser Größe können sich bis zu 10^{16} Wolkenpartikel befinden. Berücksichtigt man, dass Regentropfen größer sind als reine Wolkenteilchen, können allerdings immer noch $10^9 - 10^{12}$ Regentropfen in einem einzigen

Aggregatzustand	$ K ^2$
Wasser	0.93
Eis	0.176
95% Eis, 5% Wasser	~ 0.39
70% Eis, 30% Wasser	~ 0.78
Schnee (trocken)	~ 0.208

Tab. 2.2: Werte für $|K|^2$ bei verschiedenen Aggregatzuständen (Riedl, 1986)

Radarstreuervolumen enthalten sein. Somit setzt sich das vom Radar empfangene Signal aus einer Vielzahl von Einzelsignalen zusammen. Der Rückstreuquerschnitt für das gesamte Rückstreuervolumen ergibt sich durch Aufsummation der n verschiedenen einzelnen Rückstreuquerschnitte.

$$\sigma_t = \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (2.8)$$

Um den totalen Rückstreuquerschnitt eines Bereichs im Radarstrahl zu erhalten, wird mit dem Volumen dieses Bereichs multipliziert, so dass sich

$$\sigma_t = V \sum_{vol} \sigma_i \quad (2.9)$$

ergibt. Das Volumen ist durch

$$V = \pi \frac{r \theta}{2} \frac{r \phi}{2} \frac{h}{2} \quad (2.10)$$

definiert. Hierbei wird nicht mehr von einer rotationssymmetrischen Strahlenkeule ausgegangen, sondern der vertikale Öffnungswinkel ist mit ϕ und der horizontale mit θ gegeben. Die Dicke des Volumens ist mit $h/2$ gegeben.

Zwei aufeinanderfolgende Messungen des gleichen Volumens liegen etwa 10^{-3} s auseinander. In dieser Zeitspanne haben die Teilchen im Volumen kaum die Möglichkeit, das Volumen zu verlassen, können sich aber neu verteilen. Wird mit der zweiten Messung zu lange gewartet, hat sich der Inhalt des Volumens zu stark verändert. Um einen möglichst genauen Wert zu erhalten, wird über mehrere Messungen eines Volumens gemittelt. Setzt man den totalen Rückstreuquerschnitt in die Radargleichung ein, so lautet diese:

$$\bar{P}_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \theta \phi h}{512 \pi^2 r^2} \sum \sigma_i \quad (2.11)$$

Unter der Annahme der Rayleigh-Approximation (Glg. 2.6) ergibt sich:

$$\bar{P}_r = \frac{P_t G^2 \theta \phi h |K|^2 \pi^3}{512 \lambda^2 r^2} \sum D_i^6 \quad (2.12)$$

Diese Gleichung kann nun unter folgenden Annahmen (Collier, 1996) vereinfacht werden:

- (a) Die streuenden Niederschlagspartikel in einem Zielvolumen sind homogene dielektrische (nichtleitende) Kugeln, deren Durchmesser klein im Vergleich zu den Wellenlängen ist.
- (b) Das Impulsvolumen ist vollständig mit zufällig gestreuten Niederschlagspartikel gefüllt.
- (c) Der Reflektivitätsfaktor Z ist einheitlich im gesamten abgetasteten Impulsvolumen und konstant während des Abtastzeitintervall. Starke Gradienten innerhalb des Strahls führen zu Fehlern.
- (d) Alle Partikel sind entweder nur Wassertropfen oder nur Eispartikel, d.h. $|K|^2$ ist für alle Partikel gleich.
- (e) Mehrfachstreuungen sind vernachlässigbar.
- (f) Die einfallenden und zurückgestreuten Wellen sind linear polarisiert.
- (g) Die Hauptkeule des Antennenstrahlungsschema entspricht annähernd einer Gauß'schen Verteilung.
- (h) Der Beitrag der Seitenkeulen zur empfangenen Energie ist vernachlässigbar.
- (i) Die Antenne ist ein Parabolspiegel mit kreisförmigen Querschnitt und seine Verstärkung, d.h. der Antennenfaktor, ist bekannt.
- (j) Die Absorption von übertragenen Signalen durch Bodenechos im Strahl ist vernachlässigbar.
- (k) Alle Verluste der Systemenergie sind berücksichtigt.
- (l) Die gemessenen Energie P_r ist gemittelt über eine ausreichende Zahl an Impulsen oder unabhängigen Stichproben um charakteristisch für ein Zielimpulsvolumen zu sein.

Die vereinfachte Form der Glg. 2.12 lautet dann:

$$\bar{P}_r = \frac{C |K|^2 Z}{r^2} \quad (2.13)$$

wobei C als die Radarkonstante bekannt ist und

$$Z = \frac{1}{\Delta v} \sum D_i^6 \quad (2.14)$$

die Radarreflektivität ist.

In manchen Fällen sind die Bedingungen für die Rayleigh Approximation nicht erfüllt und daher ist es besser, wie z.B. bei Eiskristalle, die Gleichung mit der effektiven Reflektivität Z_e

$$\bar{P}_r = \frac{C |K|^2 Z_e}{r^2} \quad (2.15)$$

anzuschreiben. Die Größe Z_e kann hinsichtlich der Reflektivität η als

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z_e \quad (2.16)$$

definiert werden, was zu

$$Z_e = \frac{\lambda^4 \eta}{\pi^5 |K|^2} \quad (2.17)$$

führt, dabei wird $|K|^2 = 0.93$ angenommen, das dem Wert für Wasser entspricht.

2.2.2 Abschwächung und Ausbreitungsdämpfung

Vom Aussenden bis zum Messen der reflektierten Welle, legt diese den Weg zwischen Radar und Partikel zweimal zurück. Dabei verliert die elektromagnetische Welle durch Absorption und Streuung an Energie.

Abschwächung durch atmosphärische Gase

Hierbei ist vor allem, auf Grund der Absorption, Wasserstoff und Sauerstoff interessant. Die Abschwächung durch Streuung an gasförmigen Molekülen ist hingegen vernachlässigbar. Für Wellenlängen von 3 - 10 cm kann die Dämpfung bedingt durch den Sauerstoffgehalt in der Atmosphäre als konstant mit Werten um 0.01 - 0.008 dB/km auf Meeresniveau angenommen werden und wird somit erst mit zunehmender Entfernung signifikant. Die Abschwächung durch die Wasserdampfabsorption ist vom Wasserdampfgehalt in der Luft abhängig. Für eine Wellenlänge von 10 cm liegt der Wert bei rund 0.0002 dB/km; jedoch bei kürzeren Wellenlängen steigt dieser Wert an. Daher kann die Dämpfung durch atmosphärische Gase vernachlässigt werden oder wird von den Radaranlagen automatisch korrigiert.

Abschwächung durch flüssige oder feste Partikel

Diese liefert wesentlich größere Fehler, die schwerer zu korrigieren sind. Die Abschwächung wird sowohl durch Absorption als auch Streuung verursacht und ist von der Wellenlänge λ , den als sphärisch angenommenen Partikeldurchmesser D und der Dielektrizitätskonstante abhängig. Es gibt verschiedene Beziehungen zur Korrektur dieses Effekts. Eine dieser Beziehungen z.B. von Gunn und East (1954) lautet für ein C-Band-Radar mit einer Wellenlänge von 5.7 cm

$$\text{Zwei-Weg-Abschwächung [dB/km]} = 0.004 R^{1.17} \quad (2.18)$$

wobei R [mm/h] die Niederschlagsrate ist.

Bei Schneeflocken ist die Abschwächung geringer als bei Regentropfen bei niedrigen Niederschlagsraten. Ein dünner Überzug mit Wasser kann bewirken, dass eine kleine Eissphäre einen

Radarquerschnitt fast so groß wie der einer komplett Wassersphäre hat. Daher kann die Abschwächung, mit beginnendem Schmelzen der Schneeflocken, deutlich ansteigen. Aber auch die Form der Hydrometeore kann die Abschwächung signifikant beeinflussen. Hagel erzeugt große Abschwächungen, aber wie bei Schneeflocken gibt es keine einfache Beziehung, die Abschwächung auf die Größe zu beziehen. Generell lässt sich sagen, dass die Abschwächung mit fallender Temperatur für flüssige Hydrometeore ansteigt und mit fallender Temperatur für feste Wasserpartikel abfällt.

In Tab. 2.3 sind die Abschwächungen durch verschiedene Hydrometeore für ein C-Band-Radar aufgelistet.

Hydrometeor	Aggregatzustand	einfache Abschwächungseffekte (T=0° C)	Referenz
Wolken	flüssig	0.03 dB/km(g m ⁻³)	Falciner and Dyer (1970)
	Eis	0.0015 dB/km(g m ⁻³)	Falciner and Dyer (1970)
Schnee	trocken	0.0012 db/km bei Max.-Rate 3 mm/h (d.h.≈ 30 mm Schnee/h)	Gunn and East (1954)
	nass	5-50 mal trockener Schnee	Battán (1973)
Regen		0.003 dB/km(mm/h)	Gunn and East (1954) Wexler and Atlas (1963)
Hagel	trocken	0.025-0.6 dB/km	Battán (1973)
	feucht	0.25-3.5 dB/km	Battán (1973)
Nebel	Sichtweite, 30 m	0.13 dB/km	Bean and Dutton (1966)
	Sichtweite, 300m	0.004 dB/km	Bean and Dutton (1966)
Gase in der Atmosphäre		0.008 dB/km	Battán (1973) Bean and Dutton (1966)

Tab. 2.3: Größenordnungen der Abschwächung aufgrund von Hydrometeoren bei $\lambda=5$ cm (Collier, 1996)

2.2.3 Clear air Echos

Gelegentlich empfangen Radargeräte Echos, obwohl die Atmosphäre keine Hydrometeore enthält. Von Insekten, Vögel², kleine Staubpartikel, etc. hervorgerufen, werden diese Echos auch als *Angels* bezeichnet. Mit sehr leistungsstarken und sensiblen Radargeräten kann man *Angels* nutzen um konvektive zelluläre Muster, Luftwalzen und mesoscale Konvergenzlinien, die Gebiete künftiger Schauerentwicklungen, zu erkennen.

²Die Verfolgung von Vögelzügen mit Wetterradar wird z.B. in Koistinen (2000) beschrieben.

2.2.4 Die Einheiten der Reflektivität Z

Der Radarreflektivitätsfaktor Z wird gewöhnlich in der Einheit mm^6/m^3 angegeben. Da in der Radarmeteorologie mit einem sehr großen Leistungsbereich von 10^{-13} - 10^6 W gearbeitet wird, wird meist das logarithmische Größenverhältnis Dezibel (dB) verwendet. Dezibel (dB) ist ein Maß für die relative Energie. Wenn sich zwei Energien P_1 und P_2 von einander durch n dB unterscheiden, dann gilt

$$\frac{P_1}{P_2} = 10^{n/10} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \quad (2.19)$$

Die gemessenen Reflektivität von Radargeräten werden in dBZ angegeben. Die dBZ-Werte geben das Verhältnis eines gemessenen Werts zu einer Reflektivität von $1 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ an.

$$dBZ = 10 \log_{10} \frac{Z}{Z_0} \quad (2.20)$$

mit $Z_0 = 1 \text{ mm}^6/\text{m}^3$. So entspricht z.B. ein Wert von $Z = 10^3 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ 30 dBZ. Typische dBZ-Werte sind für Regen 20 bis 40 dBZ und für Hagel ab etwa 50 dBZ (Benheng, 2001).

2.3 Niederschlagsmessung und ihre Fehlerquellen

Die Verwendung und Interpretation von Wetterradardaten ist aufgrund verschiedener Faktoren kompliziert. Solange die Wetterradarbilder lediglich als eine qualitative Niederschlagsinformation verwendet werden, in dem Sinne, dass nur die Ausdehnung und die Zugrichtung von Niederschlagszellen interessant sind, kann es zu keinen größeren Fehlinterpretationen kommen. Kommt es jedoch auf die Quantität des tatsächlich am Boden gefallenen Niederschlages an, so müssen die möglichen Messfehler eines Wetterradars berücksichtigt und richtig gewichtet werden.

Die Fehlerquellen können in 3 Kategorien einteilt werden:

- (a) Fehler auf Grund von Mängel im Radarsystem und bei der Verarbeitung der Daten
- (b) Fehler auf Grund von geographischen und geometrischen Eigenschaften
- (c) Fehler auf Grund von Unsicherheiten in physikalischen Eigenschaften

Generell lässt sich sagen, dass (a) eigentlich kein größeres Problem darstellt, vor allem bei neueren Radaranlagen und Computerprogrammen. Fehler durch (b) sind im Allgemeinen identifiziert und verstanden und werden meist ebenfalls durch Computerprogramme korrigiert. Fehler durch (c) stellen jedoch nach wie vor das Hauptproblem dar. Darunter fällt z.B. die genaue Bestimmung der ZR-Beziehung.

Im Folgenden werden diese Fehlerquellen bei der Niederschlagsmessung mit Radar kurz diskutiert, sowie mögliche Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Eliminierung dieser Fehler erläutert.

2.3.1 Das Tropfenspektrum und die ZR-Beziehung

Das Tropfenspektrum

Die in Wolken oder bei Niederschlagsereignissen enthaltenden Tropfen sind immer von unterschiedlicher Größe und Menge. Sie bilden als fallende und schließlich auftreffende Hydrometeore die Niederschlagsmenge am Boden. Die Kenntnis von Anzahl und Größe der Tropfen in einem bestimmten Volumen ist daher von größtem Interesse. Die Tröpfchengrößenverteilung ist jedoch nicht theoretisch bestimmbar, aber es gibt einige Messmethoden.

Die ersten Messungen der Partikelgrößenverteilung von Regentropfen, Schneeflocken und Hagelkörner stammten von Wiesner (1895), der mit Filter-Papier mehr oder weniger erfolgreich die Größenverteilungen ermittelte. Diese Methode hat sich über viele Jahre bewährt und ist heute noch in Verwendung (Svabik, 1989). Der Vorteil dieser Methode ist ihre Einfachheit, die eine kostengünstig eine flächendeckende Messung erlaubt. Ihr Nachteil ist natürlich der große manuelle Aufwand bei der Auswertung der gewonnenen Daten.

Eine der ersten Methoden für die automatische Messung der Tropfengrößenverteilung war schließlich das elektronische Distrometer³ von Joss und Waldvogel (1969), mit dem erstmals ohne allzu großen Aufwand Tropfenverteilungen gemessen werden konnten, allerdings doch mit Einschränkungen bezüglich Messbereich und Genauigkeit.

Eine neuere Methode zur Messung der Tropfengrößenverteilung ist ein optisches Distrometer⁴ vom Institut für Angewandte Systemtechnik der Joanneum Research.

Anhand einer gemessenen Tropfenverteilung kann man versuchen ein Tropfenspektrum $N(D)$ zu parametrisieren. Den ersten Ansatz schlugen die amerikanischen Forschern Marshall und Palmer (1948) vor. Basierend auf Messungen von Regenereignissen von 1948 in Ottawa sahen sie, dass es relativ viele kleine Tropfen und eher wenige große gab. Außerdem variierte die Anzahl und Verteilung mit verschiedener Stärke des Niederschlags.

Als Ansatz formulierten sie einen einfachen exponentiellen Zusammenhang zwischen der Niederschlagsrate, dem Tropfendurchmesser und der zugehörigen Anzahl von Tropfen:

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D} \quad (2.21)$$

wobei D der Tropfendurchmesser in mm und $N(D) dD$ die Anzahl der Tropfen pro Luftvolumen in einem Intervall von D bis $D + dD$ ist. In Abb. 2.2 ist diese Exponentialverteilung für

³Funktionsprinzip: Ein auftreffender Regentropfen gibt einen Impuls, der abhängig von der Masse und damit vom Tropfendurchmesser ist, an eine Membran. Der mechanische Impuls wird in ein elektrisches Signal umgewandelt und das Signal wird in verschiedene Klassen, entsprechende der verschiedenen Tropfengrößen, eingeteilt. Nach der Summierung der Tropfen jeder Klasse ist eine Darstellung oder Umwandlung in Niederschlagsintensität möglich (Wüest et al., 2002).

⁴Funktionsprinzip: Dieses Gerät basiert auf einem optischen Prinzip. Jeder Tropfen wird mit zwei Zeilenkameras aufgenommen, und daraus Tropfenform und Fallgeschwindigkeit gewonnen.

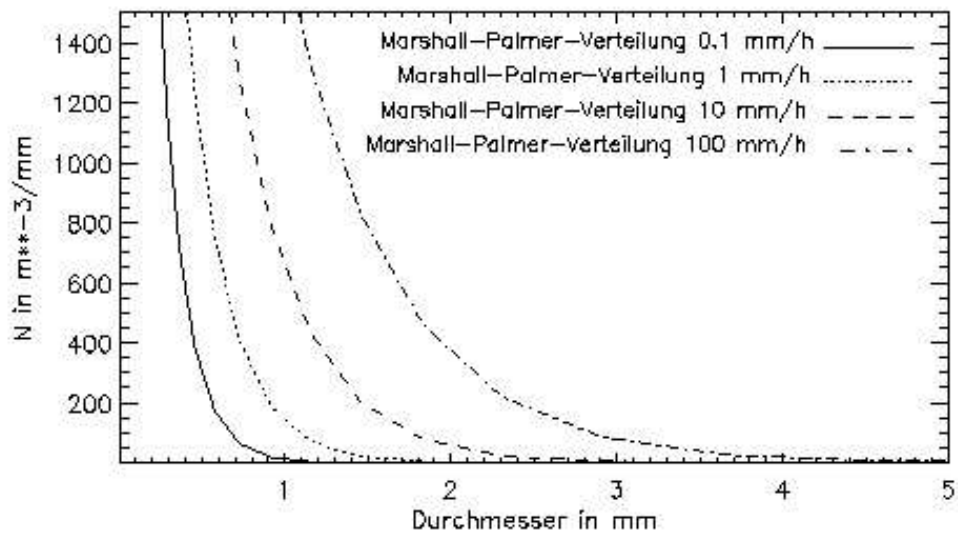


Abb. 2.2: Exponentialverteilung nach Marshall und Palmer (1948). Tropfenspektrum bei verschiedenen Niederschlagsintensitäten (Wüest et al., 2002).

Tropfenspektren bei verschiedenen Niederschlagsintensitäten nach Marshall und Palmer (1948) dargestellt.

Die numerischen Parameter Λ und N_0 sind Mittelwerte über eine Vielzahl von Messungen und können sich innerhalb eines Niederschlagsereignis sprunghaft ändern. N_0 in cm^{-4} ist die spektrale Anzahldichte und Λ in cm^{-1} ist ein Parameter, der von der Niederschlagsrate R [mm/h] abhängt. Diese Verteilung dienen auch zur Korrektur der zusätzlichen Einflüsse bei der Berechnung der Niederschlagsrate R . Die bekanntesten Verteilungen lauten:

für Regen (Marshall, Palmer, 1948)	$N_0 = 0,08 \text{ cm}^{-4}$	$\Lambda = 41 R^{-0,21} \text{ cm}^{-1}$
für Schnee (Gunn, Marshall, 1958)	$N_0 = 0,038 \text{ cm}^{-4}$	$\Lambda = 25,5 R^{-0,48} \text{ cm}^{-1}$

Diese exponentielle Verteilung ist in vielen Fällen realistisch, vor allem je länger man über Raum und Zeit integriert. Jedoch weist die Verteilung einen unrealistisch hohen Anteil kleiner Tropfen auf, was aber weder für die Niederschlagsrate R noch für die Radarreflektivität Z von Bedeutung ist.

Später entwickelte Parametrisierungen orientieren sich häufig an der Gamma-Verteilung. Die Gamma-Verteilung ist wesentlich realistischer, da sie die Anzahl der kleinen Tropfen weniger wichtet. Deshalb wird ein zusätzlicher Parameter μ verwendet. In Abb. 2.3 ist ein Tropfenspektrum der Gamma-Verteilung mit verschiedenen μ dargestellt. Eine dieser Verteilungen lautet z.B. nach Ulbrich (1983):

$$N(D) = N_0(D) D^\mu e^{-\Lambda(R)D} \quad (2.22)$$

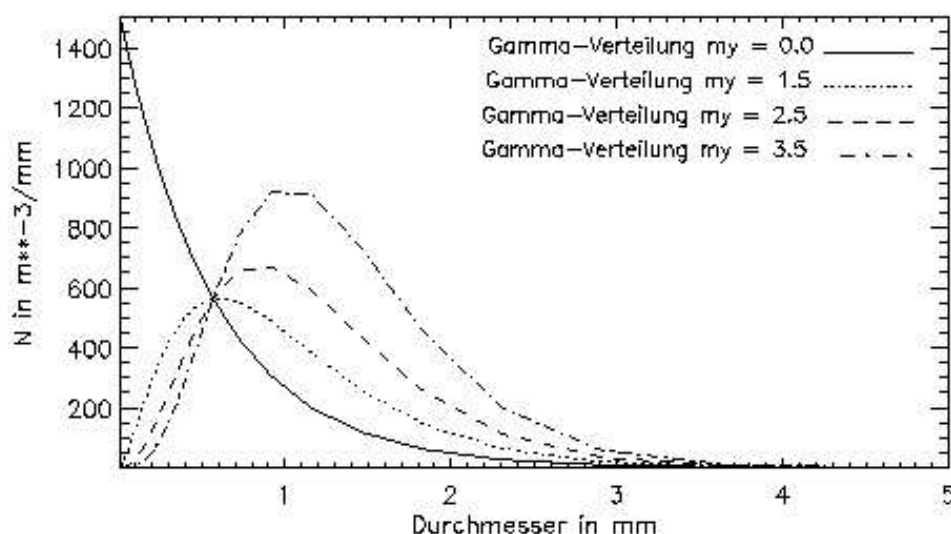


Abb. 2.3: Tropfenspektrum der Gamma-Verteilung in Abhängigkeit des Parameters μ . Alle Spektren entsprechen einer Niederschlagsrate von 20 mm/h. (Wüest et al., 2002)

$$\text{mit } \Lambda = \frac{3.67 + \mu}{1.3} R^{-0.16} \quad \text{und} \quad N_0 = 1520 e^{3.14\mu} \quad (2.23)$$

Alle Ansätze haben eines gemeinsam: Sie können nur fallweise die vielfältige Wirklichkeit der natürlichen Tropfenspektren beschreiben. Denn die Tropfengrößenverteilung kann, aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Prozesse, die sich in der Wolke abspielen, von Fall zu Fall stark variieren. Diese Prozesse sind unter anderem Kondensation, Verdunstung, Spaltung und Vereinigung der Tropfen, etc.

Die ZR-Beziehung

Mit einem Radar wird der Reflektivitätsfaktor Z gemessen. Interessanter sind aber andere Größen wie die Niederschlagsrate R , der Flüssigwassergehalt M , etc.. Daher wurde versucht eine Beziehung zwischen der jeweiligen physikalischen Größe und Z zu finden. Diese Beziehung hat die allgemeine Form

$$Z = a X^b \quad (2.24)$$

wobei a und b empirisch bestimmte Koeffizienten sind. Diese sind genau wie die Mikrostruktur von Wolken und Niederschlag, von denen sie abhängen, in Raum und Zeit variabel. Die Koeffizienten können experimentell durch Messreihen von Z und dem entsprechenden X Wertepaaren bestimmt werden und mit der *Least Square Adjustment*-Methode berechnet werden.

Es gibt zwei Möglichkeiten Daten zu erlangen:

1. Eine Reihe von Werten von $N(D)$ wird mit einem Distrometer ermittelt, daraus werden dann durch numerische Integration Z und X berechnet.
2. Z und X werden unabhängig von einer Raum- und Zeitsynchronisation gemessen, Z durch Radar und X durch andere Techniken (z.B. für R mit einem Pluviometer).

Werte der Koeffizienten a und b können auch mit ausreichend eingeschränkten Hypothesen der Verteilung von $N(D)$ theoretisch berechnet werden.

Die gebräuchlichste und einfachste Form der Glg. 2.24 ist die Beziehung zwischen der Radarreflektivität Z und der Niederschlagsrate R . Die Koeffizienten a und b haben eine große natürliche Variabilität, die mit zahlreichen Faktoren assoziiert werden. Man kann diese versuchsweise in zwei Gruppen zusammenfassen:

1. Geographisch und klimatisch bedingte Standortfaktoren: Lokale Eigenschaften der Atmosphäre und ihrer Zirkulation, die dynamischen, thermodynamischen und mikrophysikalischen Prozesse, entsprechend dem Ort und der Saison
2. Faktoren verknüpft mit der Wolkenstruktur: $N(D)$ variiert an der selben Stelle von einem Wolkentyp zu einem anderen und für den selben Typ mit der Entwicklung des selben Prozess.

Um nun eine Beziehung zwischen der Radarreflektivität Z und der Niederschlagsrate R zu bekommen, wird die Radarreflektivität Z als sechste Potenz der Tropfendurchmesser eines Volumens definiert:

$$Z = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i \in \Delta v} D_i^6 \quad (2.25)$$

Unter Verwendung des Tropfenspektrums $N(D)$ lässt sich diese Gleichung nun integral schreiben als

$$Z = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD \quad (2.26)$$

was formal dem sechsten Moment der spektralen Tropfenverteilung entspricht.

Wird nun ein exponentielles Tropfenspektrum wie das von Marshall und Palmer (1948) eingesetzt, so ist das Integral analytisch lösbar und führt zu

$$Z = 6! \frac{N_0}{\Lambda R^7} \quad (2.27)$$

also einem funktionalen Zusammenhang der Gestalt

$$Z = a R^b \quad (2.28)$$

Diese Gleichung wird im Allgemeinen als die ZR-Beziehung bezeichnet, mit R in mm/h und Z in $mm^6 m^3$. Ihre Parameter a und b hängen vom Tropfenspektrum ab. Auch für die ZR-Beziehung wurde der Versuch einer Niederschlagsklassifizierung mit unterschiedlichen typischen Parametern a und b unternommen. Zumindest die Einteilung in stratiformen und konvektiven Niederschlag scheint dabei häufig sehr sinnvoll. Die verschiedensten Beziehungen wurden publiziert, bei denen die Parameter a und b aus den lokalen Gegebenheiten bestimmt wurden, so dass sie die Gesamtheit der Niederschlagsereignisse und deren Tropfenspektren einigermäßen gut widerspiegeln (Sauvageot, 1992). Einige Beispiele siehe Tab. 2.4.

Niederschlagsform	ZR-Beziehung	Publikation
stratiformen Regen	$Z = 200 R^{1.6}$	Marshall und Palmer, 1948
orographischer Regen	$Z = 31 R^{1.71}$	Blanchard, 1953
Gewitter	$Z = 486 R^{1.37}$	Jones, 1956

Tab. 2.4: Klassisch verwendete ZR-Beziehungen (Collier, 1996)

Die Fehler, die aus einer unbekanntem Tropfengrößenverteilung und somit aus einer falschen oder ungeeigneten ZR-Beziehung resultieren, können im ungünstigsten Fall mehr als $\pm 50\%$ betragen. Diesen Fehler könnte man vermindern, indem man die ZR-Beziehung an die jeweilige Niederschlagsart (Landregen, Gewitter, Niesel, etc.) anpasst, oder durch die Anwendung einer mehrparametrischen Messung (Köck, 1999). Praktisch kann dieser Vorschlag nicht umgesetzt werden, da es keine objektiven Methoden gibt, zwischen diesen Niederschlagsformen zu unterscheiden.

2.3.2 Probleme aufgrund der Charakteristik und Standort des Radars

Systembedingte Fehler

Darunter versteht man Fehler, die am Radar selbst auftreten und sich aber nur langsam im Laufe der Zeit bemerkbar machen. Diese Fehler werden sowohl durch Alterung der elektronischen Bauteile, deren Parameter sich mit der Zeit verändern, als auch durch Abnutzung der mechanischen Bauteile, wie dem Getriebe, hervorgerufen. Um solche Fehler zu vermeiden, sollte das Radargerät regelmäßig geeicht werden.

Standortwahl

Bei der Wahl eines Radarstandorts müssen verschiedene Aspekte und die daraus resultierenden Effekte berücksichtigt werden. Folgende Faktoren beeinflussen die Qualität der Radarmessung zu einem größeren oder kleineren Grad:

- (a) Horizont
- (b) Permanente Echos (Clutter)
- (c) benötigte maximale Reichweite
- (d) Schnittpunkt mit der Schmelzschicht
- (e) Gebiete für die Daten besonders wichtig sind
- (f) Verfügbarkeit der benötigten Infrastruktur, wie Elektrizität, Straßen, Gebäude, etc.
- (g) zulässige Trennung zwischen Radarantenne und Sender/Empfänger und zwischen Transmitter/Empfänger und Kontroll- und Bildschirm-Einheiten
- (h) mögliche Interferenzen mit oder von anderen elektrischen Systemen in der Umgebung
- (i) ob Standort bemannt oder unbemannt ist (Sicherheitsüberlegungen)

Sekundäre Radar Echos

Der Begriff der Secondary Echos wird hier verwendet um einige vergleichsweise seltene Effekte aufgrund der von nicht standardmäßigen Funktionen des Radarsystems oder von Mehrfachreflexionen eines Radarstrahls zusammenzufassen. Diese Art von Echos treten häufig bei S-Band Radars auf, aber sind ziemlich unüblich bei C-Band Radars, außer bei entfernten intensiven Gewittern. In Nordeuropa sind sie ziemlich selten ein Problem.

Second-trip Echos Ein Radar hat eine eindeutige maximale Reichweite, die durch die Impulswiederholungsfrequenz oder durch das Zeitintervall zwischen aufeinanderfolgenden Impulsen bestimmt ist. Für Echos, die in dem Intervall zwischen der Ausstrahlung eines Impuls und des nächsten zurückkehren, kann die Position eindeutig bestimmt werden. Echos von Zielen außerhalb der maximalen Reichweite kehren erst, nachdem der nächste Impuls übertragen wurde, zurück. Die Echos werden dann dem aktuellen Impuls zugeordnet und somit wird eine zu kurze Distanz berechnet. Solche Effekte sind als second-trip-Echos bekannt.

Seitenkeulen Echos Die vom Radar ausgestrahlte Energie entlang eines Hauptstrahls hat eine typische Strahlbreite von etwa 1° . Aber auch entlang der Seitenkeulen (*side lobes*), die sich ein paar Grad neben dem Zentrum des Hauptstrahls befinden, wird Energie ausgestrahlt. Normalerweise sind die *Sidelobesreturns* zu schwach um signifikant zu sein. Ausnahmen können aber bei sehr stark reflektierenden Zielen, wie z.B. bei intensiven Regen oder Hagel innerhalb einer Cb-Wolke, auftreten (Bader et al., 1995).

Flare Echos Ein anderer Effekt, welcher ein Auftreten einer sogenannten *Hail spike* im PPI-Display verursachen kann, ist das Resultat der Verlängerung des Wegs des zurückkehrenden Echos durch mehrfache Reflexionen von Hagel und Boden. Die Extrazeit, die gebraucht wird bis das Signal zurückkommt, wird durch das Radar als ein weiterentferntes Echo interpretiert. Im Radarbild ist dann eine strahlenförmige Spitze zu sehen (Bader et al., 1995).

Unvollständige Strahlfüllung

Das kleinste vom Radar messbare Volumen stellt eine Echozelle dar. Das Volumen der Echozelle ist aber nicht konstant, sondern ändert sich stark mit dem Abstand zum Radar. Zwar ist die Länge der Echozelle, bedingt durch die konstante Impulsdauer konstant, durch die Strahlbreite von 1° jedoch beträgt der Radius der Echozelle bei 100 km Entfernung vom Radar bereits $2 \cdot 100 \cdot \pi \cdot 1/360 = 1.74$ km. Bei einer durchschnittlichen maximalen Reichweite der Wetterradars von 230 km bereits 4 km. Speziell bei großen Entfernungen zum Radar ist es daher möglich, dass eine Niederschlagszelle eine vom Radar gemessenen Echozelle nur teilweise ausfüllt und daher in ihrer Intensität unterbewertet.

Die Integration über inhomogen gefüllte Echozellen kann auch zum Effekt der unvollständigen Strahlfüllung führen. Die Konstanten a und b in der ZR-Beziehung gehen bekanntlich von einem bestimmten Regentyp aus. Treten nun mehrere unterschiedliche Regentypen innerhalb einer Echozelle auf, so wird das Ergebnis durch Integration über diese Echozelle ebenfalls verfälscht (Leitner, 1999).

Abschattung durch Orographie

Einer der offensichtlichsten Fehler bei der Niederschlagsmessung mit Radar ist die Abschattung. Unter Abschattung versteht man, dass zwischen dem Radarstandort und dem Ziel keine direkte Sichtverbindung besteht oder die Sicht zumindest teilweise durch Hindernisse gestört ist. Das Ziel befindet sich also im Schatten des Hindernisses. Das Radar misst daher eine wesentlich geringere Reflektivität. Im schlimmsten Fall wird bei totaler Abschattung gar kein Niederschlag gemessen. Die Abschattung durch Gebirge ist ein großes Problem u.a. in den Alpen. Daher gibt es für jeden Radarstandort sogenannte Abschattungsdiagramme, die bei bestimmten Seehöhen die zu erwartende Radarreichweite durch die Topographie wiedergeben.

Auch sei in diesem Zusammenhang noch erwähnt, dass auch aufgrund der Erdkrümmung eine Abschattung entsteht. So hat zum Beispiel der Radarstrahl bei 0° Elevation in 200 km Entfernung bereits eine Höhe von etwa 3.5 km (Köck, 1999).

Festechos

Mit Festechos, oder auch Clutter-Echos, bezeichnet man jene Echos, die nicht von Niederschlägen stammen, sondern von anderen Objekten, die sich im Ausbreitungspfad des Mikrowellenimpulses befinden und eine entsprechende Signalleistung reflektieren können. Das sind unter anderem:

- Bodenechos (*Ground Clutter*)
- Anomalous Propagation-Clutter
- Bewegliche Ziele wie Flugzeuge, Insekten, Vögel, Chaff etc.
- Inhomogenitäten des Brechungsindex

Schon durch die sorgfältige Auswahl des Radarstandorts und eine gute Auslegung der Antennencharakteristik wird versucht Clutter schon bei der Planung zu vermeiden, bzw. beim laufenden Radarbetrieb durch Maßnahmen in der Radarsignalverarbeitung und bei der Bildverarbeitung.

Bodenechos Unter Bodenechos, oder auch *Ground Clutter*, versteht man den Effekt, dass der Mikrowellenimpuls nicht nur von einer Regenzone, sondern auch von Festzielen am Boden (Berge, Vegetation, Gebäude, etc.) reflektiert werden kann. Daher stellen vor allem in gebirgigem Gelände Bodenechos ein markantes Problem dar. Diese Festziele können in der Haupt- und in einer der Nebenkeulen der Antennen liegen bzw. bei niedrigen Elevationen, wo die Seitenkeulen Richtung Erdboden weisen. So betragen die ermittelten Niederschlagswerte an einzelnen Punkten oft das Mehrfache der tatsächlichen Niederschlagsrate.

In den letzten Jahren sind einige Methoden zur Clutter-Unterdrückung entwickelt worden. In modernen Radaranlagen sind viele dieser Methoden implementiert, die vom Radarbetreiber bei Bedarf aktiviert werden können. Da mit den Cluttern auch leicht Niederschlag weggefiltert wird, muss bei fast allen Methoden überlegt vorgegangen werden und meist ist eine visuelle Kontrolle notwendig.

Als Unterscheidungsmerkmale zwischen realen Echos und Clutter gibt es zum einen die radiale Geschwindigkeit (Clutter haben eine radiale Geschwindigkeit, die nahe der Nulllinie liegt), zum anderen fluktuieren clutterbehaftete Pixel in Animationsabläufen zeitlich stark.

Eine der ältesten Methoden der Clutter-Filterung ist die sogenannte Clutter-Map. Unter einer Clutter-Map versteht man eine für jedes Wetterradar spezifische Tabelle, in der für jedes (räumliche) Pixel eine Information vermerkt ist, ob dieser Clutter behaftet ist, oder nicht. Diese Information wird gewonnen, indem man bei klarem Wetter einen Volummscan macht, bei dem Echos nur von Clutter stammen können. Bei operationellen Radarmessungen werden schließlich alle Pixels, die clutterbehaftet sind, ausgeblendet, bzw. durch eine Interpolation aus den Nachbarpixels substituiert. In der Praxis liefert diese Methode nicht allzu gute Resultate, weil sich

aufgrund von witterbedingten Änderungen im Ausbreitungspfad die Clutter-Situation dynamisch ändert und dies in der Clutter-Map nicht berücksichtigt werden kann (Köck, 1999).

Anomalous Propagation Clutter Der Radarstrahl breitet sich im luftleeren Raum geradlinig mit Lichtgeschwindigkeit aus. Daher werden aufgrund der Erdkrümmung in großer Entfernung nur sehr hochreichende Objekte erfasst.

In der Troposphäre unterliegt er, genauso wie ein Lichtstrahl, den atmosphärischen Brechungsgesetzen. Beim Übergang des Strahls vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium erfolgt die Brechung zum Lot. Da die Luftdichte in der Troposphäre generell mit der Höhe abnimmt, wird der Radarstrahl beim Durchdringen dieser Schicht permanent vom Lot nach unten gebrochen und von der Antennenachse in Richtung Erdboden gekrümmt. Es gibt aber Temperaturprofile, die von dieser Norm abweichen, wie z.B. Boden- und Höheninversionen. Es kommt zu starken Gradienten des Brechungsindex und der Ausbreitungsweg des Mikrowellenimpulses erfährt eine künstliche Krümmung. Dies führt zu großen Abweichungen zum normalen Ausbreitungsweg und zur Totalreflexion bei sehr niedrigen Elevationswinkel. Dieser Effekt ist als *Anaprop* bzw. Anomalous Propagation Clutter bekannt. Dabei kommt es zu Fata Morgana⁵ ähnlichen Effekten: Die Radarstrahlen spiegeln sich an der Inversion und somit werden Bodenziele hinter dem üblichen Radarhorizont sichtbar. Man unterscheidet zwei Effekte (Krennert, 2001):

- *Subrefraktion*: Der Brechungsindex nimmt mit der Höhe zu, die Wellen werden weniger stark zur optisch dichteren Schicht gebrochen und somit von der gekrümmten Erdoberfläche weggebogen. Dies führt zu einer Verringerung der Reichweite.
- *Superrefraktion*: Die Atmosphäre wird nach oben hin optisch dünner und somit vergrößert sich der Radarhorizont. Bei dieser Art der Ausbreitung treten schnelle Amplituden- und Phasenzintillationen auf, welche spektrale Echobreiten vortäuschen, die sonst nur von Niederschlägen generiert werden.

Aufgrund dieser Phasenverschiebung und der scheinbaren Dopplerfrequenz ungleich Null lassen sich Anaprop-Clutter-Echos nicht mit Methoden wie bei den Ground-Clutter von Niederschlags-echos unterscheiden. Die einzige mögliche Unterscheidung kann durch die Anwendung von mehrparametrischen Methoden, besonders aber auch durch die Erfassung von kreuzpolaren Echos erfolgen.

Bewegliche Festziele Bewegliche Festziele werden von den herkömmlichen Clutter-Filtern nicht erfasst. Meistens handelt es sich dabei um Flugzeuge oder andere Flugkörper. Diese Echos treten typischerweise nur in einer Elevation auf und beschränken sich auf nur einen Zeitpunkt,

⁵Luftspiegelung benannt nach der zauberkundigen Sagenfigur Fee Morgane, einer Halbschwester König Arthus.

d.h. sowohl im zeitlichen darauffolgenden Radarbild als auch im zeitlich vorhergehenden ist das Echo an der gleichen Stelle nicht zu finden.

Zur Erkennung und Eliminierung dieser Artefakte wird ein Mustererkennungsalgorithmus in Polarkoordinaten herangezogen. In Polarkoordinaten stellen sich diese Artefakte als Muster mit nahezu konstanter Entfernung und über einige Grad variablen Azimutwinkel dar (Leitner, 1999).

Ebenso sei noch erwähnt, dass es auch sogenannte *Chaff*, kleine, meist metallhaltige Streupartikel, die die Radarstrahlung stark reflektieren, gibt. Diese werden vor allem bei militärischen Flugübungen freigesetzt. Die metallhaltigen Streupartikel bewegen sich mit dem Wind in der entsprechenden Höhe, breiten sich dabei aus und sinken zu Boden (Gysi, 2003).

Sea Clutter Unter bestimmtem Windverhältnissen und auch atmosphärischen Bedingungen können steil aufsteigende Wellenberge die elektromagnetische Energie des Radar reflektieren. Diese als Sea Clutter bekannte Phänomene reichen von bescheidenen bis zu großem Reflexionsvermögen und erstrecken sich dann über relativ große Flächen. Da sich die auftretenden Dopplereffekte der Wellen und des Windes überlagern, kann sich die Berechnung von Geschwindigkeiten aus der Dopplereffekte verkomplizieren. Auch enthalten Sea Clutter auch Echos von Schiffen und somit sind Schiffsrouten teilweise verfolgbar (Wolff, 2003).

2.3.3 Probleme aufgrund der Charakteristik des Niederschlag und der atmosphärischen Bedingungen

Tropfengrößen-Effekt und ZR-Beziehung

Wie oben schon erwähnt enthält die ZR-Beziehung Annahmen betreffend der Tropfengrößenverteilung bei verschiedenen Niederschlagsraten. Durch Fehler und Fluktuationen bei der Messung der Reflektivität Z kann es einerseits durch eine schlechte Kalibrierung des Radars, andererseits durch eine zu geringe Anzahl an Einzelimpulsen während der beschränkten Messzeit, zu Fehlern kommen.

Auch gibt es eine natürliche Variabilität der Reflektivität durch die unterschiedlichen Tropfengröße und ihre unterschiedlichen Fallgeschwindigkeiten im Impulsvolumen. Das ergibt eine Standardabweichung von etwa 1 dBZ bei 30 unabhängigen Einzelmessungen. Dies entspricht einem relativen Fehler von 25 % bei der Messung stark schwankender Reflektivität Z, bzw. einen Fehler von 16 % bei der Umrechnung auf Niederschlagsraten R und der Annahme der Tropfengrößenverteilung von Marshall und Palmer (1948).

Ungleichmäßige vertikale Verteilung der Reflektivität

Der Radarstrahl erreicht bei weiten Entfernungen vom Radarstandort in eine beträchtliche Höhe. Dadurch gewinnt das vertikale Profil der Reflektivität an Bedeutung.

Die ungleichmäßige Verteilung der Reflektivität mit der Höhe kann folgende Ursachen haben:

- den Entstehungsmechanismus von Regen:
 - Übergang Wolke auf Regen
 - Übergang Eiswolke/Schnee auf Schmelzzone und auf Regen
 - konvektiver Turm mit Wasser/Hagel-Updraft und seitlich ausfallenden Regen/Hagel
- Luftbewegungen
- Evapotranspiration
- Aggregatsänderungen des Niederschlags
- ungleichmäßige Tropfenverteilungen

Da das Volumen, über das gemittelt wird, mit der Entfernung zum Radar zunimmt, kommt es mit größerer Entfernung zum Radar zu einer gleichmäßigeren vertikalen Reflektivitätsverteilung.

Bright Band aufgrund von Schnee, Eis und Hagel

Es gibt markante Unterschiede der Reflektivitätsfaktoren und der Fallgeschwindigkeit zwischen den verschiedenen Typen von flüssigen (Regen) und festen Niederschlägen (Schnee, Hagel).

Nasser Schnee wird mit dem höchsten Reflektivitätsfaktor assoziiert. In der Schmelzzone, wo feste Niederschläge wie Schnee und Graupel in Regen übergehen, ist die Reflektivität etwas erhöht. Auf dem Radar werden dann erhöhte Echos, bekannt als *bright band* oder auch *melting layer*, sichtbar. Diese Bezeichnung stammt noch aus der Zeit der Einfarben-Analog-Bildschirme, die eine höhere Reflektivität durch ein helleres Signal anzeigten. In der PPI-Darstellung nimmt ein Bright Band die Form eines Ringes von fälschlicherweise hohem Niederschlag an. Bei einem Vertikalschnitt durch die Atmosphäre erscheint die Schmelzzone dann tatsächlich als helles Band. Der Anstieg der Reflektivität kann zumindest 50 %, manchmal wesentlich mehr betragen.

Auch bei großen Hagelkörnern in Cb-Wolken kann dieser Effekt auftreten. Für operationelle *Forecaster* kann diese Reaktion möglicherweise ein sehr nützliches Signal am Radardisplay zur Erkennung von schwerem darstellen. Dennoch ist es kein guter Leitfaden für entsprechenden Niederschlagsrate, denn die Streuung des Radarstrahls bei großen Hagelkörnern folgt nicht demselben Gesetz der Streuung wie bei kleineren Regen- oder Schneepartikel. Ohne spezielle Kalibrierung neigten Radargeräte dazu, die Niederschlagsmenge zufolge von Hagel zu überschätzen. Obwohl Hagelereignisse möglicherweise sehr zerstörerische Wirkung zeigten, produzieren sie nur bescheidene Mengen an Niederschlag.

Entwicklung und Verdunstung des Niederschlags unterhalb des Strahls

Die beste Abschätzung des Niederschlags an der Erdoberfläche erhält man, wenn man die Radarstrahlelevation so gering wie möglich hält, unter Berücksichtigung des Bodenecho- und Abschattungsproblem. Aber selbst bei dem niedrigsten Elevationswinkel kann es vorkommen, dass der gemessene Niederschlag innerhalb einer Wolke möglicherweise in der trockenen Luft unterhalb der Höhe des Strahls verdunstet. Dies führt zu einer Überschätzung der Niederschlagsrate an der Erdoberfläche. Dieser Effekt tritt meist an der Vorderseite einer Warmfront und bei größeren Entfernungen, wo sich der Strahl schon einige Kilometer oberhalb des Erdbodens befindet, auf.

Ein zum Gegenteil führenden Effekt entsteht, wenn schwacher Niederschlag in einer bestimmten Höhe gemessen wird, dieser aber durch eine sehr feucht, bewölkte Luft nahe dem Erdboden fällt. Dieser *seeder feeder*-Mechanismus der Niederschlagsintensivierung resultiert in einer Unterschätzung des gefallenen Niederschlags.

Elektromagnetische Interferenzen: Sonneneinstrahlung

Befindet sich der Ausbreitungsweg des Sonnenlichts genau mit der Hauptrichtung des Radarstrahls auf einer Linie, so kommt es bei entsprechender Stärke der Sonneneinstrahlung zu einem verstärkten Rauschen im Radarempfänger und zu entsprechenden Störungen im Radarbild. Dieser Effekt tritt hauptsächlich im Winter am Morgen und am Abend auf, weil zu diesen Zeiten der Sonnenstand am niedrigsten ist.

In Polarkoordinaten stellen sich einzelne Muster zufolge der Sonneneinstrahlung als Streifen mit konstanten Azimutwinkel dar. Solche Muster lassen sich durch geeignete Mustererkennungsalgorithmen identifizieren und eliminieren. Als weiteres Entscheidungskriterium kann auch die Tatsache herangezogen werden, dass die Sonneneinstrahlung in den Radardaten als weißes Rauschen auftritt, welches im Spektrum gleichverteilt ist. Durch Einbeziehung dieses zusätzlichen Kriteriums kann verhindert werden, dass Niederschlagsechos fälschlicherweise als Sonneneinstrahlung erkannt und eliminiert werden (Leitner, 1999).

Kapitel 3

Verwendete Daten

Die Niederschlagsradar­daten liegen von zwei europäischen Radar­netzwerken, dem CERAD und BALTRAD, vor. Als Referenzfelder stehen 24­stündige Ombrometer­messungen zu Verfügung. Der Datensatz umfasst 15 Monate, von Oktober 1999 bis Dezember 2000.

Im Folgenden wird kurz über Radar­netzwerke und Fehler­quellen im Allgemeinen diskutiert und die verwendeten Datensätze näher beschrieben.

3.1 Die Radar­netzwerke

Die Idee statt einzelner Radar­bilder ein Gesamtbild dieser zu betrachten existiert schon lange. Seit die Wetter­radar­daten in digitaler Form vorliegen, in Kombination mit der immer größer werdenden Leistungsfähigkeit von Computer und schnelleren Daten­leitungen, ist dies auch möglich. Solche Einzel­bilder zu einem Gesamtbild zusammengefügt nennt man auch Composite.

Die Vorteile sind leicht zu erkennen. Moderne Radar­geräte haben eine maximale Reichweite von 200 bis 320 km. Mit einem Gerät kann daher ein Gebiet von 250.000 bis 640.000 km² abdecken werden. Berücksichtigt man, dass die Qualität der Niederschlags­messung bei großen Entfernungen stark nachlässt, benötigt man für die flächendeckende Messung eines größeren Gebiets mehrere Radar­geräte.

Auch in Österreich gibt es schon seit der Errichtung der ersten digitalen Radar­geräte im Jahre 1985 ein Gesamtbild, das die Anwender nahezu flächendeckend mit der Niederschlags­situation von ganz Österreich versorgt.

Bei der Verwendung von mehreren Radar­geräten für die Überwachung eines Gebiets ist es üblich, dass für einen Punkt Messungen von mehr als nur einem Gerät vorliegen. Es gibt verschiedene Methoden, bei Überschneidung an einem Punkt den geeignetsten Wert auszuwählen. Einige dieser Methoden sind:

- Der Wert des Radars das dem Punkt am nächsten liegt, wird verwendet.

- Der Wert mit der höchsten Intensität wird verwendet.
- Der Wert des Radars, welches an dem Punkt am nächsten am Erdboden misst, wird verwendet.
- Der Wert des Radars, das für den Punkt den neuesten Wert hat, wird benutzt.
- Der Mittelwert aus allen zur Verfügung stehenden Messungen wird benutzt.
- Aufgrund einer willkürlichen Festlegung, welches Radar wahrscheinlich die genaueren Messungen liefert, werden nur die Werte dieses Radar verwendet.
- Festlegen von statischen und dynamischen Grenzen.

Bei den meisten Radarnetzwerken werden Kombinationen dieser Methoden benutzt. Natürlich hat jede Methode ihre Vor- und Nachteile und diese müssen für jedes Gebiet sorgsam abgewogen werden (Köck, 1999; Strümpel, 2001).

Ein weiteres Problem entsteht, wenn einzelne Radarstandorte ausfallen und für dieses Gebiet keine Informationen zu Verfügung stehen. Aufgrund von technischen Problemen kann auch für einen Termin kein Gesamtbild vorhanden sein.

3.1.1 CERAD

Das CERAD, Central European Radar Data Network, ist das zentraleuropäische Radarnetzwerk mit insgesamt 11 beteiligten Staaten. Derzeit besteht es aus rund 41, überwiegend C-Band, Radars. Nur in einigen osteuropäischen Ländern, wie Ungarn, Slowakei und Polen gibt es auch X- bzw. S-Band Geräte. Hierbei schlagen vor allem die nationalen Interessen durch, so werden z.B. in Kroatien S-Band Geräte in der Hagelforschung verwendet, da bei größerer Wellenlänge die Ausbreitungsdämpfung geringer ist.

Ungefähr dreiviertel der Radarstandorte sind mit Dopplergeräten ausgestattet. Die maximale Reichweite der einzelnen Radargeräte liegt zwischen 200 (österreichische Radars) und 320 km (holländische Radars), in Betrieb genommen wurden diese zwischen 1979 und 2002. Betrieben werden die einzelnen Radars von nationalen Wetterdiensten. Die einzelnen Radarstandorte, ihre geographische Lage und ihre nähere Beschreibung sind in Tab. 3.1 aufgelistet ¹.

Das Composite wird an der Technischen Universität Graz am Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung erstellt. Beim Compositing wird die Methode des *Maximum Intensity Produkts* angewendet, nach Köck (1999) ein guter Kompromiss. Generell steht ein Bild ungefähr alle 30 Minuten mit einer räumlichen Auflösung von 4x4 km zur Verfügung. In Abb. 3.1 ist das Gebiet, dass das CERAD bestenfalls abgedeckt, dargestellt.

¹Quelle:<http://www.chmi.cz/OPERA/dbase/OperaDatabaseIntro.html>

Tab. 3.1: CERAD

RADAR- STANDORT	Breite [° N]	Länge [° E/W]	Höhe [m]	Band (S,C,X)	Doppler ja/nein	Range [km]	betrieben seit
<i>Belgien</i> <i>www.meteo-oma.be</i>							
Zaventem	50.900	4.467	73	C	ja	240	1988
Wideumont	49.915	5.505	592	C	ja	240	2001
<i>Deutschland</i> <i>www.dwd.de</i>							
Hamburg Fuhlsbüttel	53.623	9.992	46	C	nein	230	1990
Rostock-Warnemünde	54.172	12.056	36	C	ja	230	1995
Emden	53.340	7.024	58	C	ja	230	1994
Hannover	52.458	9.692	81	C	ja	230	1994
Ummendorf	52.156	11.173	185	C	ja	230	1996
Berlin-Tempelhof	52.474	13.386	80	C	ja	230	1991
Essen	51.407	6.968	180	C	nein	230	1991
Flechtendorf	51.334	8.852	550	C	ja	230	1997
Dresden	51.122	13.768	262	C	ja	230	2000
Neuhaus am Rennweg	50.500	11.137	873	C	ja	230	1994
Neuheilenbach	50.106	6.500	585	C	ja	230	1998
Frankfurt am Main	50.052	8.568	146	C	nein	230	1988
Eisberg	49.541	12.402	799	C	ja	230	1997
Türkheim	48.585	9.784	765	C	ja	230	1998
München-Fürholzen	48.336	11.614	511	C	nein	230	1987
Feldberg	47.871	8.003	1517	C	ja	230	1997
<i>Holland</i> <i>www.knmi.nl</i>							
Den Helder	52.954	4.791	51	C	ja	320	1997
De Bilt	52.100	5.183	44	C	ja	320	1997
<i>Kroatien</i> <i>http://meteo.hr</i>							
Osijek	45.503	18.566	88	S	nein	240	1995
Bilogora	45.883	17.206	231	S	nein	240	1994
Slijeme	45.908	15.973	985	S	nein	240	1980
<i>Österreich</i> <i>www.zamg.ac.at</i>							
Wien/Schwechat	48.119	16.562	183	C	ja	200	1979
Salzburg/Feldkirchen	48.065	13.062	581	C	ja	200	1997
Patscherkofel	47.209	11.461	2254	C	ja	200	1997
Zirbitzkogel	47.072	14.560	2372	C	ja	200	1997
Fortsetzung nächste Seite							

RADAR- STANDORT	Breite [° N]	Länge [° E/W]	Höhe [m]	Band (S,C,X)	Doppler ja/nein	Range [km]	betrieben seit
<i>Polen</i> <i>www.imgw.pl</i>							
Legionowo	52.4	20.967	125	XS	nein	240	1991
Katowice ²	50.142	18.726	357	C	ja	200	1995
Bolkow ³	50.883	16.04	692	C	ja	200	2000
<i>Schweiz</i> <i>www.meteoschweiz.ch</i>							
Albis	47.285	8.513	928	C	ja	230	1994
La Dole	46.426	6.100	1680	C	ja	230	1995
Monte Lema	46.042	8.834	1625	C	ja	230	1993
<i>Slowakei</i> <i>www.shmu.sk</i>							
Maly Javornik	48.256	17.153	600	C	ja	240	1998
Kojsovaska hola	48.787	20.995	1262	XS	nein	300	1991
<i>Slowenien</i> <i>www.rsz-hm.si</i>							
Lisca	46.068	15.290	941	C	ja	200	2002
<i>Tschechien</i> <i>www.chmi.cz</i>							
Brdy-Praha	49.658	13.818	916	C	ja	256	2000
Skalky	49.501	16.790	767	C	ja	260	1996
<i>Ungarn</i> <i>www.met.hu</i>							
Budapest	47.429	19.182	163	C	ja	240	1999
Napkor	47.963	21.889	155	XS	nein	256	1991
Farkasfa	46.194	16.317	327	XS	nein	256	1993

Da das CERAD-Composite aus den nationalen Composites zusammengesetzt wird, variieren die ZR-Beziehungen von Land zu Land. Einige der ZR-Beziehungen lauten (Krennert, 2001):

$$\begin{array}{ll} \text{Österreich} & Z = 200 R^{1.6} \\ \text{Deutschland} & Z = 256 R^{1.42} \\ \text{Schweiz} & Z = 300 R^{1.5} \end{array}$$

3.1.2 BALTRAD

BALTRAD - das Baltic Radar Network - setzt sich derzeit aus 31 Radargeräten in sechs Ländern entlang der Ostseeküste zusammen. Betrieben werden die einzelnen Radars, vorwiegend C-Band, von den nationalen Wetterdiensten der skandinavischen Ländern.

²Pastewnik

³Orzeszcze-Ramza



Abb. 3.1: CERAD-Defaultmaske

Die Daten der nationalen Wetterdiensten werden im BALTEX⁴ Radar Data Center gesammelt und zu einem 500 m Pseudo-CAPPI-Bild zusammengefügt. Dieses hat eine zeitliche Auflösung von 15 Minuten und eine räumliche Auflösung von 2x2 km. Das Composite wird mittels festgelegten statischen und dynamischen Grenzen zusammengesetzt. Im Überlappungsbereich der einzelnen Geräte wird jener Pixelwert verwendet, der entweder am nächsten ist oder bei dem die Höhe über dem Seelevel am niedrigsten ist (Michelson et al., 2000). In Abb. 3.2 ist das vom BALTRAD abgedeckte Gebiet dargestellt. Es ist anzumerken, dass hier alle in der ELDAS-Periode vorhandenen Stationen eingezeichnet sind. Aber wie aus Tab. 3.2 unter anderem zu entnehmen ist, wurden einige Stationen erst im Laufe der Periode in Betrieb genommen oder wieder abgeschaltet (Michelson, 2004).

⁴Baltic Sea Experiment



Abb. 3.2: BALTRAD-Defaultmaske

Tab. 3.2: BALTRAD

RADAR- STANDORT	Breite [° N]	Länge [° E/W]	Höhe [m]	Band (S,C,X)	Doppler ja/nein	Range [km]	betrieben seit
<i>Norwegen</i>							<i>http://met.no</i>
Oslo	59.858	10.387	458	C	ja	240	1992
Hægebostad	58.355	7.158	631	C	ja	240	1999
<i>Finnland</i>							<i>www.fmi.fi</i>
Korpo	60.128	21.646	61	C	ja	250	1997
Vantaa	60.271	24.873	83	C	ja	250	1993
Ikaalinen	61.767	23.080	154	C	ja	250	1993
Kuopio	62.862	27.385	268	C	ja	250	1995
Anjalankoski	60.904	27.111	139	C	ja	250	1993
Utajärvi	64.774	26.323	118	C	ja	250	1997
Luosto	67.138	26.901	534	C	ja	250	2000
Rovaniemi	66.610	24.840	209	X	nein	-	1998-2000
<i>Schweden</i>							<i>www.smhi.se</i>
Karlskrona	56.300	15.610	122	C	ja	240	1990
Hemse	57.240	18.390	56	C	ja	240	1990
Göteborg	57.720	12.170	164	C	ja	240	1988
Norrköping	58.617	16.117	57	C	ja	240	1983
Arlanda	59.660	17.950	75	C	ja	240	1986
Leksand	60.723	14.880	458	C	ja	240	1994
Hudiksvall	61.572	16.716	388	C	ja	240	1992
Östersund	63.175	14.454	465	C	ja	240	1995
Örnsköldsvik	63.640	18.400	522	C	ja	240	1991
Luleå	65.550	22.133	35	C	ja	240	1993
Kiruna	67.710	20.622	646	C	ja	240	1996
<i>Dänemark</i>							<i>www.dmi.dk</i>
Sindal	57.489	10.136	93	C	ja	240	1994
Copenhagen	55.6	12.62	5	C	nein	240	1986-2001
Rømø	55.173	8.552	10	C	ja	240	1992
<i>Deutschland</i>							<i>www.dwd.de</i>
Hamburg	53.623	9.992	46	C	nein	230	1990
Rostock	54.172	12.056	36	C	ja	230	1995
Berlin	52.474	13.386	80	C	ja	230	1991
Fortsetzung nächste Seite							

RADAR- STANDORT	Breite [° N]	Länge [° E/W]	Höhe [m]	Band (S,C,X)	Doppler ja/nein	Range [km]	betrieben seit
Dresden	51.122	13.768	262	C	ja	230	2000
<i>Polen</i>							<i>www.imgw.pl</i>
Legionowo	52.4	20.967	125	XS	nein	240	1991
Katowice ⁶	50.142	18.726	357	C	ja	200	1995
Bolkow ⁷	50.883	16.04	692	C	ja	200	2000

Da die Daten als dBZ-Werte abgespeichert werden und die Einheit mm/h benötigt wird, müssen die Daten umgerechnet werden. Dies geschieht über die ZR-Beziehung. Im BALTRAD werden zwei ZR-Beziehungen verwendet. Für kalte Monate, d.h. Oktober bis März, lautet die Beziehung $Z = 400Z^{2.0}$. Während für die warmen Monate, von April bis September, die Beziehung $Z = 200Z^{1.5}$ verwendet wird.

Im Folgenden wird nun diese Gleichung

$$mm/h = \frac{1}{\sqrt{200}} \left(10^{(0.4 * dBZ - 30)/10} \right)^{1/2} \quad (3.1)$$

verwendet, die sowohl die beiden ZR-Beziehungen berücksichtigt, als auch die Werte von dBZ auf mm/h umrechnet.

3.2 Das Ombrometer Netzwerk

Als Referenzfelder stehen 24-stündige Ombrometermessungen von rund 20.000 europäischen Stationen zur Verfügung, wie in Abb. 3.3

Diese wurden im Rahmen des ELDAS-Projekts von der VU-Wien gesammelt. Diese Punktmessungen wurden hinsichtlich systematische Fehler korrigiert (Rubel und Hantel, 1999) und auf das räumliche Gitter von 0.2° interpoliert (Rubel und Hantel, 2001). Als Hintergrundfelder, d.h. über dem Atlantik und schwach besetzten Gebieten, wurden 24-stündige Vorhersagen des operationellen Laufs des ECWMF verwendet.

⁶Pastewnik

⁷Orzeszcze-Ramza

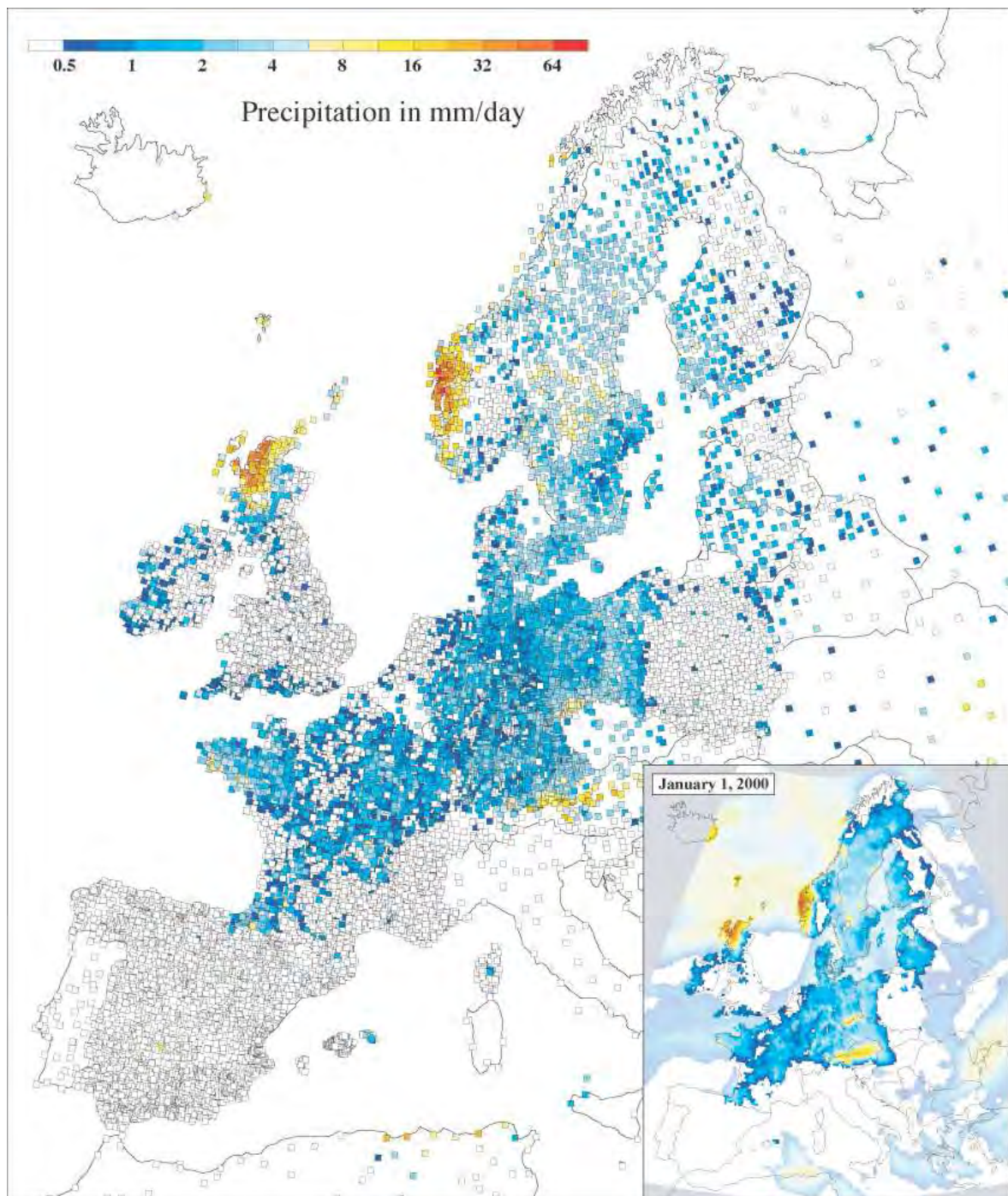


Abb. 3.3: ELDAS Niederschlagsdatensatz für den 1. Jänner 2000, 06 UTC. Einheiten in mm/Tag. Am Gitter analysierte Daten basieren auf 20.049 bias-korrigierten Messungen mit ECWMF Hintergrundfeld in helleren Farben (links unten) (Rubel, 2004)

Kapitel 4

Methode

In diesem Kapitel werden die Methoden der Akkumulation der drei- bzw. 24-stündigen Niederschlagsfelder, der Fehlererkennung und Filterung, sowie der Korrekturalgorithmus näher erläutert.

4.1 Akkumulation

Ziel dieser Arbeit ist, neben der Filterung und Korrektur der radarspezifischen Fehler in den Niederschlagsfeldern, auch die Akkumulation von dreistündigen Feldern für die Termine 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 und 21 UTC bzw. 24-stündige Felder für 06 UTC, wobei die Beginnzeiten der Akkumulationsperiode angegeben sind.

Im Folgenden ist nun die Methode beschrieben mit der hier die Daten aufsummiert werden. Erwähnt sei nur, dass es für das BALTRAD auch eine andere, ähnliche Methode gibt, die am BALTEX Radar Data Center angewendet wird (Michelson et.al., 2000).

Die Niederschlagsintensitäten werden akkumuliert unter der Berücksichtigung der Fehlwerte. Für jeden Pixel werden die Niederschlagswerte des Intervalls, d.h. 3 bzw. 24 Stunden, aufsummiert. Wurden für einen Pixel durchgehend Fehlwerte gemeldet, so wird dieser auch als Fehlwert gewertet. Da die Werte in mm/h abgespeichert sind, werden sie beim BALTRAD mit 1/4 und beim CERAD mit 1/2 auf ihre Gültigkeit für 15 bzw. 30 Minuten normiert.

In Abb. 4.1, 4.2, 4.4 und 4.3 sind 3h- bzw. 24h-Felder sowohl für das CERAD als auch für das BALTRAD dargestellt. Beim Vergleich der 24h-aufsummierten Radarfelder mit den analysierten Niederschlagsfelder ist deutlich zu erkennen, dass die Struktur des Niederschlag meist recht gut im Radarbild wiedergegeben wird. Allerdings fallen auch schon recht deutlich einige der in den Radardaten enthaltenen Fehler und Schwachstellen auf.

Da die Niederschlagsfelder räumlich höher aufgelöst sind als das ELDAS-Gitter, werden sie nach der Akkumulation interpoliert. Das CERAD wird von einem 780x640 Gitter, das BALTRAD von einem 815x1195 Gitter, auf ein 266x186 Gitter transformiert (Skomorowski, 2004).

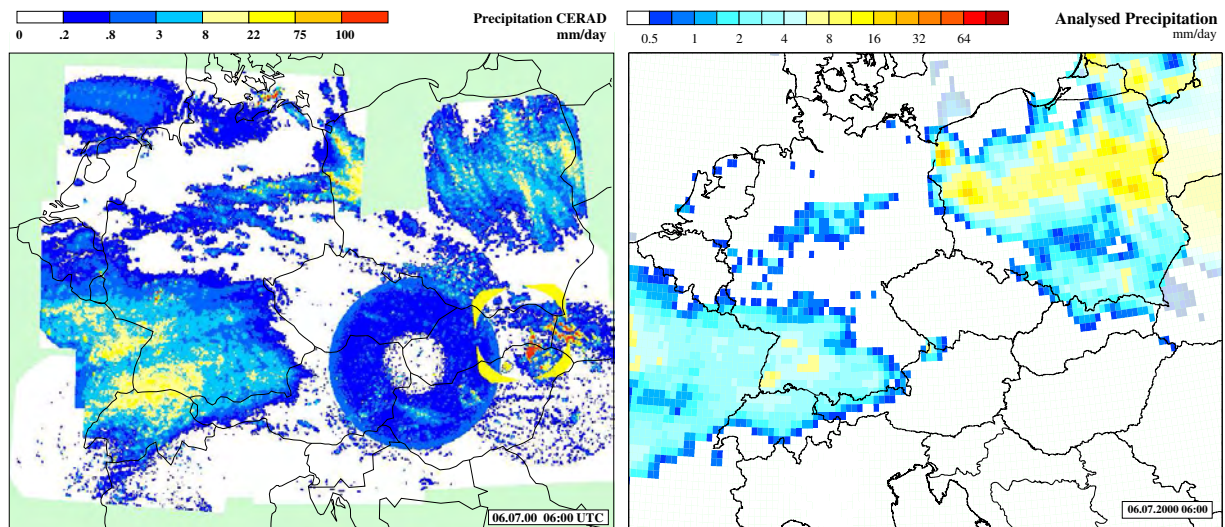


Abb. 4.1: 24h-stündiger Niederschlag in der original CERAD Auflösung (links) und Ausschnitt aus der Bodenanalyse basierend auf den Ombrometermessungen in Abb. 3.3 (rechts) für den 6. Juli 2000, 06 UTC.

4.2 Fehlererkennung

Bei der Akkumulation der einzelnen Felder zu 3- oder 24-stündigen Feldern stellt sich vor allem eine Frage: Wie zuverlässig ist die von Radar gelieferte Information für die einzelnen Pixel?

Diese Frage muss auf der einen Seite quantitativ und auf der anderen qualitativ beantwortet werden. Qualitativ im Sinne ob überhaupt Niederschlag gefallen und gemessen wurde, d.h. einfach ausgedrückt Niederschlag ja oder nein. Und quantitativ bezogen auf die Menge des tatsächlich gefallenen und gemessenen Niederschlags. In dieser Arbeit wird vorwiegend der qualitative Aspekt betrachtet.

Um einen ersten Eindruck von den vorhandenen Radardaten zu bekommen, wurden die Daten zunächst einmal einfach betrachtet. Dies geschah allerdings nur auszugsweise, da für die Periode von 15 Monaten rund 64.000 einzelne Bilder zu sichten gewesen wären. Daher wurde anfangs mit einem repräsentativen Beispiel für diese Periode gearbeitet und dann auf den gesamten Datensatz erweitert.

Generell folgt die Betrachtung und Interpretation eines Radarbildes folgender Grundidee: Die in einem Werradar-Bild enthaltenen Fehlerpixel von tatsächlichen Niederschlagspixel zu unterscheiden fällt einem geschulten menschlichen Betrachter meist nicht schwer. Vor allem Fehler verursacht durch Ground-Clutter oder Sonneneinstrahlung werden sehr schnell erkannt. Überwiegend bei Loops, d.h. bei der trickfilmartigen Anzeige der aufeinanderfolgenden aktuellsten Werradar-Bildern, erkennt der Meteorologe zufolge seiner Erfahrung Artefakte und lässt diese bei der Beurteilung der Wettersituation unberücksichtigt. Insofern ist das Bewerten von Radar-

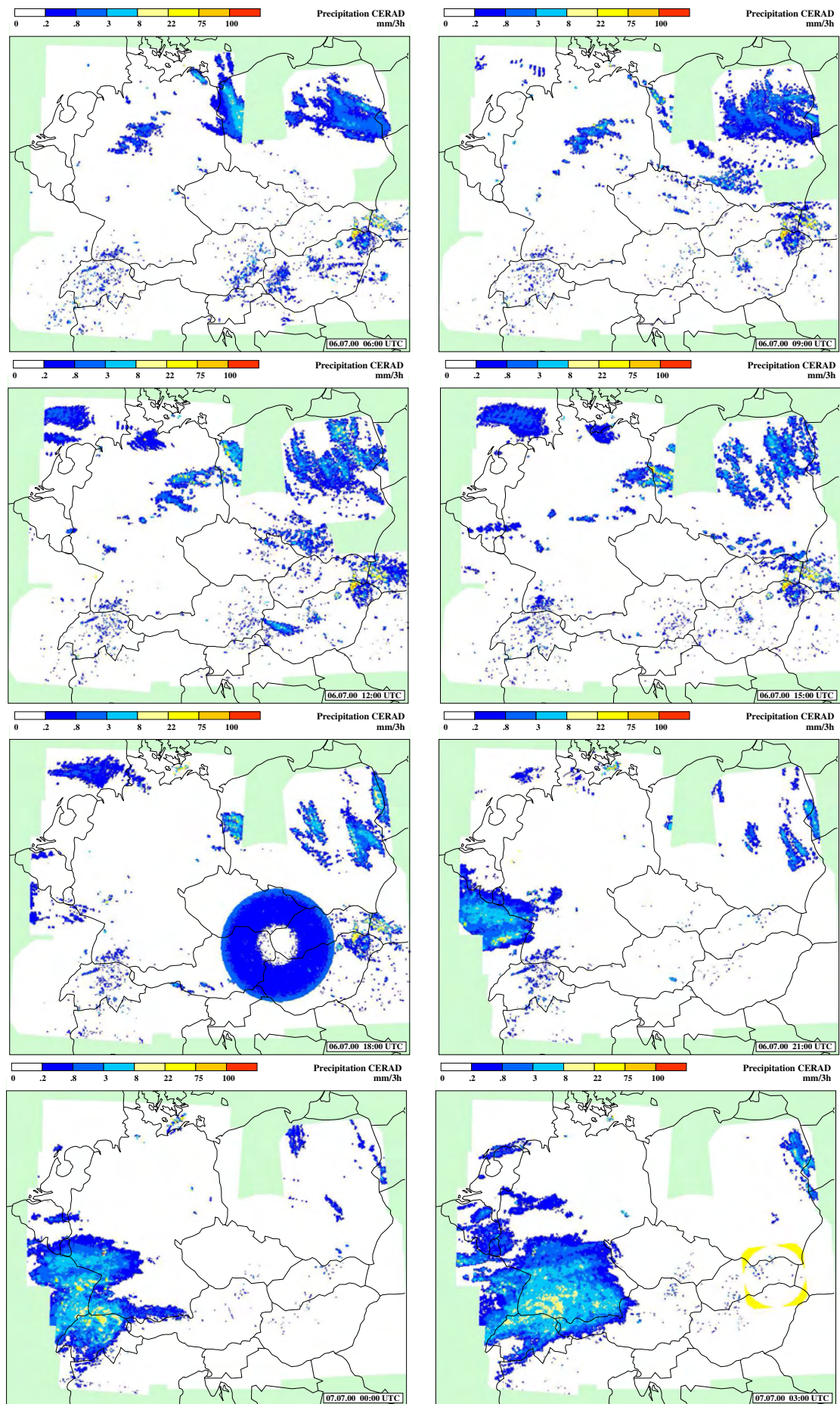


Abb. 4.2: 3h-stündiger CERAD-Niederschlag für 6.-7.Juli 2000, 06 - 03 UTC.

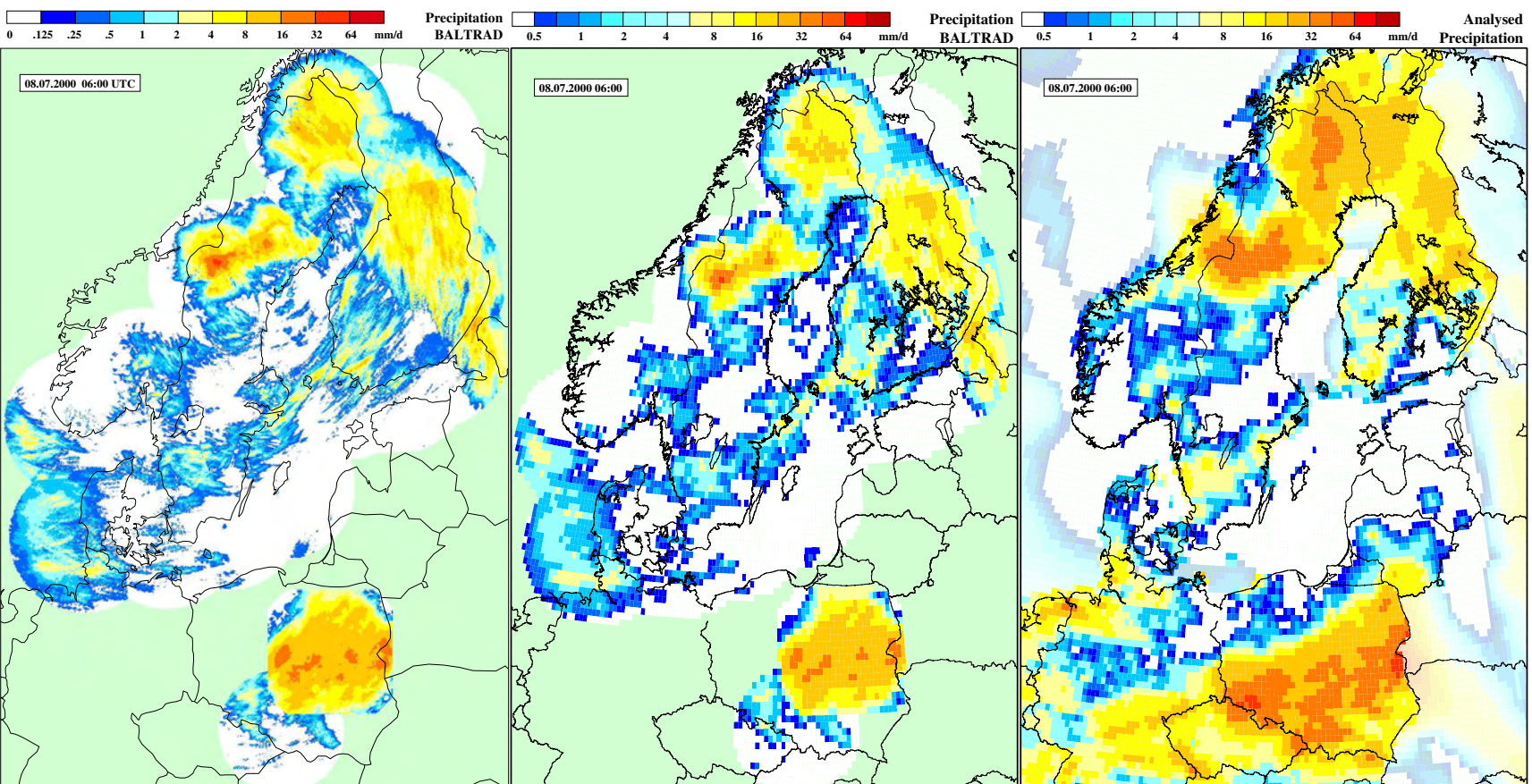


Abb. 4.3: 24h-stündiger Niederschlag in der original BALTRAD Auflösung (links), 0.2° Gitter (Mitte) und Ausschnitt aus der Bodenanalyse basierend auf den Ombrometermessungen in Abb. 3.3 (rechts) für den 8. Juli 2000, 06 UTC.

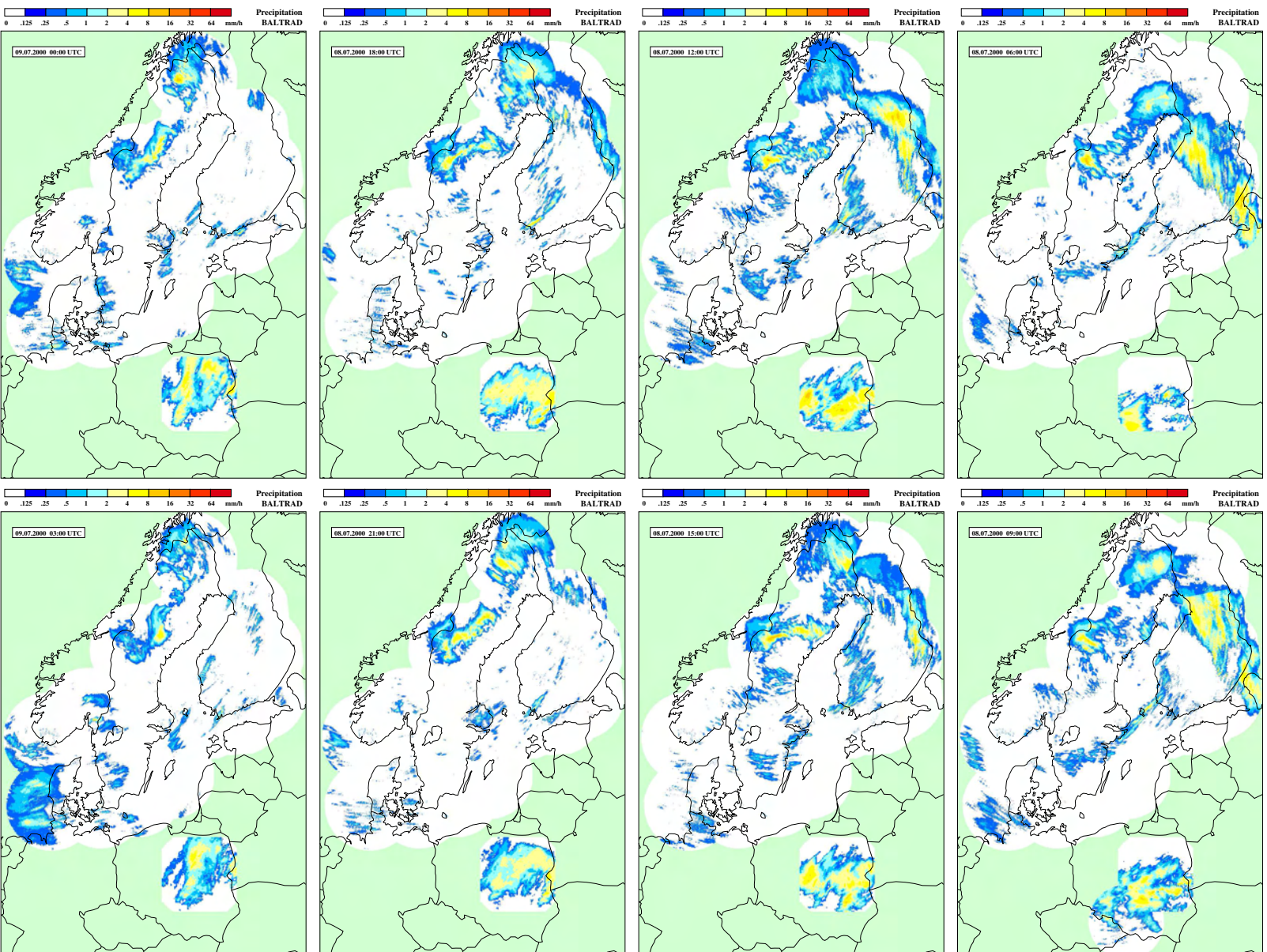


Abb. 4.4: 3h-stündiger BALTRAD Niederschlag für den 8.-9.Juli 2000, 06 - 03 UTC.

daten in dieser Hinsicht auch eine Erfahrungswissenschaft. Doch gibt es für das Interpretieren von Radarbildern bislang keine universellen - für alle Radars oder alle Wetterlagen - gültigen Regeln.

Zur Verbesserung und Herausfilterung dieser Fehler muss man nun versuchen zumindest Teile der menschlichen Beobachtungs- und Kombinationsgabe durch objektive Methoden zu reproduzieren und damit die Wetterradar-Bilder auf diese Art von Fehlern zu bereinigen. Diese Methode wird hier nun als multitemporale objektiv vergleichende Bildverarbeitung bezeichnet (nach Leitner, 1999). Multitemporal daher, da die Radarbilder nicht nur für einen bestimmten Termin betrachtet werden, sondern auch eine ganze Reihe von zeitlich aufeinander folgenden Radarbildern. Dies unterstützt die Fehlererkennung ebenso wie es einem menschlichen Betrachter dabei hilft. Objektiv vergleichend deshalb, da die einzelnen Pixelwerte miteinander sowohl zeitlich als auch räumlich verglichen werden, wie noch später näher beschrieben wird. Bildverarbeitung daher, da nicht auf der Signalverarbeitungsebene gearbeitet wird, sondern mit den bereits fertigen Radarbildern bzw. Composites der beiden Radarnetzwerke.

Kurz noch zu der Klassifizierung der Werte, die ein fehlerbehaftetes Pixel annehmen kann. Folgende Werte können in den Dateien, teilweise nur vorübergehend, enthalten sein:

Pixel-Wert	Bedeutung
999	vom Netzwerk nicht abgedecktes Gebiet
998	fehlende Radarstationen
997	gefilterter Fehler, nicht ersetzbar
996	gefilterter Fehler, ev. noch ersetzbar

4.2.1 Qualitative Aspekte

Die beiden verwendeten Radarnetzwerke CERAD und BALTRAD weisen teilweise sehr ähnliche Fehler auf. Aber einige Fehler sind Radarnetzwerk spezifisch und lassen sich durch die unterschiedlichen Methoden bei der Erstellung der Composites und verschiedene Radarstandorte und damit verbundenen lokalen Eigenheiten erklären. Im Folgenden sind diese Fehler aufgelistet und näher beschrieben.

Fehlende Daten bzw. Radarstationen

Bei der Analyse der Daten fällt zuerst auf, dass immer wieder einzelne Termine oder Daten von einzelnen Radarstandorten fehlen. In beiden Radarnetzwerken kommt es vor, dass nicht alle 15 bzw. 30 Minuten ein Composite zur Verfügung steht. Manchmal fehlen einzelne Termine, zeitweise mehrere Stunden oder Tage. Vor allem vom CERAD fehlen rund 14 % der Termine.

Neben den nicht vorhandenen Composite, kann es auch sein, dass einzelne Radarstandorte zu einem bestimmten Termin fehlen. Ohne bestimmbare Regelmäßigkeit sind Daten einzelner

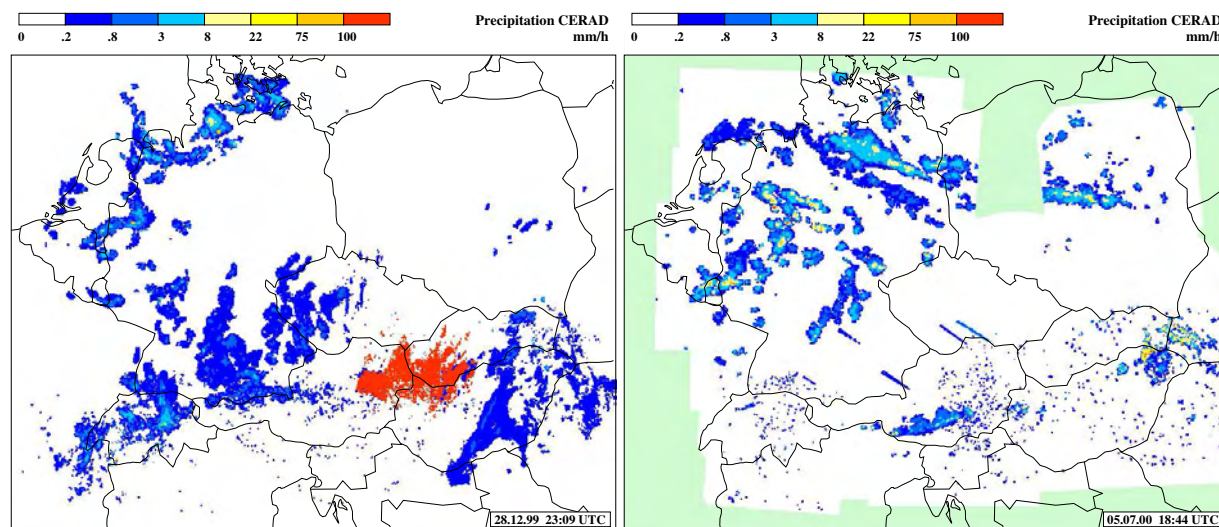


Abb. 4.5: CERAD Bild für den 28. Dez. 1999 23:09 UTC (links) und 5. Juli 2000 18:44 UTC (rechts).

Radargeräte, beziehungsweise auch von ganzen nationalen Radarnetzwerken, nicht vorhanden. So fehlt meist das von den Schweizer Radars abgedeckte Gebiet von Frankreich, das von den polnischen Radarstandorten abgedeckte Gebiet und die Radarstandorte Rovaniemi und Kiruna, die nördlichsten Radarstandorte. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass einzelne Standorte innerhalb der ELDAS-Periode in Betrieb genommen wurden oder abgestellt wurden (siehe dazu Tab. 3.1 und 3.2). Diese Fehler lassen sich nicht wirklich beheben. Lediglich in den überlappenden Bereich vom BALTRAD und CERAD kann es zu Ergänzungen kommen. Ansonsten werden fehlende Termine durch 999-Felder ersetzt. Die Pixel fehlender Radarstationen werden mit 998 markiert um eine spätere Unterscheidung zwischen den Fehlwerten zu gewährleisten.

Ein weiteres Problem in diesem Zusammenhang ist die fehlende Unterscheidung zwischen *nicht gemessen* und *kein Niederschlag*. Von Oktober 1999 bis Februar 2000 sind in den CERAD-Daten teilweise keine Fehlwerte enthalten, wie auch in Abb. 4.5 dargestellt. D.h. wenn 0 mm/h Niederschlag gemeldet wird, ist es unklar, ob tatsächlich keine Niederschlag gefallen ist oder ob eine Radarstation ausgefallen ist. Vor allem bei häufig ausfallenden Stationen stellt dies ein Problem dar.

Auch ein Problem stellt die zeitweise fehlerbehaftete Kodierung beim CERAD da. Hierbei würden Werte falschen Niederschlagsklassen zugeordnet, sodass z.B. eine blaue oder rote Fläche auftritt, wie auch in Abb. 4.5 und 4.15 abgebildet.

Ground Clutter

In beiden Radarnetzwerken fallen deutlich vereinzelte Pixel mit teilweise sehr hohen Intensitäten in ansonsten niederschlagsfreien Gebieten auf. Es wird versucht, diese sogenannten Ground Clut-

ter mittels Clutter-Maps zu reduzieren. Da diese Korrektur aber stark von den atmosphärischen Bedingungen abhängig ist, kann es keine hundert prozentige Filterung geben. Daher tauchen ohne zeitliche oder räumliche Konstanz solche Pixel in den Radarbildern auf, stellen aber keine Niederschlagsechos dar. In Abb. 4.5 sind Ground Clutter sowohl über der Schweiz als auch über der Slowakei und Ungarn zu erkennen.

Sonneneinstrahlung

Sowohl in den CERAD- als auch in den BALTRAD-Daten findet man gelegentlich Artefakte, die durch die Sonneneinstrahlung hervorgerufen werden. Wodurch diese, wie in Abb. 4.5 über Tschechien und Deutschland erkennbar, entstehen wurde in Kap. 2.3.3 näher erläutert. Eigentlich werden diese Artefakte operationell bei der Erstellung des Composite mittels eines Mustererkennungsalgorithmus herausgefiltert, allerdings werden nicht immer alle erkannt und verbleiben daher in den Daten.

Ringe

In CERAD-Bildern sind häufig Ringe unterschiedlicher Breite um eine oder mehrere Stationen zu erkennen. Diese sind meist von einer geringen Niederschlagsintensität. Dass dieses Phänomen sowohl räumlich, d.h. immer andere Radarstationen sind betroffen, als auch in Größe und Intensität stark variiert, macht es schwierig es mittels Fehlermaske (siehe Kap. 4.3.4) herauszufiltern. Lediglich charakteristisch ist, dass diese Ringe nicht zeitlich konstant sind, d.h. dieser Fehler tritt immer nur in einem Bild einer Bilderabfolge auf. In Abb. 4.6 ist als Beispiel so ein Ring abgebildet.

Im BALTRAD tritt dieses Phänomen auch auf, hierbei handelt es sich meist um ein oder mehrere dünne Ringe um eine Station, wie auch in Abb. 4.7 erkennbar ist. Diese haben meist eine sehr geringe Intensität und sind sehr dünn, sodass sie meist bei der Transformation auf das ELDAS-Gitter herausfallen.

Diese Fehler sind meist auf Fehler am Radargerät oder auf den Compositing-Algorithmus zurückzuführen.

Streifelder

Im CERAD tritt häufig ein strahlenförmiges Streufeld rund um eine Radarstation ohne erkennbares Muster auf. Die einzelnen Pixel dieses Feldes nehmen unterschiedliche Intensitäten an. Diese Streufelder, wie auch in Abb. 4.6, werden vermutlich durch atmosphärische Bedingungen oder Fehler im Radar hervorgerufen.

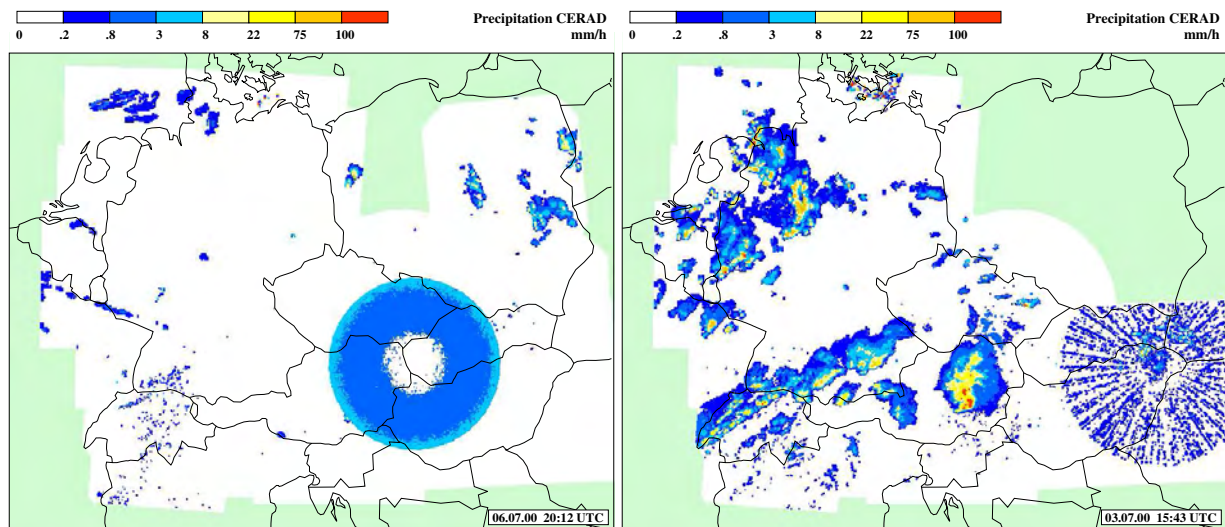


Abb. 4.6: CERAD Bild für den 6. Juli 2000 20:12 UTC (links) und den 3. Juli 2000 15:43 UTC (rechts).

Fehler aufgrund des Compositing-Algorithmus

Durch den BALTRAD Compositing-Algorithmus, der in Kap. 3.1.2 näher erklärt wurde, wirken die Radarbilder wie Mosaik. Man sieht deutlich die teils scharfen Übergänge zwischen den Flächen der einzelnen Radarstandorte. Diese mosaikartige Zusammensetzung führt natürlich auch zu Fehlern, da zeitweise die Intensität eines wandernden Niederschlagsfeld in dem einem Radargebiet stärker gemessen wird als im benachbarten. Dies summiert sich natürlich auf und daher sind die Grenzen vor allem in den Summenbildern, wie in Abb. 4.3, deutlich zu erkennen.

Im CERAD tritt dies nicht auf, da dort für die Composites ein Maximum-Display verwendet wird.

Fehler im Nahbereich der Radarstandorte

Reflexionen im Nahbereich von Radarstandorten sind nicht auf Niederschlag zurückzuführen. Macht man dies trotzdem, dann summieren sie sich bei der Akkumulation und in einem niederschlagsfreien Gebiet wird Niederschlag vermerkt. Daher muss ein Schwellwert definiert werden, wie noch in Kap. 4.3.2 näher beschrieben.

Beim CERAD ist dieses Problem nicht direkt vorhanden bzw. nicht verifizierbar, da die Daten in Niederschlagsklassen archiviert werden und nicht die tatsächlichen Niederschlagswerte.

Abschattung

Im BALTRAD sind zuweilen intensitätsschwache, kegelförmige Strahlen, die in verschiedene Richtungen von einer Radarstation weg laufen, erkennbar. Dieser Fehler lässt sich durch eine

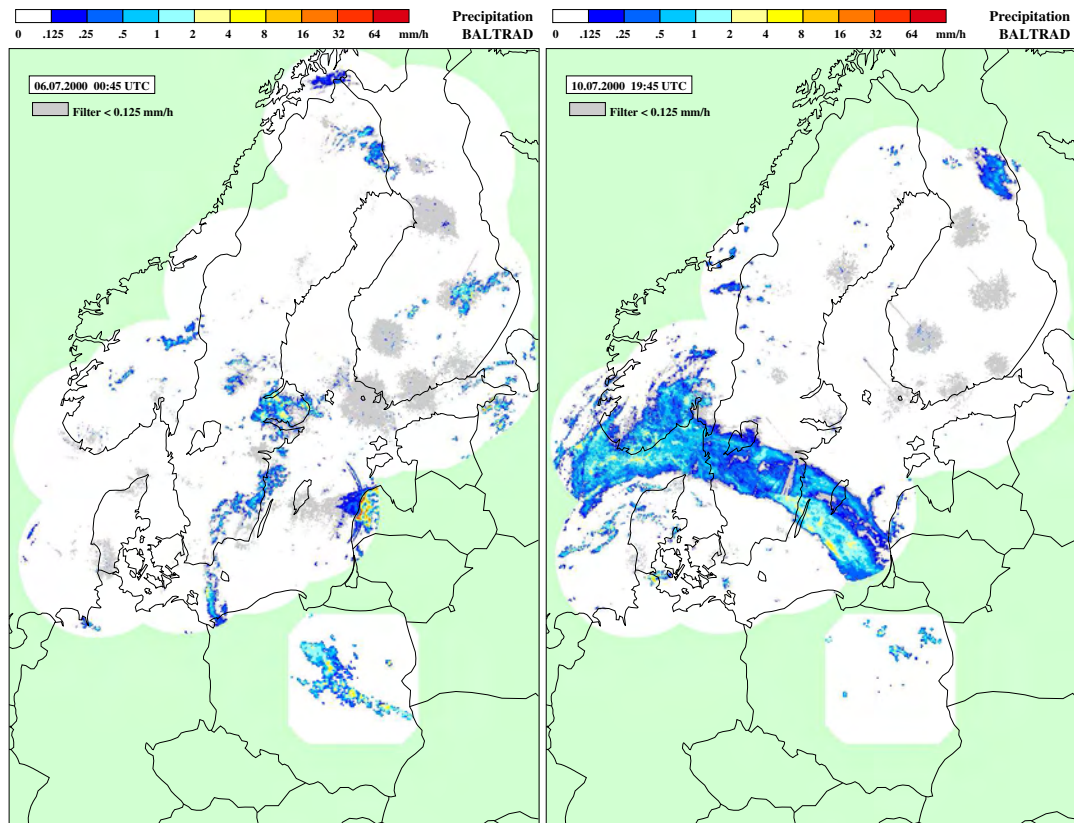


Abb. 4.7: BALTRAD Bild für den 6. Juli 2000 00:45 UTC (links) und 10. Juli 2000 19:45 UTC (rechts).

totale oder auch teilweise Abschattung des Radarstrahls durch die Orographie oder wandernde Objekte erklären. In Abb. 4.7 ist dieses Phänomen dargestellt. Man sieht deutlich ein Niederschlagsband, von dem ein Teil abgeschattet wird.

Im CERAD tritt diese Phänomen wiederum nicht so stark auf, da mit einem Maximum-Display gearbeitet wird. Jedoch ist in den akkumulierten Feldern zu erkennen, dass sich manche Stationen, wie z.B. Monte Lena, im Gebirge befinden und es daher zu einer Abschwächung bzw. Abschattung kommt.

Abschwächung

Im BALTRAD macht sich vor allem ein Phänomen, das in Kap. 2.2.2 näher erklärt wurde, bemerkbar: die Abschwächung mit der Entfernung bzw. durch ausgedehnte Niederschlagsgebiete. In Abb. 4.3 ist diese Entfernungsabhängigkeit deutlich erkennbar. Vor allem bei Radargeräten, die noch mit X-Band arbeiten, ist dieser Effekt deutlich zu erkennen (Strümpel, 2001). Das Problem lässt sich schwer bzw. nicht auf der Bildverarbeitungsebene korrigieren, es wird aber versucht es mittels der nachfolgenden Kalibrierung mit Bodenmessungen zu beheben.

Ausgehend von der nördlichsten BALTRAD-Station Kiruna, wurde der Verlauf des Nieder-

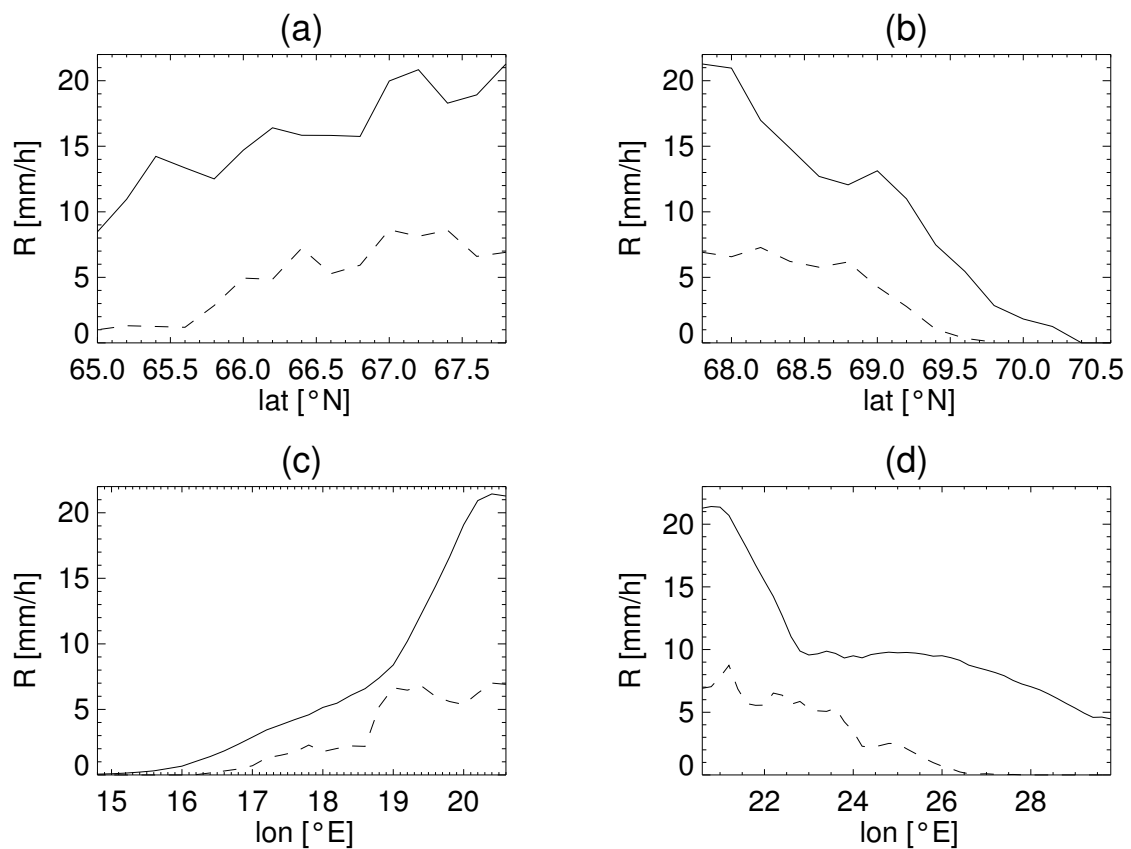


Abb. 4.8: Vergleich des 24-stündigen Niederschlags aus Analyse (durchgezogene Linie) und Radarmessungen (gestrichelte Linie) ausgehend vom Standort Kiruna ($67,80^{\circ}$ N/ $20,60^{\circ}$ E) Richtung (a) Süden, (b) Norden, (c) Westen und (d) Osten am 8. Juli 2000. Das Niederschlagsmaximum liegt hier zufällig über dem Radarstandort.

schlags der Bodenanalyse mit dem der Radarmessungen verglichen. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.8 dargestellt. Die Radarstation Kiruna eignete sich für diese Untersuchung, da sie nur im Süden und Osten einen Übergang zu anderen Radargeräten hat, hingegen im Norden und Westen die Radarreichweite von 240 km eine natürliche Grenze darstellt. Ausgehend von der Station, die sich $20,61^{\circ}$ E und $67,71^{\circ}$ N befindet, wurde entlang der Breite bzw. Länge nach Norden und Süden bzw. Osten und Westen der Verlauf des Niederschlags geplottet.

In allen vier Fällen fällt die deutlich höhere Niederschlagsmenge der Analyse auf. Zum einen liegt dies vermutlich daran, dass hier bodennaher Niederschlag mit Niederschlag in 500 hPa verglichen wird, zum anderen auch an der Radarmessung selbst. Der Verlauf der beiden scheint ähnlich zu sein. Beide Kurven enthalten im Verlauf Richtung Süden ein partielles Maximum. Generell nimmt die Niederschlagsmenge ab, je weiter man vom Radargerät entfernt ist. Dennoch streben die Radarwerte deutlich schneller gegen Null als die Werte der Analyse.

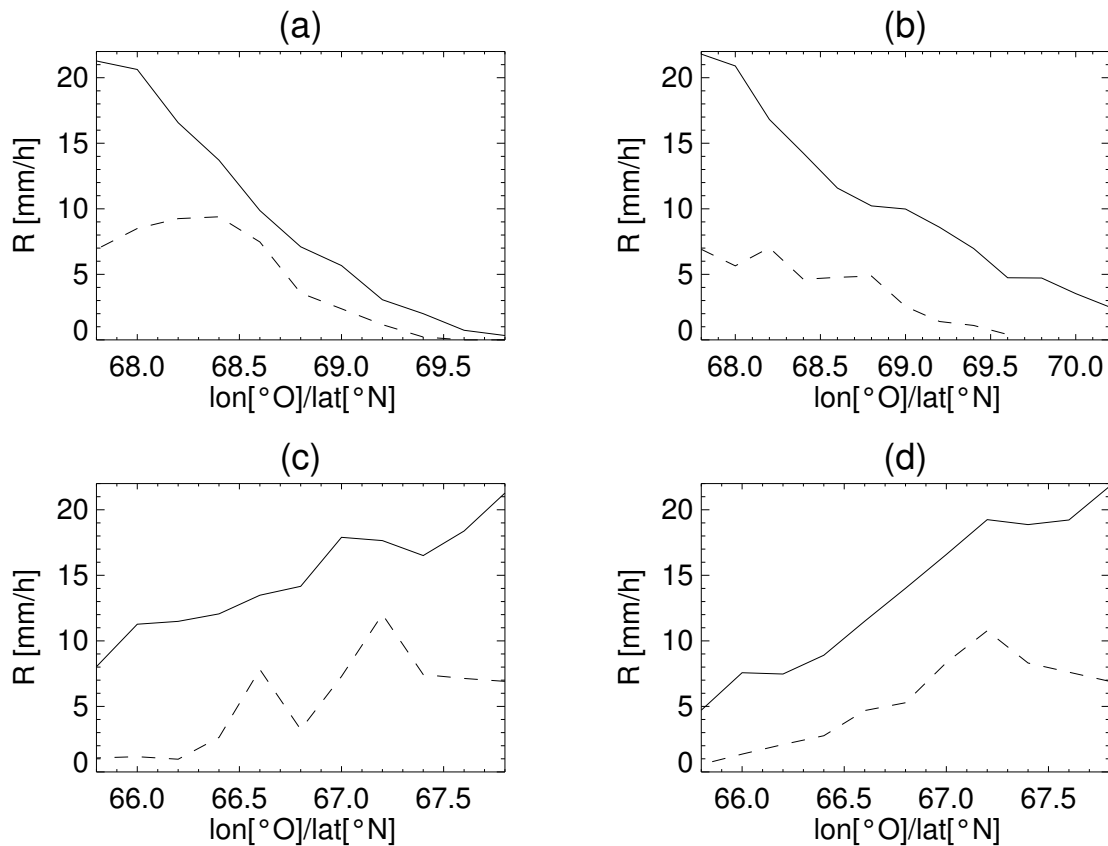


Abb. 4.9: Vergleich des 24-stündigen Niederschlags aus Analyse (durchgezogene Linie) und Radarmessungen (gestrichelte Linie) ausgehend vom Standort Kiruna ($67,80^\circ$ N/ $20,60^\circ$ E) Richtung (a) Nordwest, (b) Nordost, (c) Südwest und (d) Südost am 8. Juli 2000.

Es muss jedoch beachtet werden, dass das Radar nur eine bestimmte Reichweite hat. Die Station Kiruna hat eine maximale Reichweite von 240 km, das entspricht ungefähr 12 ELDAS-Gitterpunkte. Betrachtet man den Verlauf Richtung Norden so erkennt man, dass der Radarwert schon rund 40 km vor Reichweitenende keine Werte mehr liefert. Im Westen ist der Radarstrahl auch auf 240 km begrenzt, es liegen aber Werte noch nach $18,20^\circ$ E vor. Im Osten kommt es bei ca. $23,0^\circ$ E zu einem Übergang in den Radarbereich von Rovaniemi. Hier ist das Ergebnis interessant, den erwartungsgemäß sollte der Radarverlauf ähnlich dem Niederschlagsverlauf weiter laufen, jedoch streben die Radarwerte gegen Null.

Ebenso wurde, wie in Abb. 4.9 dargestellt, der Verlauf in Richtung Nordwest, Nordost, Südwest und Südost geplottet. Ähnlich wie in bei den Haupthimmelsrichtungen verläuft die Radarmessung unterhalb der Analyse, wenn gleich der Verlauf recht proportional ist. In der Graphik Richtung Nordosten erkennt man, dass das Radarniederschlagsmaximum nicht am Standort gemessen wurde, sondern erst einige Kilometer entfernt. In Richtung Südost besteht die einzige

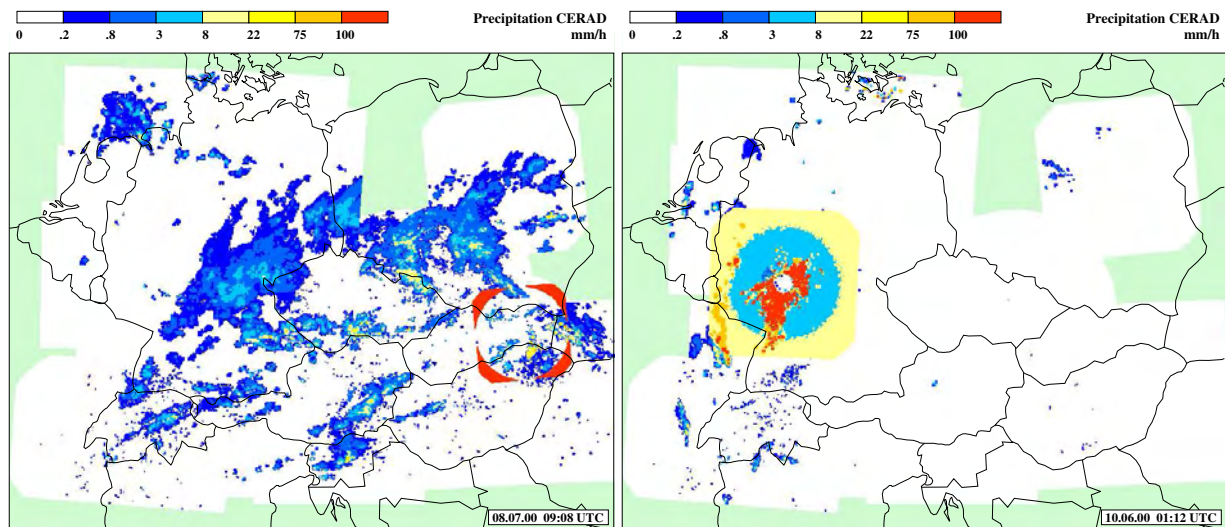


Abb. 4.10: CERAD Bild für den 8. Juli 2000 09:08 UTC (links) und 10. Juni 2000 01:12 UTC (rechts).

künstliche Grenze, sonst stellt die Radarreichweite eine natürliche Grenze dar. Jedoch scheint der Übergang von einem Radarbereich zum nächsten in diesem Fall harmonischer zu verlaufen.

Sea Clutter

Betrachtet man ein oder mehrere Radarbilder des CERAD so fällt einem das Gebiet der deutschen Ostseeküste auf. Hier wird nahezu konstant Niederschlag gemeldet, teils mit hohen Niederschlagsintensitäten. Erklären lässt sich dies durch sogenannte Sea-Clutter, siehe Kap. 2.3.2. Diese Clutter, wie in Abb. 4.6 erkennbar, variieren stark in Zeit, Raum und Intensität, wodurch es schwierig wird sie herauszufiltern.

Dieses Gebiet wird auch im BALTRAD abgedeckt, jedoch vergleicht man ebide, so ist ersichtlich, dass dort keine Niederschlagsechos enthalten sind. Die Unterdrückung der Festechos im BALTRAD scheint besser gelöst zu sein.

Da bei der Zusammensetzung von CERAD und BALTRAD mit der Methode des Maximum-Intensity-Prout gearbeitet wird, muss versucht werden diese Clutter ebenfalls zu reduzieren und im besten Fall zu eliminieren.

Quadratur

Dieser hier als Quadratur bezeichnete Fehler hat eine Fläche eines Quadrats von dem eine Kreisfläche abgezogen wurde. Dieser Fehler tritt wiederholt mit einer Intensität von 100 mm/h über dem vom CERAD abgedeckten Gebiet der Slowakei, Südpolen und Nordungarn auf. In Abb. 4.10 ist dieser Fehler dargestellt. Häufig ist er auch in einer halbierten Form oder größer zu finden. Man könnte annehmen, dass dieser Fehler bewusst im Radarbild gelassen wird, da es dem

Betrachter leicht fällt diesen Fehler auszublenken und die möglicherweise fehlenden Werte für ein gesamtes Niederschlagsfeld zu ersetzen.

Fehlerfelder

Manches Mal erkennt man durch bloßes Betrachten, dass sich um ein Fehlerfeld handelt, wie unter anderem in Abb. 4.5, Abb. 4.10 und Abb. 4.15 dargestellt ist. Diese Felder treten meist nur ein bis zwei Mal in einem Datensatz auf, verursachen aber sehr hohe Fehlwerte.

Wie zum Beispiel das Feld rund um die Radarstationen Kojsovoska hola im Osten der Slowakei und Napkor in Norden von Ungarn, wie in Abb. 4.10 dargestellt. Hierbei steht man vor dem Problem, dass dieses Muster weder räumlich noch zeitlich eine bestimmte Regelmäßigkeit aufweist. Auch die Intensität variiert stark zwischen 8 und 100 mm/h. Dieser Fehler summiert sich bei der Akkumulation natürlich auf.

4.3 Methoden der Fehlerfilterung

Wie im vorhergehenden Kapitel schon kurz erwähnt, werden hier objektive Methoden angewendet, um Fehler aus den Radardaten zu filtern. Sie beruhen auf dem objektiven Vergleichen der einzelnen Pixel untereinander, sowohl räumlich als auch im zeitlich.

Die Radardaten der ELDAS-Periode sind die gleichen, die dem operationellen Dienst, alle 15 bzw. 30 Minuten zu Verfügung stehen. Diese Daten wurden korrigiert, indem sie unter anderem mit den vorangegangenen Bildern verglichen wurden. Eine Nachkorrektur der Bilder mit den nachfolgenden Bildern lohnt sich, aufgrund von Zeitaufwand und Kosten, nicht und wird auch nicht wirklich benötigt. In dieser Arbeit wird aber innerhalb einer Periode gearbeitet, d.h. die nachfolgenden Bilder sind schon vorhanden.

Im Folgenden werden nun die Methoden, mit denen die Bilder sowohl räumlich als auch zeitlich untersucht werden, erläutert. Hierbei wird versucht Störechos herauszufiltern und Echos, die tatsächlich mit Niederschlag verbunden sind, bei der Filterung möglichst unverändert zu lassen.

4.3.1 Die Defaultsmasken

In den zu bearbeitenden Daten wurden Fehlwerte, z.B. einer fehlenden Radarstation, und Pixel außerhalb der Reichweite des Netzwerks mit dem gleichen Wert abgespeichert. Um nun diese Pixel von gemeldeten Fehlwerten zu unterscheiden, wurde für die beiden Radarnetzwerke sogenannte Defaultsmasken erstellt. Werte außerhalb der Reichweite werden mit 999 und tatsächliche Fehlwerte mit 998 gekennzeichnet.

Mittels dieser, wie in Abb. 3.1 und 3.2 dargestellt, werden auch die fehlenden Fehlwerte im CERAD - so weit es möglich ist - ersetzt.

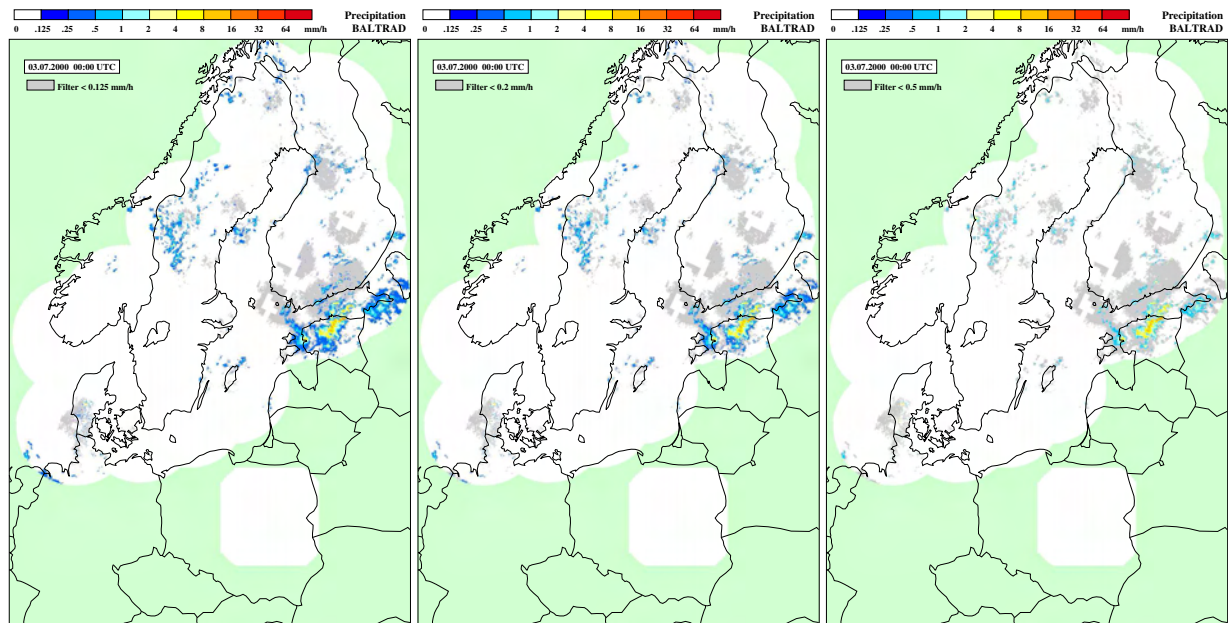


Abb. 4.11: BALTRAD Bild für den 3. Juli 2000 00:00 UTC. Werte kleiner 0.125 (links), 0.2 (Mitte) und 0.5 mm/h (rechts) sind grau dargestellt.

4.3.2 Die Schwellwertdefinition beim BALTRAD

Wie schon im vorhergehenden Kapitel angedeutet wurde, wird beim BALTRAD ein Schwellwert definiert, um Niederschlagswerte nahe Null herauszufiltern. Würden diese kleinen Werte nicht Null gesetzt werden, würden sie sich aufsummieren und das Ergebnis der Akkumulation verfälschen.

Es wurden drei verschiedene Schwellwerte getestet: 0.125 mm/h, 0.2 mm/h und 0.5 mm/h, wie auch in Abb. 4.11 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit höherem Schwellwert mehr Pixel am Rand eines Niederschlagsgebiets weg fallen. Im Weiteren werden nun Werte kleiner als 0.2 mm/h auf Null gesetzt, da dies am geeignetsten erscheint. Ein 0.125 mm/h-Filter wäre zu gering, da sich unter der Annahmen, dass konstant 0,125 mm/h an einem Pixel gemessen wird, sich dies über den Tag gerechnet auf rund 3 mm/h aufsummiert.

4.3.3 Der Medianfilter

Bei diesem Filter werden die einzelnen Pixelwerte mit den umgebenden Pixel verglichen. Um einen Pixel mit, hier wahlweise 3x3, 5x5 und 7x7, Nachbarn vergleichen zu können, wird ein statistisches Maß verwendet: der Median.

Zur rechnerischen Bestimmung des Medians muss das betreffende Datenkollektiv in eine

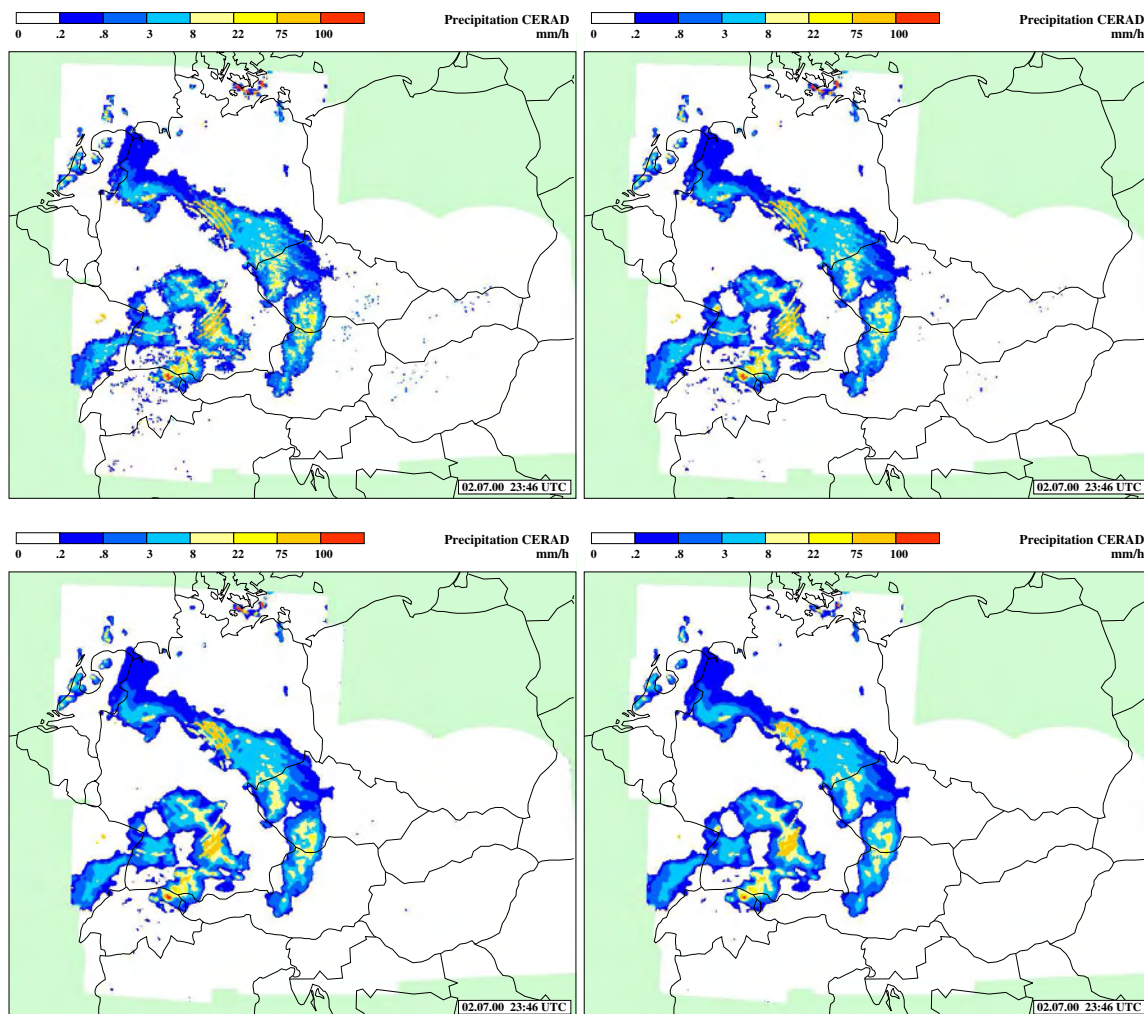


Abb. 4.12: CERAD Radarbild für den 2. Juli 2000 23:46 UTC. Demonstriert die verschiedenen Medianfilter: original (oben, links), 3x3- (oben, rechts), 5x5- (unten, links) und 7x7-Median (unten, rechts).

Reihenfolge

$$a_i \rightarrow a_j \quad \text{mit} \quad a_1 < a_2 < \dots < a_n \quad (4.1)$$

gebracht werden. Der Median ist bei einem ungeraden Stichumfang n exakt

$$Med = a_{(n+1)/2} \quad (4.2)$$

Ist jedoch n ungerade so muss der Median durch

$$Med \approx (a_{(n/2-1)} + a_{(n/2+1)})/2 \quad (4.3)$$

abgeschätzt werden. Anschaulich bedeutet dies einfach das Abzählen der in einer Rangfolge geordneten Werte bis zur Mitte dieser Folge und bei geradem n eine arithmetische Mittelung, der beiden in der Mitte stehenden Werte (Schönwiese, 2000).

Der Median ist als Lagemaß hier besser geeignet als das arithmetische Mittel, da er weniger sensitiv gegen Extremwerte ist und den häufigsten Wert einer Stichprobe angibt.

In Abb. 4.12 ist der Median für 3x3, 5x5 und 7x7 Nachbarn dargestellt. Man erkennt, dass mit höherer Zahl der Nachbarn der Glättungseffekt zunimmt, wobei die großräumige Struktur des Niederschlagsgebiets erhalten bleibt. Die vereinzelt Ground Clutter fallen auch deutlich heraus.

Im Weiteren wird ein 5x5 Median verwendet. Im CERAD werden Pixel auf den Medianwert gesetzt, wenn der Wert größer als 22 mm/h und der Median ist. Im Gebiet der Ostsee werden alle Pixelwerte durch den Medianwert zu Reduzierung der Sea Clutter ersetzt.

Auf diesem Filter basiert auch die sogenannte Median-Substitution. In der Literatur werden Radardaten häufig mit dieser einfachen, aber auch schnellen Methode korrigiert (Jann, 2001, Lucchinetti, 2001). Vorteil dieser Methode ist, dass die Struktur der Niederschlagsgebiete erhalten bleibt, jedoch Ground Clutter herausfallen und die Wellenstruktur geglättet wird. Ein großer Nachteil ist aber, dass einige, überwiegend flächendeckende, Artefakte erhalten bleiben. Dieses Verfahren lässt sich mit der sogenannten Clutter Microsuppression vergleichen. Hierbei kommt es zu einer Unterdrückung der Clutter, da die räumliche Auflösung höher ist als jene, die schließlich beim Benutzer dargestellt wird (Leitner, 1999). Ähnliches geschieht auch bei der Transformation auf das ELDAS-Gitter, das eine Gitterdistanz von 0.2° , d.h. 20 km, hat.

4.3.4 Die Pixelfilter

Der in der Literatur auch als Speckle-Filter bezeichnete **räumliche Pixelfilter** sucht einzelne, räumlich isolierte Pixelwerte. Dazu werden die umliegenden Pixelwerte des zu überprüfenden Pixel untersucht. Hat eine gewisse Anzahl der Pixel den Wert Null und wird ein Schwellwert überschritten, so wird der untersuchte Pixelwert auf 997 gesetzt, d.h. er wird vollständig isoliert.

Je niedriger dieser Schwellwert definiert ist, desto mehr Pixel fallen heraus, jedoch ist es ebenso wahrscheinlicher, dass im Randbereich eines Niederschlagsgebiets Niederschlagspixel herausfiltert werden. Um nun zu vermeiden, dass keine tatsächlichen Niederschlagspixel aus dem Bild entfernt werden, wird dieser Filter im Weiteren nur mit einem Schwellwert von 8 Pixel angewendet.

Mit dieser Methode fallen hauptsächlich Ground Clutter heraus, da diese häufig örtlich isoliert auftreten. Es ist aber anzumerken, dass bei der Transformation auf das ELDAS-Gitter solche einzelne räumlich isolierten Pixel kaum ins Gewicht fallen.

Mit dem **zeitliche Pixelfilter** werden vorwiegend Artefakte wie Sonneneinstrahlung, Ringe und ähnliches aus den Daten eliminiert. Hierbei wird ein Pixelwert, der zum Zeitpunkt $t = 0$ ungleich Null ist, auf 997 gesetzt, wenn dieser Pixel bei $t-2$, $t-1$, $t+1$ und $t+2$ gleich Null ist. Die gefilterten Werte werden später nicht durch Interpolation versucht zu ersetzen, da es sich hier meist um flächendeckende Fehler handelt. Dieser Methode berücksichtigt die scheinbar einzige

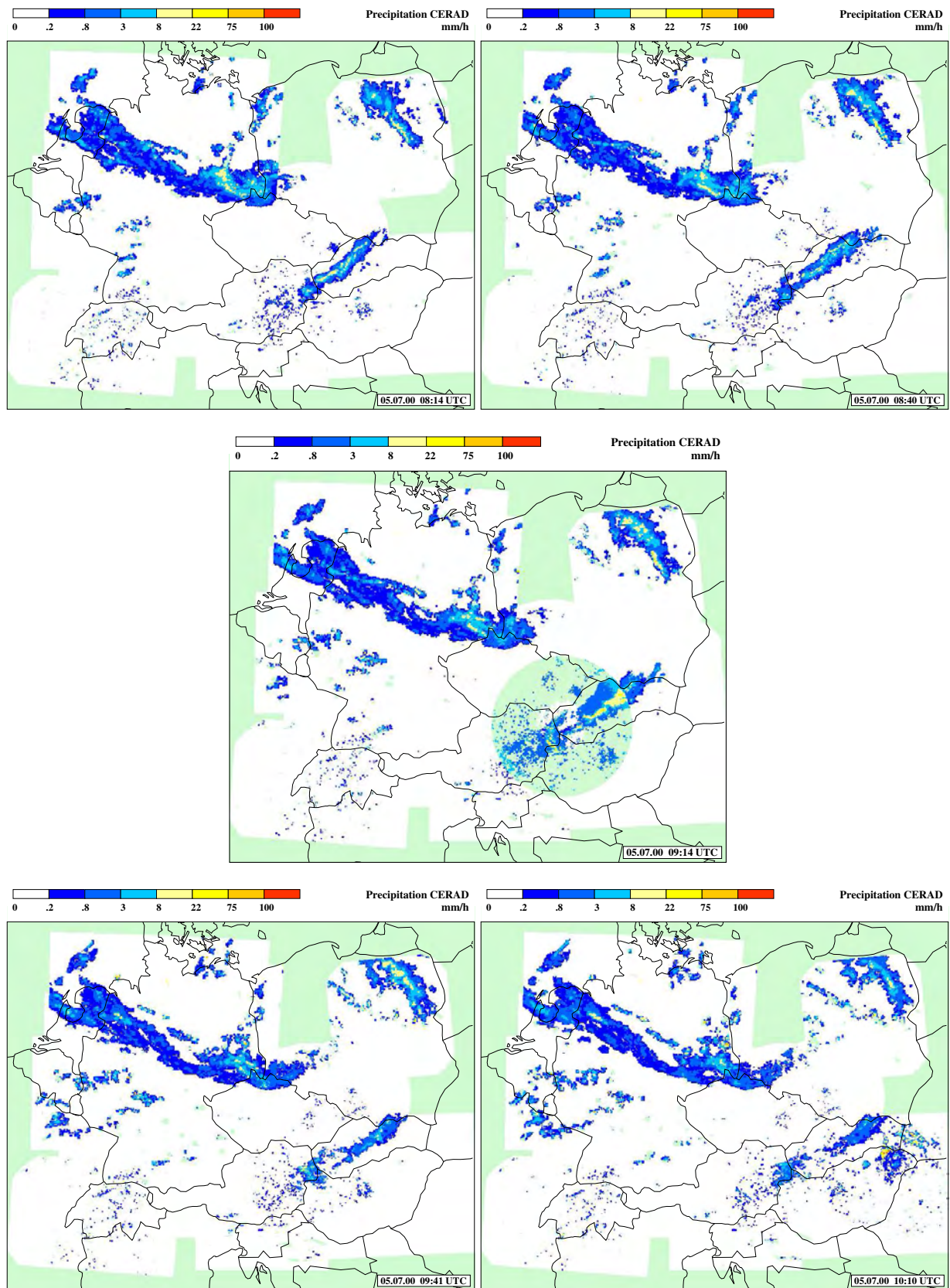


Abb. 4.13: CERAD Bilder für den 5. Juli 2000, 08:14 - 10:10 UTC. Demonstriert wird der zeitliche Pixelfilter.

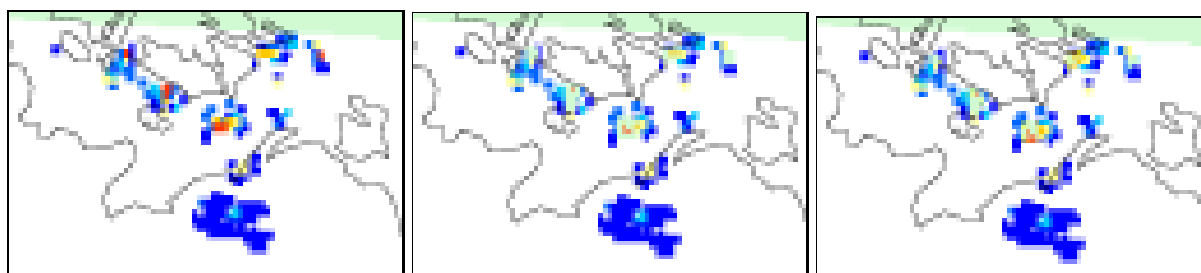


Abb. 4.14: CERAD-Ostseeausschnitt für 3. Juli 2000, 12:16 UTC. Original (links), Gradientenfilter (Mitte), Interpolation (rechts).

Charakteristik, die diese Artefakte aufweisen. Solche Artefakte tauchen meist nur einmal in einer ganzen Abfolge von Bildern auf.

Diese Methode wird im CERAD, da dort die meisten Artefakte auftauchen, mehr oder weniger erfolgreich angewendet. Überwiegend bei niederschlagsschwachen Terminen erkennt man die positive Wirkung dieses Filters. In Abb. 4.13 ist ein Zeitverlauf, bei dem ein Ring herausgefiltert wurde, dargestellt. Ein Nachteil dieser Methode entsteht bei niederschlagsreichen Terminen. Hier kann es vorkommen, dass einzelne Pixel dieser Objekte noch vorhanden sind, und zwar dort wo vorher bzw. nachher Niederschlagspixel waren.

Ein weiteres Problem stellt die Zuggeschwindigkeit von Niederschlagszellen und die zeitliche Auflösung dar. So kann es sein, dass eine Niederschlagszelle gefiltert wird, obwohl sie tatsächlich vorhanden ist, aber beim nächsten Zeitschritt einfach schon weiter gezogen ist. Das ist vor allem bei CERAD aufgrund der zeitlichen Auflösung von mindestens 30 Minuten der Fall.

4.3.5 Der Gradientenfilter

Auf ähnlichen Überlegungen wie beim Pixel- und Medianfilter basiert der Gradientenfilter. Wieder werden die einzelnen Pixelwerte mit den umgebenden Nachbarn verglichen. Diesmal wird allerdings die absolute Differenz zwischen den Pixel berechnet. Die absolute Differenz ist für den Gitterpunkt k, l definiert als

$$AD(k, l) = \sum_{u=k-1}^{k+1} \sum_{v=l-1}^{l+1} |RR(u, v) - RR(k, l)| \quad (4.4)$$

Ist die absolute Differenz größer als ein Schwellwert so wird dieser Pixel auf 996 gesetzt und später durch Interpolation zu ersetzen versucht.

Dieser Filter beruht auf der Annahme, dass ein Pixel keine deutlich höhere Intensität haben kann als der beim BALTRAD 2 km und beim CERAD 4 km entfernte Nachbarpixel. In Tab. 4.1 sind die absoluten Differenzen zwischen den einzelnen Niederschlagswerten beim CERAD dargestellt.

mm/h	Niederschlagsintensitäten							
	0	0,2	0,8	3	8	22	75	100
0	0	0,2	0,8	3	8	22	75	100
0,2	0,2	0	0,6	2,8	7,8	21,8	74,8	99,8
0,8	0,8	0,6	0	2,2	7,2	21,2	74,2	99,2
3	3	2,8	2,2	0	5	19	72	97
8	8	7,8	7,2	5	0	14	67	92
22	22	21,8	21,2	19	14	0	53	78
75	75	74,8	74,2	72	67	53	0	25
100	100	99,8	99,2	97	92	78	25	0

Tab. 4.1: Absolute Differenz zwischen den Niederschlagsintensitäten im CERAD.

Entsprechend dieser Tabelle werden nun Pixel mit einer absoluten Differenz von min. 92 mm/h oder zwischen 74,2 und 75 mm/h mit 996 gekennzeichnet. Die auf 996 gesetzten Werte werden dann mittels Interpolation ersetzt, wie in Kap. 4.4 erläutert. In Abb. 4.14 ist deutlich zu erkennen, dass praktisch alle hohen *falschen* Pixel-Werte eliminiert wurden.

Ein Problem ist sicherlich, dass es beim CERAD nur 8 Niederschlagswerte angegeben werden. So kann es natürlich hierbei auch zu Fehlern kommen, denn die hier angenommene absolute Differenz zwischen 22 und 75 mm/h beträgt 53 mm/h, aber sie könnte ebenso 1 mm/h sein.

4.3.6 Häufung von hohen Werten

Eine Häufung von mehreren hohen Niederschlagsintensitäten an einem Pixel kann meist als unrealistisch angesehen werden. Gegebenenfalls können Werte über 100 mm/h als falsch interpretiert werden. Es gilt, je kürzer die Niederschlagsdauer, desto höher ist meist die Niederschlagsintensität. Da im CERAD mit dem *Maximum Intensity Product* gearbeitet wird, kommt es häufig vor, dass 100 mm/h gemessen werden. Um diese herauszufiltern, werden Pixel, bei denen mindestens dreimal hintereinander 100 mm/h gemessen werden, auf 997 gesetzt.

4.3.7 Ausblenden

Manche Phänomene lassen sich mit keiner der oben genannten Methoden bzw. leichter mit einer Fehlermaske herausfiltern. Zu diesen zählen die Quadratur und das Fehlerfeld um Kojsovkova hola und Napkor im Radarnetzwerk CERAD.

Da es sich bei der Quadratur um Fehler handelt, der in konstanter Form auftritt, wird dieser mittels Fehlermaske herausgefiltert, d.h. auf 997 gesetzt und somit eliminiert.

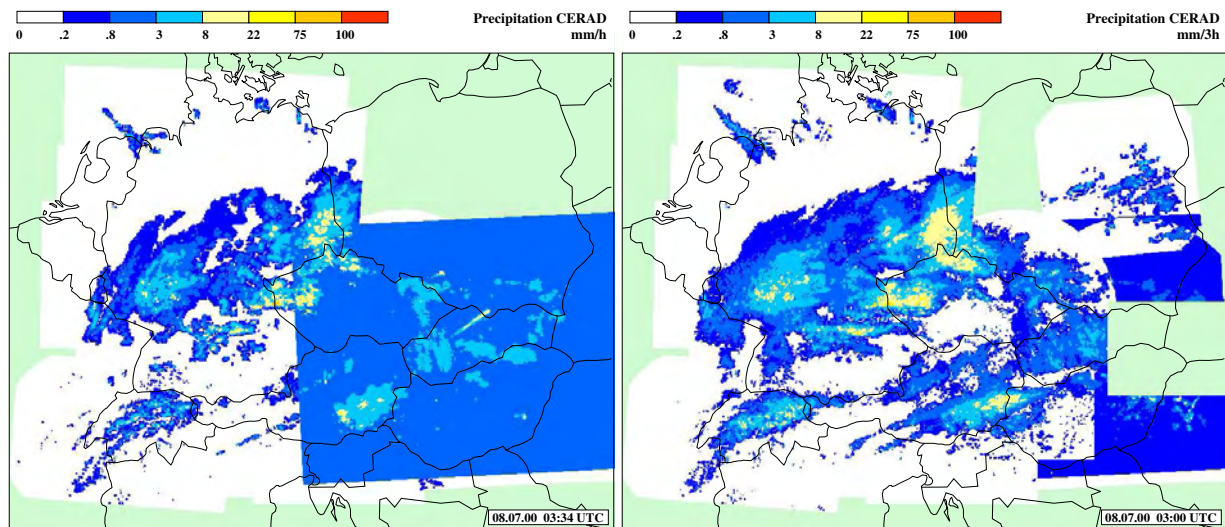


Abb. 4.15: CERAD Bild für den 8. Juli 2000, 03:34 UTC (links) und 3h-stündiges, korrigiertes Niederschlagsbild für den 8. Juli 2000, 03:00 UTC (rechts).

Da die einzelnen Pixelwerte im Fehlerfeld um Kojsookova hola und Napkor nicht nur zeitlich und räumlich stark variieren, sondern auch unterschiedlich hohe Intensitäten annehmen, wird das Gebiet ausgeblendet. Es wurde versucht dieses Gebiet mittels einer der oben genannten Methoden zu korrigieren, doch kam es hierbei zu keinem zufriedenstellendem und akzeptablem Ergebnis.

4.3.8 Subjektives Ausblenden

Eine weitere Methode wäre jedes Radarbild einzeln bzw. im Verlauf zu betrachten und subjektiv zu entscheiden, welche Echos Niederschlag repräsentieren und welche nicht. Diese subjektive Methode wendet praktisch jeder Meteorologe im operationellen Dienst an. Natürlich steigt hierbei die Qualität mit zunehmender Erfahrung des Bearbeiters.

In dieser Arbeit wird die subjektive Methode, wenn gleich in einer sehr abgeschwächten Form, auch verwendet. D.h. die 3-stündig akkumulierten Bilder werden nochmals einer subjektiven Kontrolle unterzogen und das Ergebnis kontrolliert. Fallen noch deutliche Schwachstellen auf, so werden die Daten für diese Bilder gesondert überprüft und versucht die Fehlwerte in den Daten zu identifizieren. Es muss nun entschieden werden, ob dieser Termin belassen oder komplett auf 999 gesetzt wird. Je großflächiger der Fehler und je intensitätsstärker desto eher wird gelöscht.

Anhand eines Beispiel sei dies nun näher erklärt: In dem in Abb. 4.15 dargestellten Radarbild hat ein großer Teil der Echos einen Wert von 0.4 mm/h. Diese *blaue Fläche* überlagert den tatsächlichen Niederschlag, vermutlich aufgrund eines Codierungsproblem. Da sich diese fehlerhaften Echos mit keiner der vorher beschriebenen Methoden eliminieren lassen und da ein

sehr großer Teil betroffen ist, wird dieser Termin auf 999 gesetzt und bei der Berechnung der akkumulierten Niederschlagsfelder nicht berücksichtigt.

Einzelne Radargebiete herauszulöschen ist beim CERAD nicht möglich, da hier mit einem *Maximum Intensity Product* gearbeitet wird. Hingegen wäre dies beim BALTRAD durchaus machbar, dort tritt dieser Fehler allerdings nicht auf.

4.4 Rekonstruktion gefilterter Werte durch Interpolation

Damit die mit den oben genannten Methoden mit 996 gekennzeichneten, fehlerbehafteten Pixel dennoch möglicherweise einen Wert zur Summe liefern, wird versucht diese zu ersetzen. Der fehlende Wert wird mittels einer räumlichen Interpolation ersetzt.

Hierbei wird der Fehlwert durch den Median-Wert der umliegenden Pixel-Werte ersetzt. Dazu wird der 5x5-Median verwendet, da er am besten geeignet erscheint. Ein Suchalgorithmus sucht alle Pixelwerte gleich 996 und versucht diese durch den Median seiner Nachbarn zu ersetzen. Ist dies nicht möglich, so wird dieser Pixel auf 997 gesetzt. Diese Methode wird beim CERAD angewendet. Beim BALTRAD könnte auch auf eine weitere Methode zurückgegriffen werden. Hierbei werden die fehlenden bzw. die gefilterten Werte durch einen zeitlichen Mittelwert der vorangegangenen und folgenden Bilder ersetzt.

4.5 Der CERAD Korrekturalgorithmus

Hier wird der Ablauf der Korrektur der CERAD Daten beschrieben. Die in den vorangegangenen Kapiteln diskutierten Filter wurden in folgender Reihenfolge angewendet:

- Daten einlesen
- Fehlwerte mittels Default-Maske auf 998 setzen, fehlende Fehlwerte ersetzen
- Herausfiltern der Quadratur
- Ausblenden des Fehlerfelds über Kojsovskaja hola und Napkor
- Gradientenfilter
- Interpolation der 996-Werte
- zeitlicher Pixelfilter
- Median-Filter
- Häufung hoher Werte

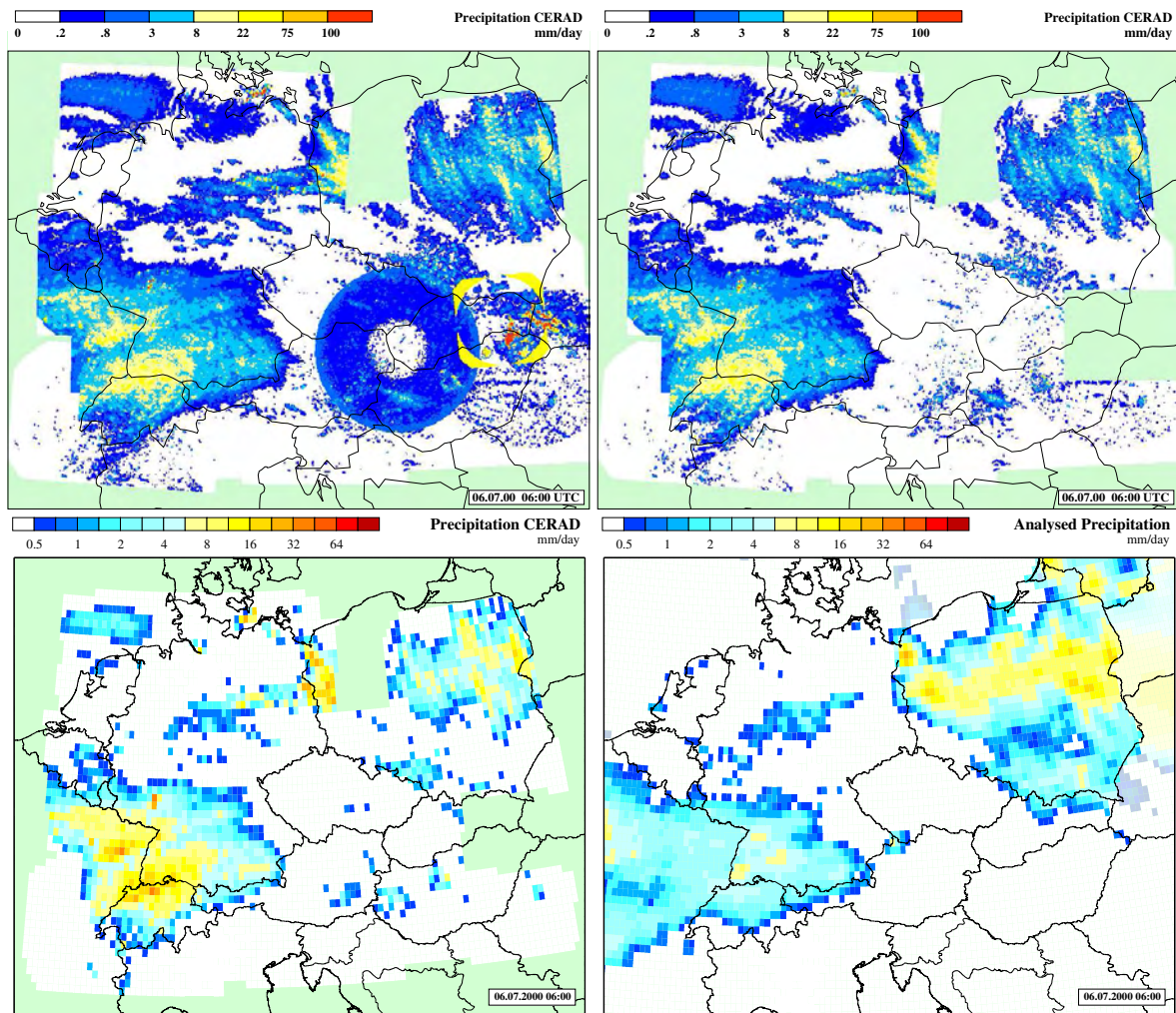


Abb. 4.16: Vergleich des 24-stündigen CERAD Niederschlagsfeldes unkorrigiert, original CERAD Gitter (links, oben), korrigiert, original CERAD Gitter (rechts, oben), am 0.2° ELDAS Gitter interpoliert (links, unten) mit der Bodenanalyse (rechts unten) für den 6. Juli 2000, 06 UTC.

- räumlicher Pixelfilter
- Akkumulation der 3- und 24-stündigen Felder

Die Kombination dieser Filter führt zu einer Eliminierung vieler Artefakte und Fehler, wie als Beispiel in Abb.4.16 dargestellt ist. Man sieht deutlich, dass die Quadratur, der Ring herausgefiltert und die Ground und Sea Clutter reduziert wurden. Beim Vergleich des Niederschlagsfeld am 0.2° ELDAS Gitter mit der Bodenanalyse ist eine gute räumliche Übereinstimmung zu erkennen, jedoch weichen die Niederschlagsmengen teilweise doch beträchtlich voneinander ab. Leider konnten nicht alle Fehler herausgefiltert werden, wie die z.B. die Ground Clutter in Abb. 4.16 über Österreich und Ungarn.

4.6 Der BALTRAD Korrekturalgorithmus

Bei der Betrachtung und Untersuchung der BALTRAD Daten gewinnt man rasch den Eindruck, dass die Daten den Anforderung meiner quantitativen Niederschlagsbestimmung gut erfüllen.

Im BALTRAD sind nicht Artefakte, extrem hohe Werte oder technische Probleme das Hauptproblem, sondern vielmehr Ground Clutter, falsche Pixelwerte hervorgerufen durch die Entfernungsdämpfung, Verrauschung oder Abschattung und durch den Compositing-Algorithmus. Dass sich diese Probleme teilweise nicht beheben lassen, wurde schon oben näher diskutiert.

Anlog zum CERAD wurden nun die beschriebenen Filter auf das BALTRAD angewendet. Bei der Austestung und Adjustierung der diversen Filter stellte sich jedoch heraus, dass der teils hohe Rechenaufwand nicht zu einer eindeutigen Verbesserung der Daten führte. Aufgrund des allgemein guten Zustands der Daten wurden wie folgt bearbeitet:

- Daten einlesen
- Umrechnung von dBZ in mm/h
- Werte kleiner 0.2 mm/h auf Null setzen
- Fehlwerte mittels Default-Maske auf 998 setzen
- Akkumulation der 3- und 24-stündigen Felder

Die einzige Veränderung stellt die Definition eines Schwellwerts dar, wie auch in Abb. 4.17 dargestellt.

4.7 Beurteilung der aufbereiteten Radardaten

Die Implementierung der verschiedenen Methoden zur Reduzierung der Fehler in den Radardaten wurde subjektiv, durch einen visuellen Vergleich der einzelnen Bilder, überprüft. Da der Beobachter meist die Erfahrung mitbringt, Fehlerpixel von tatsächlichen Niederschlagspixel zu unterscheiden, ist dies eine durchaus akzeptable Verifikation. Hierbei wurden die korrigierten Felder mit dem Originalfeld und dem Feld der Bodenanalyse verglichen.

Die abschließende Beurteilung der Qualität der Radardatenbearbeitung wird wieder durch den Vergleich mit den Bodenanalysen erstellt - jetzt aber objektiv. Hierfür werden die zur Verifikation von Wettervorhersagemodellen entwickelten Maßzahlen verwendet, Diese sind der mittlere Fehler (mean error), der mittlere absolute Fehler (mean absolut error), die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (RMS error), der Rang-Korrelationskoeffizient (Rank-order correlation), die Trefferrate (Hit rate, HR), der Kritische Erfolgsindex (Critical success index, CSI),

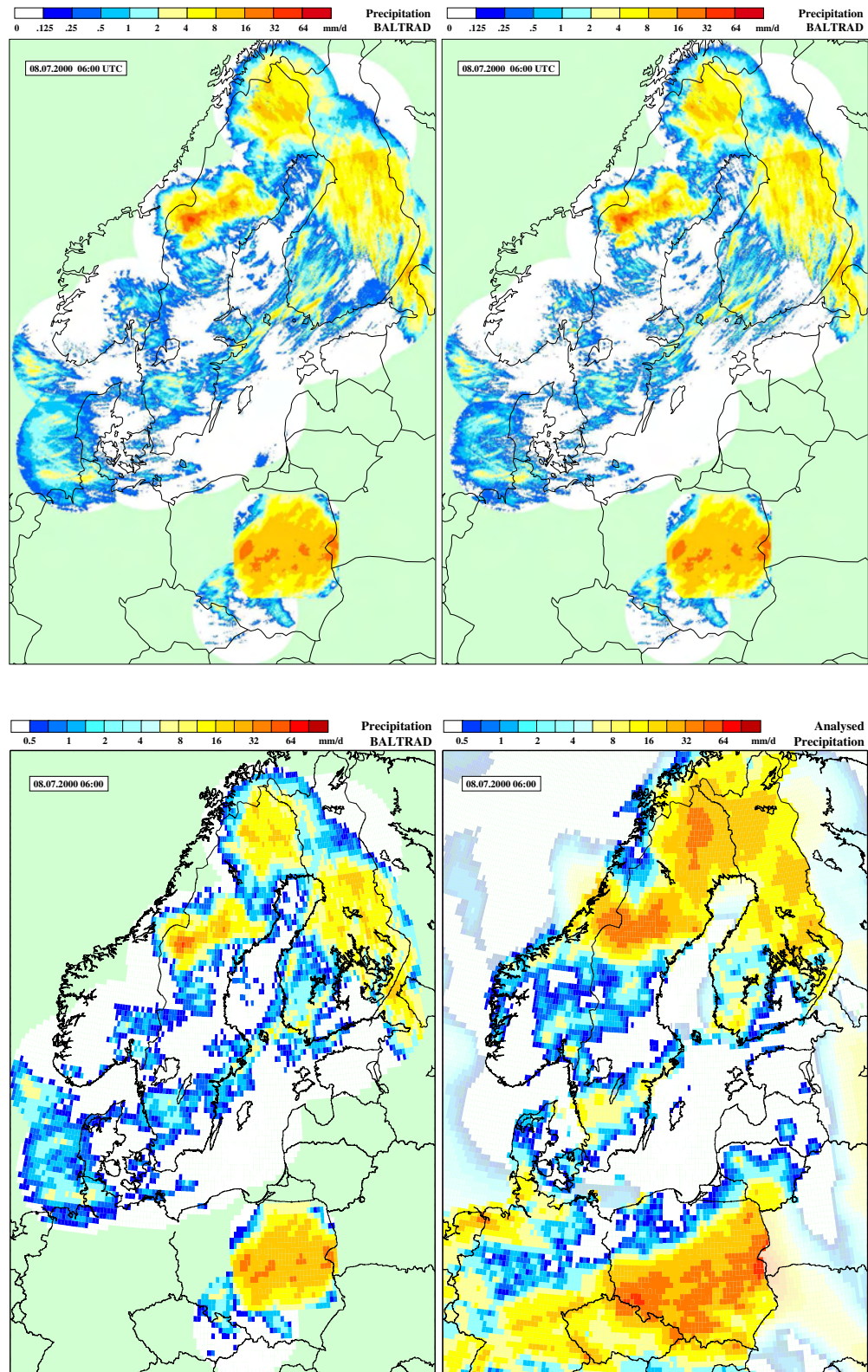


Abb. 4.17: Vergleich des 24-stündigen BALTRAD Niederschlagsfeldes unkorrigiert, original CERAD Gitter (links, oben), korrigiert, original CERAD Gitter (rechts, oben), am 0.2° ELDAS Gitter interpoliert (links, unten) mit der Bodenanalyse (rechts unten) für den 8. Juli 2000 06 UTC.

die Entdeckungswahrscheinlichkeit (Probability of Detection), die Rate Falschen Alarms (False alarm ratio, FAR), dem Bias score (BIAS) und der True Skill Statistics (TSS).

Eine Zusammenstellung der verschiedenen Verifikationsmaße ist in Skomorowski (2002) nachzulesen. In den Fallstudien im folgenden Kapitel sind die Verifikationsmaßzahlen der unbearbeiteten (uncorrected) und bearbeiteten (corrected) Radardaten gegenübergestellt. Damit kann der Erfolg der Radarbearbeitung dieser Arbeit quantifiziert werden.

Kapitel 5

Ergebnisse

5.1 Fallstudie 20. - 25. Mai 2000

Die im vorigen Kapitel beschriebenen Korrekturalgorithmen führen zu einer Reduzierung bzw. Eliminierung vieler in den Daten enthaltenen Artefakte und Fehler. Jedoch verbleiben einige der Probleme in den Daten und lassen sich nicht mit den verwendeten Methoden beheben. Da nicht das gesamte Ergebnis dargestellt werden kann, wird in diesem Kapitel anhand einer Fallstudie die Wirkung der Korrekturalgorithmen näher beschrieben und die Ergebnisse diskutiert. Anhand der Verifikationsmaße lassen sich objektiv die Verbesserungen bestätigen.

5.1.1 CERAD

Eines der Probleme des CERADs stellen die fehlenden Termine bzw. Radarstationen dar. Im Anhang A sind die vorhandenen Termine aufgelistet. Fehlen mehrere Termine in Folge oder ganze Tage, dann lässt sich dieses Problem im Rahmen dieser Arbeit nicht beheben. Fehlen hingegen nur einzelne Termine oder Radarstationen, dann wird das Ergebnis nicht beeinflusst, wie am 22. Mai 2000 (Abb. 5.1) ersichtlich ist.

Ein weiteres Problem stellt die zeitliche Auflösung des CERAD's dar. Derzeit steht ungefähr alle halben Stunden ein Composite zur Verfügung. Dies resultiert unter anderem in einer Wellenstruktur in den akkumulierten Niederschlagsfeldern. Dies ist unter anderem im Niederschlagsbild des 25. Mai 2000 dargestellt. Ein Radarbild stellt eine Momentaufnahme der Situation der Atmosphäre dar. Zwischen zwei Composites ziehen meist die Niederschlagszellen bzw. Bänder mit einer bestimmten Zuggeschwindigkeit weiter. Bei einer geringen zeitlichen Auflösung kommt es vor, dass die Niederschlagszellen daher her nicht genau verfolgt werden können. Durch die Interpolation auf das ELDAS Gitter kann dieser Effekt zumindest reduziert werden.

Beim Korrektur-Algorithmus stützt sich vor allem der Pixelfilter auf zeitlich Entwicklung des Niederschlagsfeld bzw. der Artefakte. Überwiegend großräumigere Artefakte, wie Quadratur,

Ringe und Sonneneinstrahlung, lassen sich mit dem Pixelfilter gut herausfiltern. Dieser Effekt ist vor allem am 24. Mai 2000 (Abb. 5.3) erkennbar. Aber mit dieser Methode werden auch kleinere Niederschlagszellen, die eine größere Zuggeschwindigkeit haben herausgefiltert.

Auch stellt das Gebiet der Ostsee ein Problem dar. Festechos an der Küste konnten, wenn gleich nicht komplett eliminiert, trotzdem stark reduziert werden. Dies ist praktisch an allen Terminen der Fallstudie erkennbar, vor allem aber am 23. Mai 2000. Die einzige Alternative würde das Ausblenden des betroffenen Gebiets darstellen. Hingegen wurde beim Fehlerfeld um Kojsovka hola und Napkor darauf zurückgegriffen, da durch die Filter höchstens eine schwache Verbesserung erzielt werden konnte. Wie in der Fallstudie erkennbar ist, stellt die komplette Ausblendung teilweise einen Vorteil dar, jedoch gehen sämtliche Informationen dieses Gebiets verloren. Aufgrund des *Maximum Intensity Product* ist es auch nicht möglich einzelne, fehlerbehaftete Stationen auszublenden. Es kann nicht exakt bestimmt werden welcher Pixel nun zu welcher Radarstation gehört, da es keine festen Grenzen gibt. Der Compositing-Algorithmus führt auch zu einer Überschätzung der Niederschlagsintensitäten, wie auch am 20. Mai 2000 dargestellt ist.

Fehler, wie die gelbe Fläche über Tschechien, Slowakei und Österreich am 21. Mai 2000, verbleiben größtenteils in den Daten und wurden nach einer abschließenden subjektiven Kontrolle manuell korrigiert. **Ungefähr 1.2 % der vorhandenen Termine wurden manuell nachbearbeitet.**

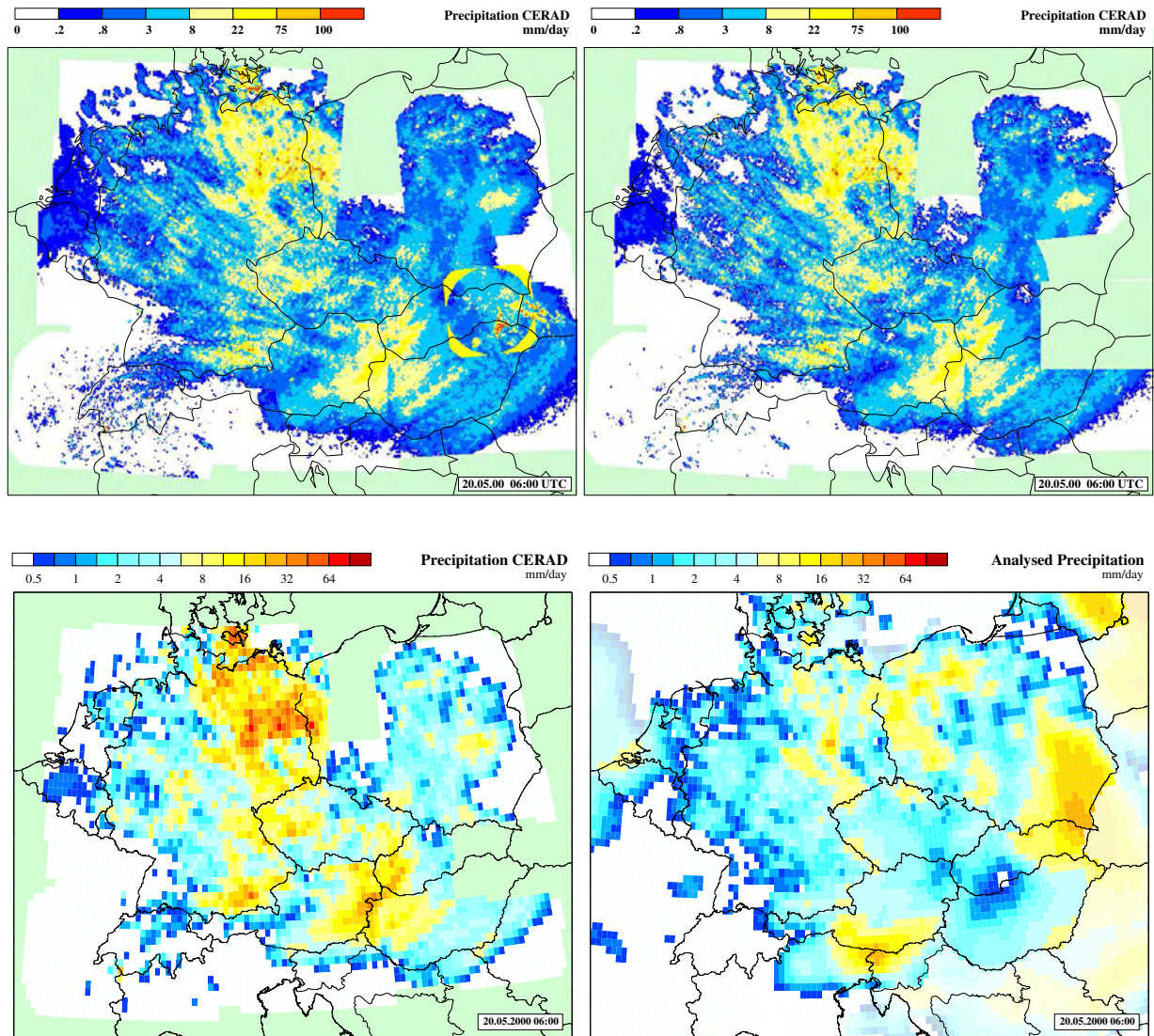
Generell lässt sich sagen, dass es durch diesen Korrektur-Algorithmus deutlich zu einer Verbesserung innerhalb des vorgegeben Bereichs, d.h Fehler möglichst herauszufiltern und dabei tatsächlichen Niederschlag unverändert zu lassen, kam. Die Struktur der Niederschlagsbänder blieb deutlich erhalten. Dadurch, dass vor allem in den Randgebieten Echos gefiltert wurden, erscheinen die Niederschlagsbänder deutlich begrenzter, wie auch am 25. Mai 2000 ersichtlich. Auch Ground Clutter wurden durch den Algorithmus eliminiert. Die noch verbliebenen werden bei der Transformation auf das ELDAS-Gitter weiter abgeschwächt, wie der Vergleich korrigiertes, interpoliertes CERAD Niederschlagsfeld und Analyse des 20. Mai 2000 zeigt.

Unzulänglichkeiten zufolge der Abschwächung durch den Niederschlag bzw. Ausbreitungsdämpfung oder Abschattung, wie am 22. Mai 2000 über Ungarn ersichtlich, konnten mit den verwendeten Methoden nicht behoben werden. Ebenso wäre es interessant gewesen die ZR-Beziehung zu variieren; dies im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls nicht möglich. Unter anderem nicht, da das Composite mit der Methode des *Maximum-Intensity-Products* berechnet wird und jedes nationale Radarnetzwerk eine eigene ZR-Beziehung verwendet.

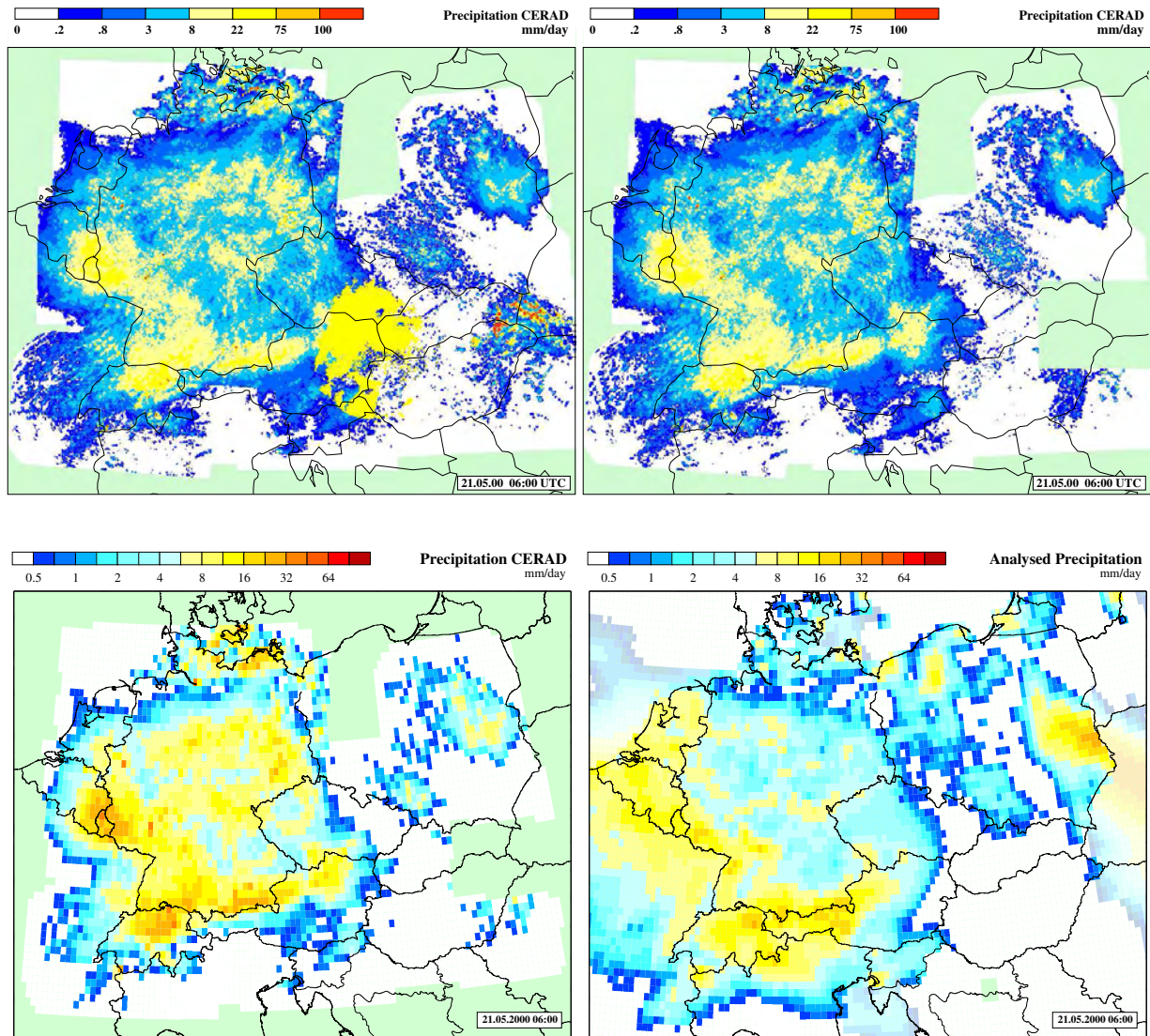
Die Korrektur der CERAD-Niederschlagsfelder der Periode 20. - 25. Mai 2000 führte zu deutlich geringeren mittleren Niederschlagswerten im gesamten Gebiet. Damit verbunden ist ein zumeist um die Hälfte kleinerer mittlerer Fehler. Die Korrelation mit der Bodenanalyse ist ebenfalls 0 - 0.14 besser. Dagegen ist die Wahrscheinlichkeit Niederschlagsgebiete zu entdecken

(POD) geringfügiger schlechter, einhergehend mit einer geringeren Rate falsch deklarerter Niederschläge (FAR). Zusammen ergeben diese beiden gegenläufigen kategorischen Maßzahlen eine Verbesserung der korrigierten CERAD Felder (zu sehen in den um 0 - 0.1 besseren TSS-Werten).

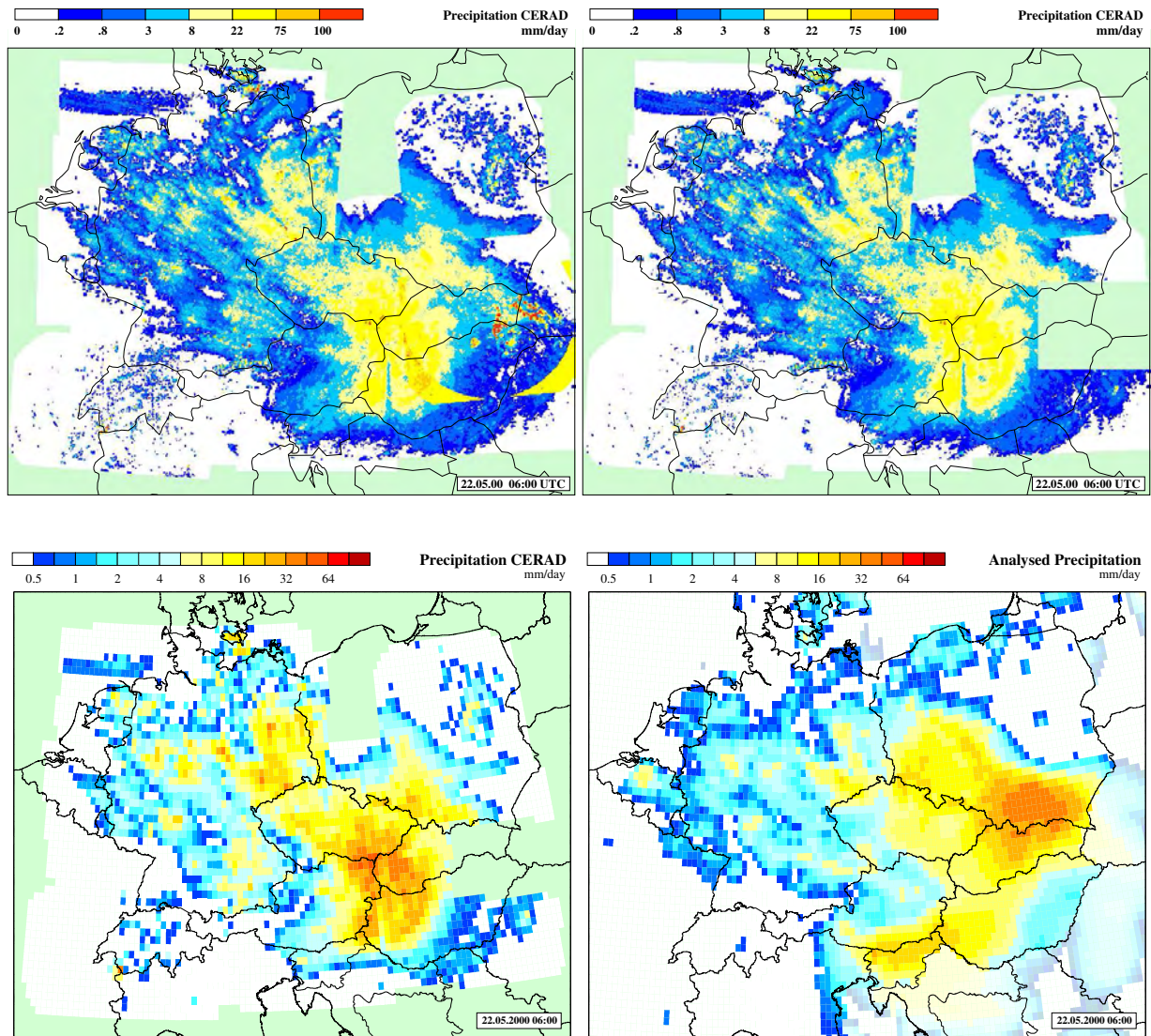
Abb. 5.1 (Seite 66 - 71) zeigt 24-stündige Niederschlagsfelder der Periode 20. - 25. Mai 2000, 06 - 06 UTC. Es werden in der CERAD original Auflösung der unkorrigierte Niederschlag (links oben) und der korrigierte Niederschlag (rechts oben), auf dem 0.2° ELDAS Gitter der korrigierte Niederschlag (links unten) und der Ausschnitt der Bodenanalyse (rechts unten) verglichen. Als objektive Beurteilung sind die Verifikationsmaße, wie in Kap. 4.7 beschrieben, angegeben.



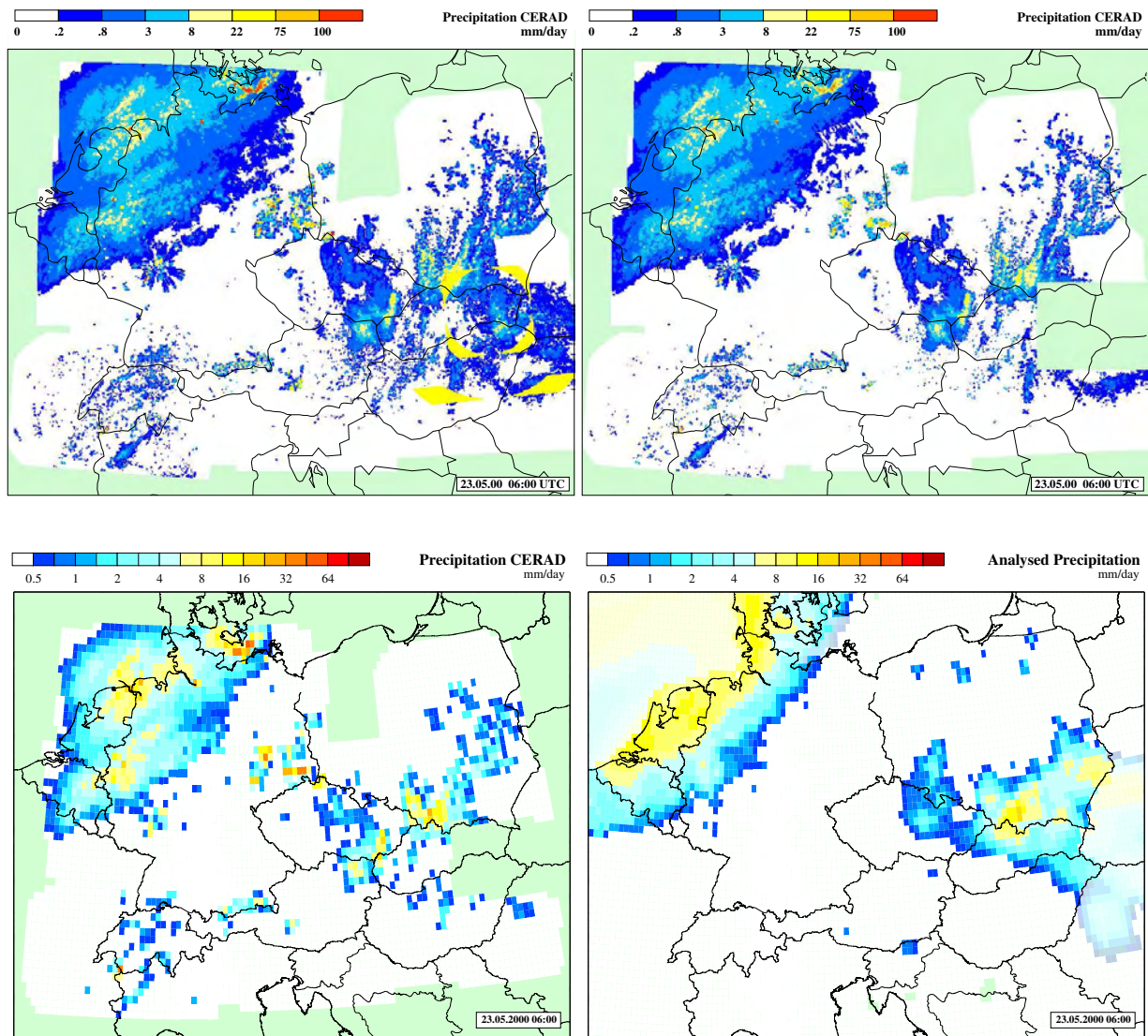
20.05.2000 06 UTC	uncorr.	corr.		uncorr.	corr.
Continous statistics			Categorical statistics		
Analysed	3.46		Hit rate, HR	0.81	0.79
Radar prec.	4.87	4.26	Critical success index, CSI	0.79	0.77
Mean error	1.41	0.80	Prob. of detection, POD	0.82	0.79
Mean absolute error	4.40	4.06	False alarm ration, FAR	0.05	0.04
RMS error	8.24	7.41	Bias score, BIAS	0.86	0.82
Rank-order correlation	0.47	0.47	True skill statistics, TSS	0.53	0.59



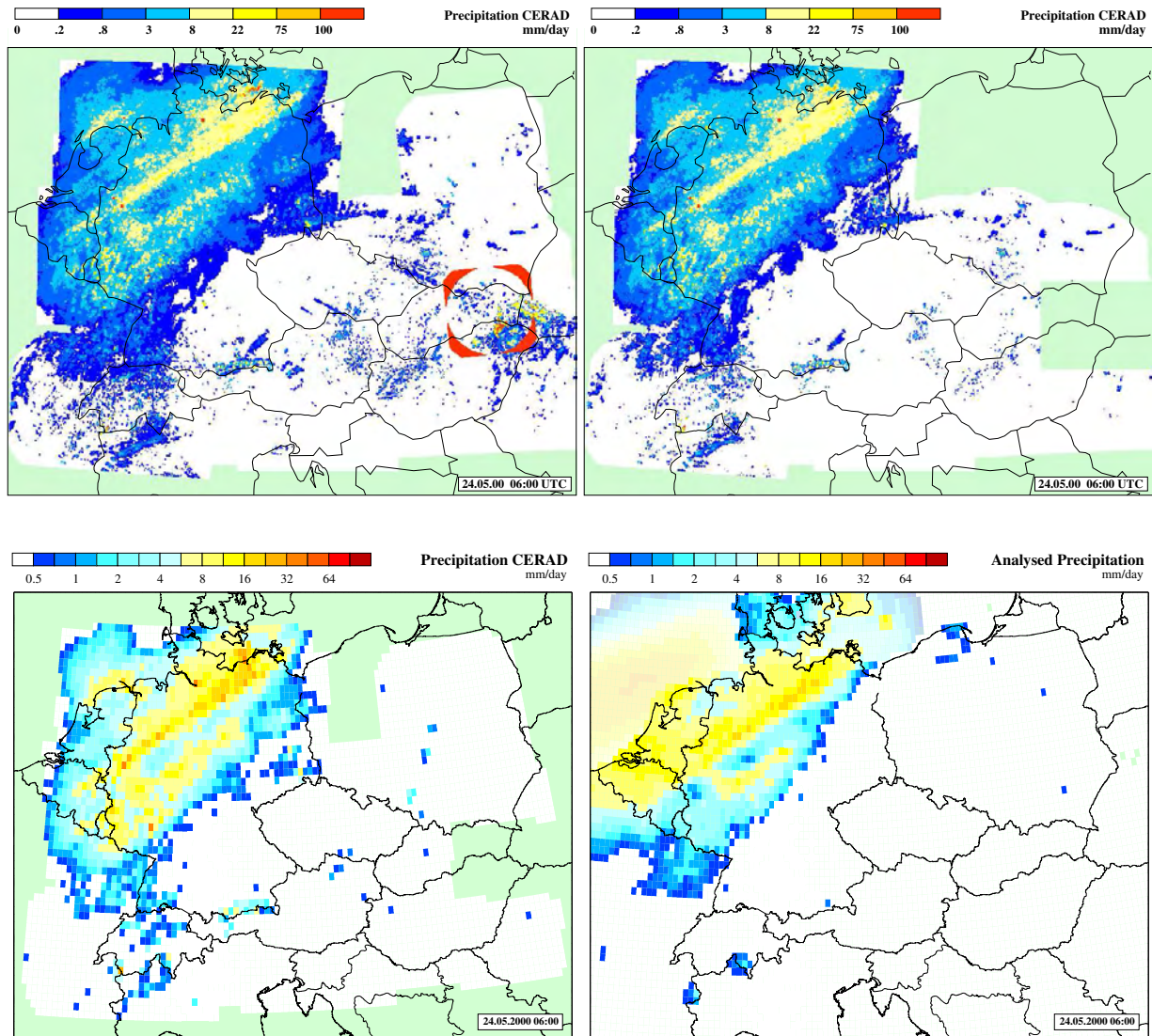
21.05.2000 06 UTC	uncorr.	corr.		uncorr.	corr.
Continous statistics			Categorical statistics		
Analysed	3.79		Hit rate, HR	0.79	0.76
Radar prec.	5.81	3.61	Critical success index, CSI	0.77	0.73
Mean error	2.02	-0.19	Prob. of detection, POD	0.81	0.76
Mean absolute error	5.10	3.05	False alarm ration, FAR	0.07	0.05
RMS error	10.71	4.92	Bias score, BIAS	0.87	0.80
Rank-order correlation	0.48	0.62	True skill statistics, TSS	0.45	0.55



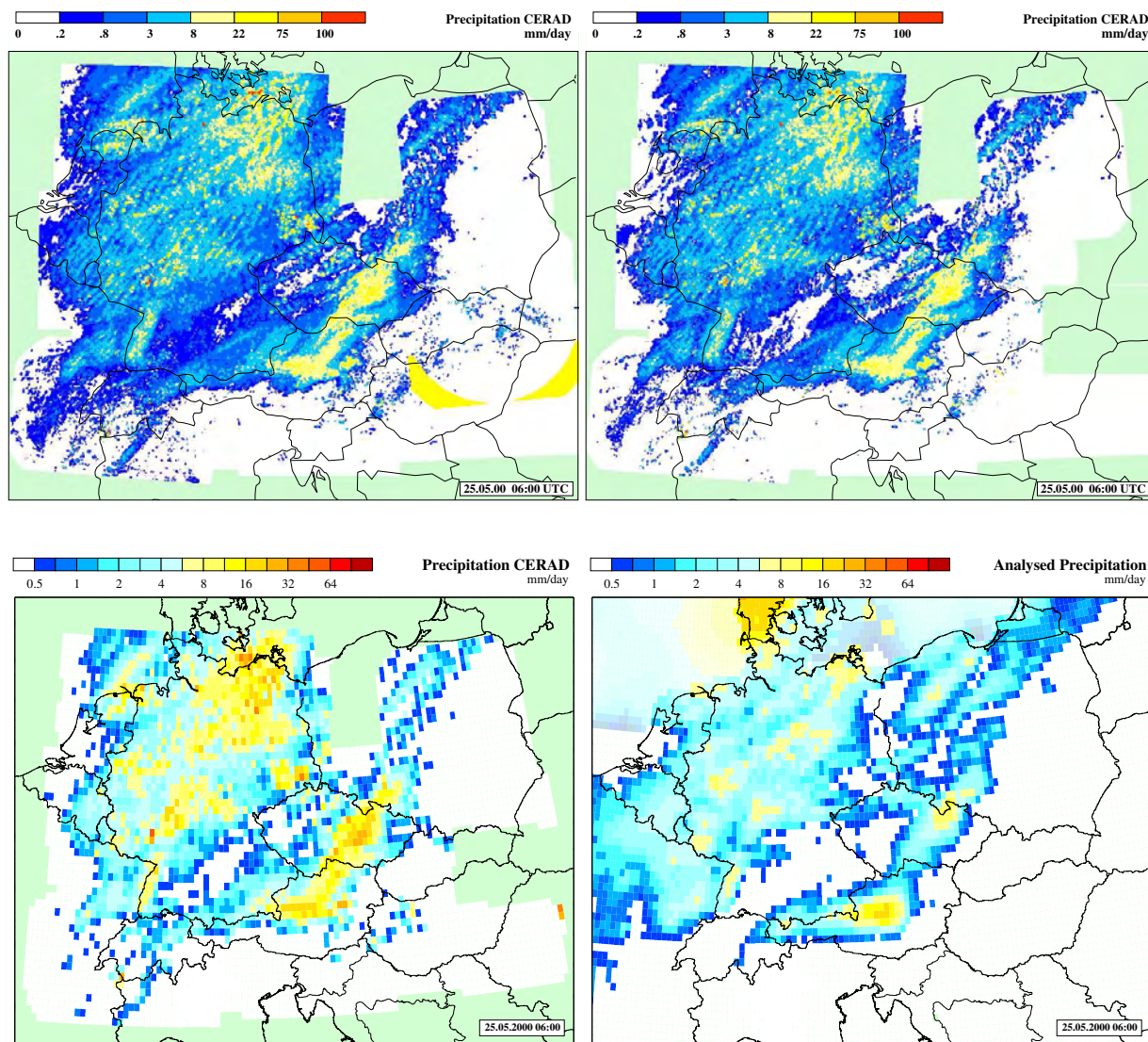
22.05.2000 06 UTC	uncorr.	corr.		uncorr.	corr.
Continuos statistics			Categorical statistics		
Analysed	4.07		Hit rate, HR	0.77	0.76
Radar prec.	4.62	3.75	Critical success index, CSI	0.72	0.70
Mean error	0.55	-0.32	Prob. of detection, POD	0.80	0.76
Mean absolute error	4.27	3.57	False alarm ration, FAR	0.12	0.10
RMS error	8.94	6.96	Bias score, BIAS	0.92	0.85
Rank-order correlation	0.66	0.66	True skill statistics, TSS	0.44	0.49



23.05.2000 06 UTC	uncorr.	corr.		uncorr.	corr.
Continous statistics			Categorical statistics		
Analysed	1.37		Hit rate, HR	0.75	0.78
Radar prec.	1.96	1.10	Critical success index, CSI	0.56	0.58
Mean error	0.59	-0.28	Prob. of detection, POD	0.79	0.74
Mean absolute error	1.95	1.21	False alarm ration, FAR	0.34	0.27
RMS error	6.33	3.10	Bias score, BIAS	1.20	1.02
Rank-order correlation	0.61	0.65	True skill statistics, TSS	0.51	0.55



24.05.2000 06 UTC	uncorr.	corr.		uncorr.	corr.
Continous statistics			Categorical statistics		
Analysed	2.00		Hit rate, HR	0.78	0.83
Radar prec.	2.29	1.66	Critical success index, CSI	0.59	0.65
Mean error	0.29	-0.34	Prob. of detection, POD	0.89	0.86
Mean absolute error	1.96	1.36	False alarm ration, FAR	0.36	0.28
RMS error	7.04	3.49	Bias score, BIAS	1.38	1.19
Rank-order correlation	0.74	0.78	True skill statistics, TSS	0.60	0.67



25.05.2000 06 UTC	uncorr.	corr.		uncorr.	corr.
Continous statistics			Categorical statistics		
Analysed	1.67		Hit rate, HR	0.84	0.84
Radar prec.	3.37	2.50	Critical success index, CSI	0.78	0.78
Mean error	1.69	0.83	Prob. of detection, POD	0.92	0.87
Mean absolute error	2.47	1.76	False alarm ration, FAR	0.16	0.12
RMS error	6.38	3.72	Bias score, BIAS	1.09	0.99
Rank-order correlation	0.72	0.76	True skill statistics, TSS	0.63	0.67

5.1.2 BALTRAD

Auch hier lässt sich das Problem der fehlenden Termine und Radarstationen nicht beheben. Es wurde aber festgestellt, dass deutlich mehr Termine als beim CERAD vorhanden sind. Beim BALTRAD fehlen rund 0.16 % der gesamten Daten. Teilweise können die fehlenden Werte der deutschen und polnischen Radarstationen durch die des CERADs - wenn vorhanden - ersetzt werden, wie auch an allen Tagen der Fallstudie zu ersichtlich ist.

Vor allem am 20. Mai 2000 (Abb. 5.2) ist erkennbar, dass die Struktur der Niederschlagsbänder realistisch ist. In dieser Abbildung ist aber auch ein Vorteil des Radars ersichtlich: Man erhält auch von Gebieten, in diesem Fall der Ostsee, Niederschlagsinformationen, wo es kaum bis keine Ombrometermessungen gibt. Jedoch stellt sich die Frage wie verlässlich diese Information ist.

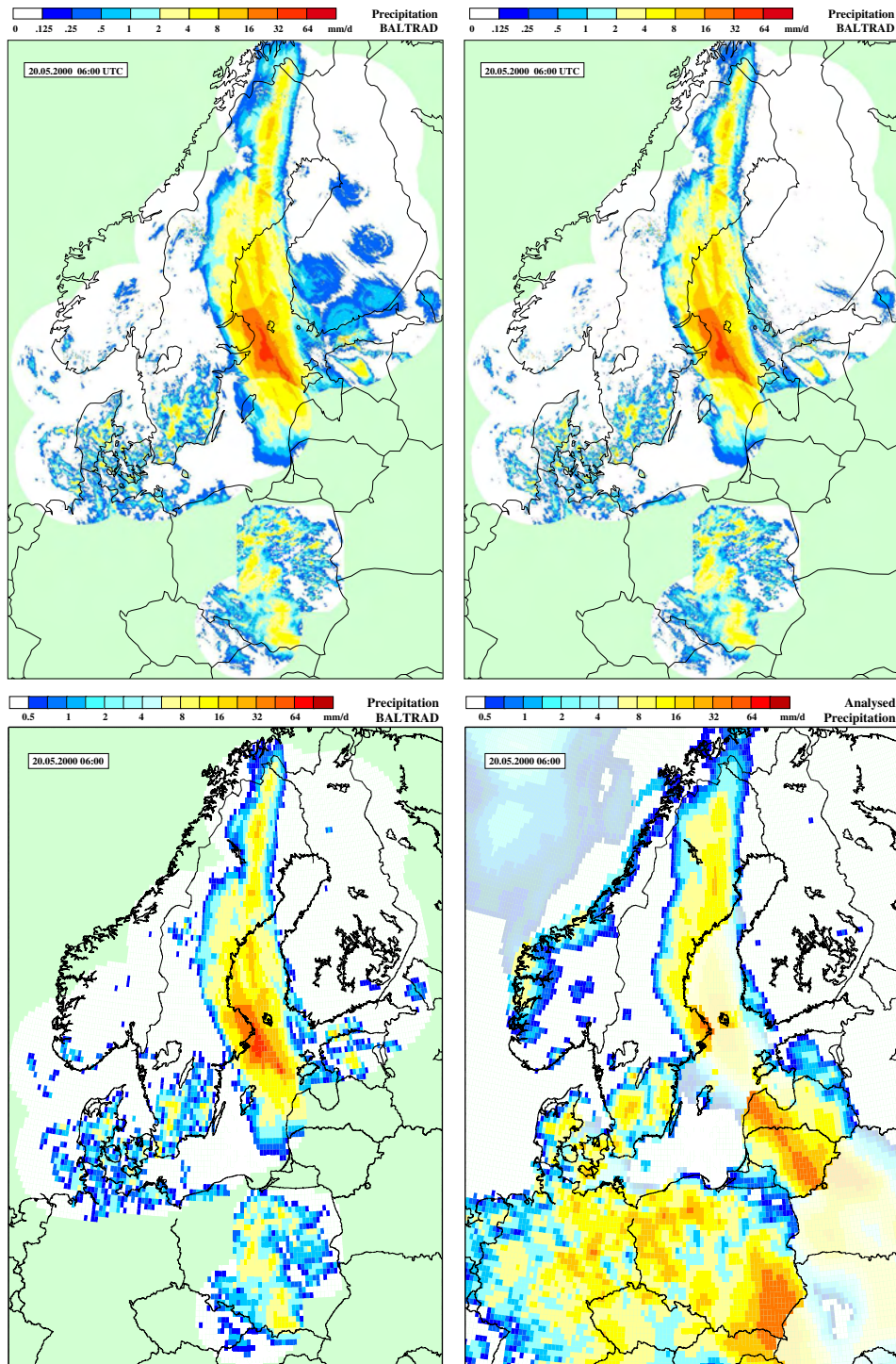
Beim BALTRAD wurden keine Filter angewendet, es wurde lediglich ein Schwellwert von 0.2 mm/h definiert, wie auch am 21. Mai 2000 erkennbar ist.

Auch wenn BALTRAD auf der Bildverarbeitungsebene nicht bearbeitet wurde, so werden einige Artefakte bei der Interpolation vom BALTRAD auf das ELDAS-Gitter deutlich abgeschwächt. Unter anderem werden damit die teils doch sehr stark ausgeprägten Übergänge zwischen den einzelnen Radarstationen geglättet, wie unter anderem am 23. Mai 2000 über Finnland erkennbar ist. Die in den Radarbildern enthaltenen Ground Clutter fallen durch der Clutter Microsuppression bei der Transformation heraus, wie durch den Vergleich der korrigierten Bilder auf BALTRAD original Gitter und ELDAS Gitter am 20. Mai 2000 sieht.

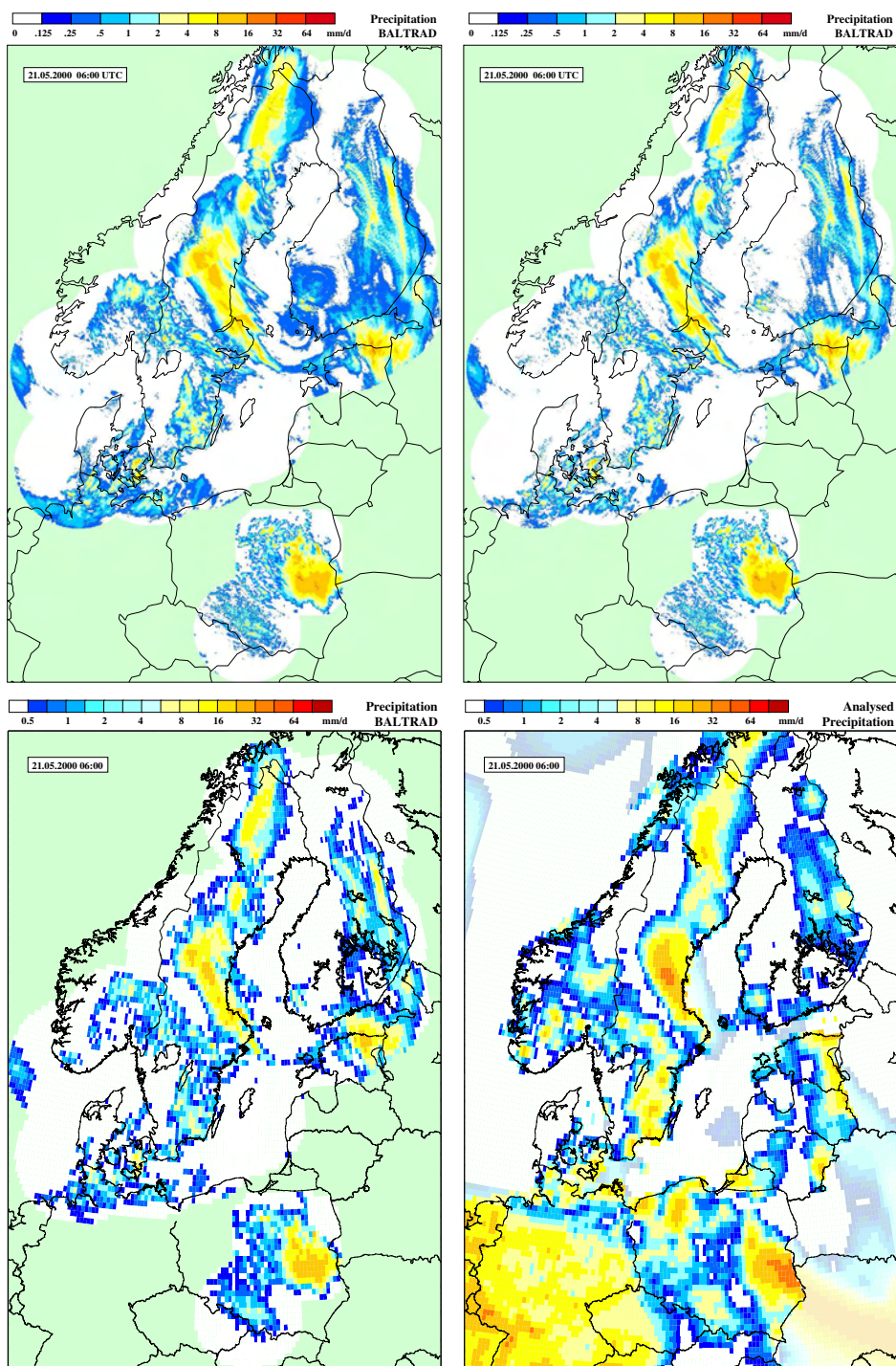
Das Problem der Abschattung durch die Orographie bzw. der Ausbreitungsdämpfung lässt sich wie beim CERAD nicht auf der Bildverarbeitungsebene lösen. Auch hier wäre ein oder mehrere weitere Parameter nötig um eine Verbesserung zu erzielen. Die Ausbreitungsdämpfung wird durch die nachfolgende Kalibrierung mit den Bodenanalysen (Skomorowski, 2004) abgeschwächt.

Doch generell lässt sich sagen, dass der erste Eindruck nicht widerlegt wurde. In gewisser Weise ist es schade, dass aus diesem großen und vor allem hochaufgelösten Datensatz nicht mehr herauszuholen war.

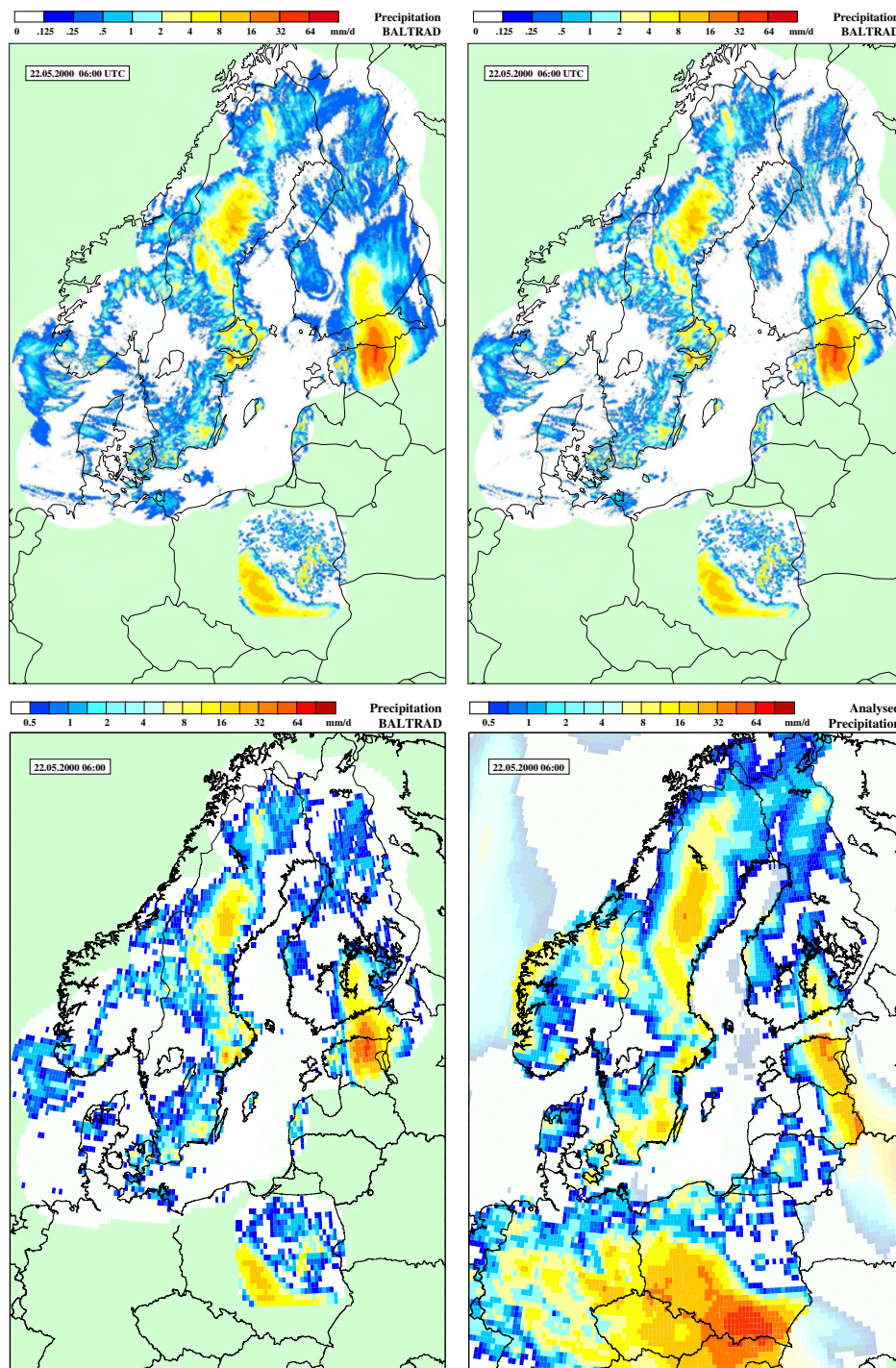
Abb. 5.72 (Seite 73 - 78) zeigt 24-stündige Niederschlagsfelder der Periode 20. - 25. Mai 2000, 06 - 06 UTC. Es werden in der BALTRAD original Auflösung der unkorrigierte Niederschlag (links oben) und der korrigierte Niederschlag (rechts oben), auf dem 0.2° ELDAS Gitter der korrigierte Niederschlag (links unten) und der Ausschnitt der Bodenanalyse (rechts unten) verglichen. Als objektive Beurteilung sind die Verifikationsmaße, wie in Kap. 4.7 beschrieben, angegeben.



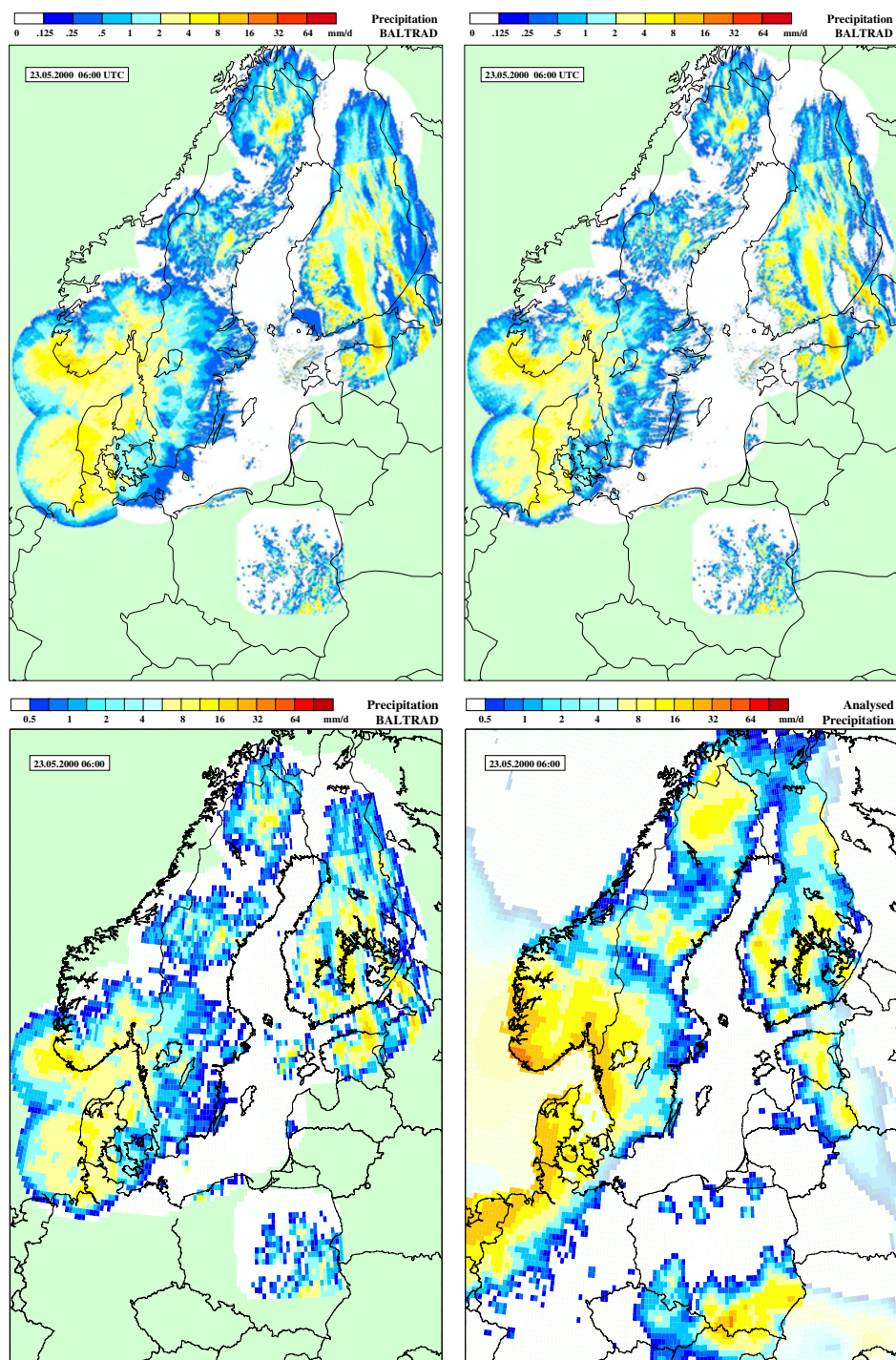
20.05.2000 06 UTC	uncorr.	corr.		uncorr.	corr.
Continous statistics			Categorical statistics		
Analysed	1.78		Hit rate, HR	0.76	0.79
Radar prec.	1.16	1.03	Critical success index, CSI	0.61	0.61
Mean error	-0.62	-0.75	Prob. of detection, POD	0.72	0.66
Mean absolute error	1.27	1.26	False alarm ration, FAR	0.20	0.10
RMS error	2.91	2.93	Bias score, BIAS	0.90	0.72
Rank-order correlation	0.69	0.74	True skill statistics, TSS	0.53	0.58



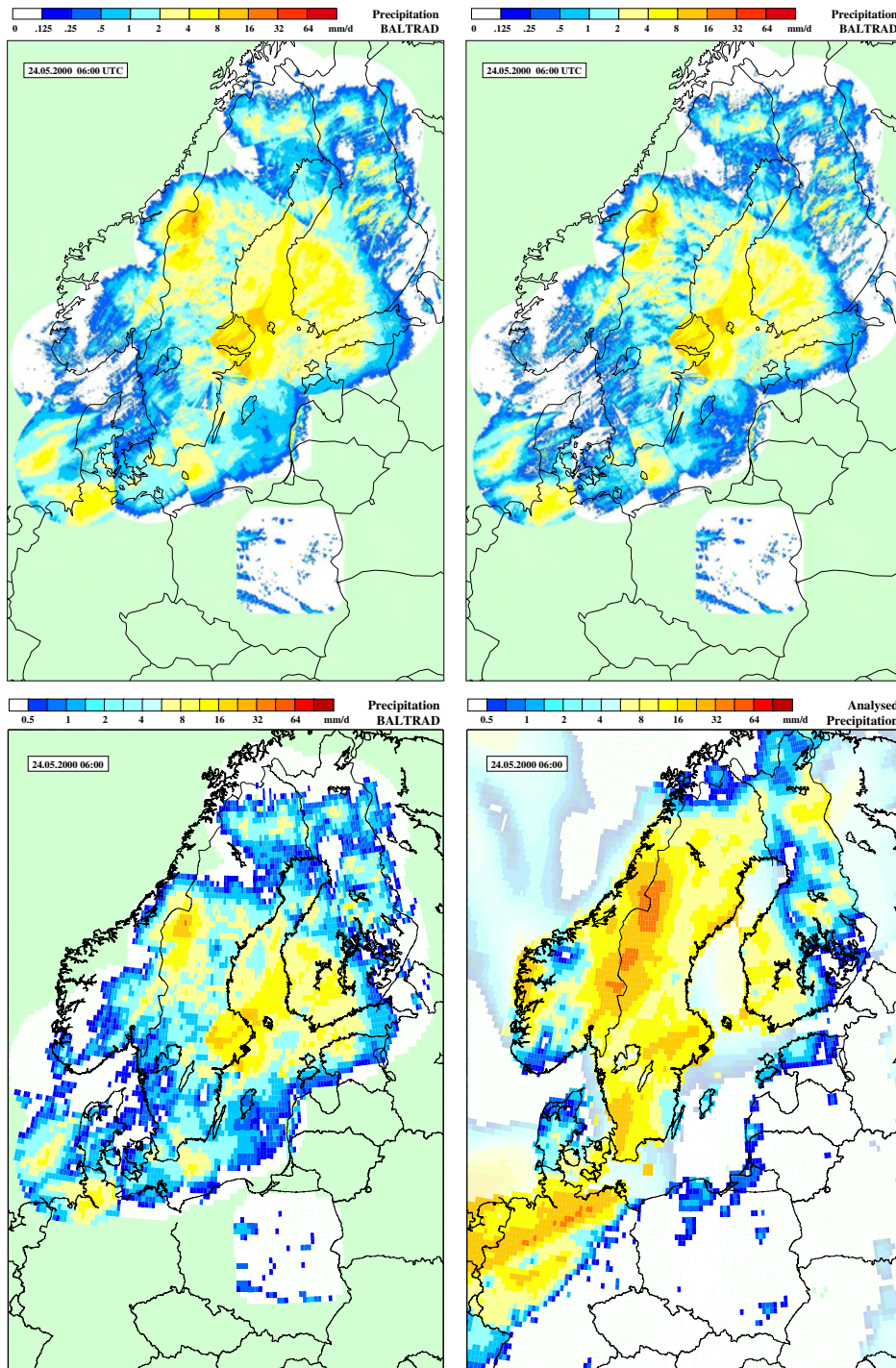
21.05.2000 06 UTC	uncorr.	corr.		uncorr.	corr.
Continous statistics			Categorical statistics		
Analysed	1.08		Hit rate, HR	0.69	0.68
Radar prec.	0.72	0.60	Critical success index, CSI	0.57	0.52
Mean error	-0.36	-0.48	Prob. of detection, POD	0.67	0.57
Mean absolute error	0.79	0.79	False alarm ration, FAR	0.20	0.15
RMS error	1.73	1.78	Bias score, BIAS	0.85	0.67
Rank-order correlation	0.56	0.57	True skill statistics, TSS	0.40	0.41



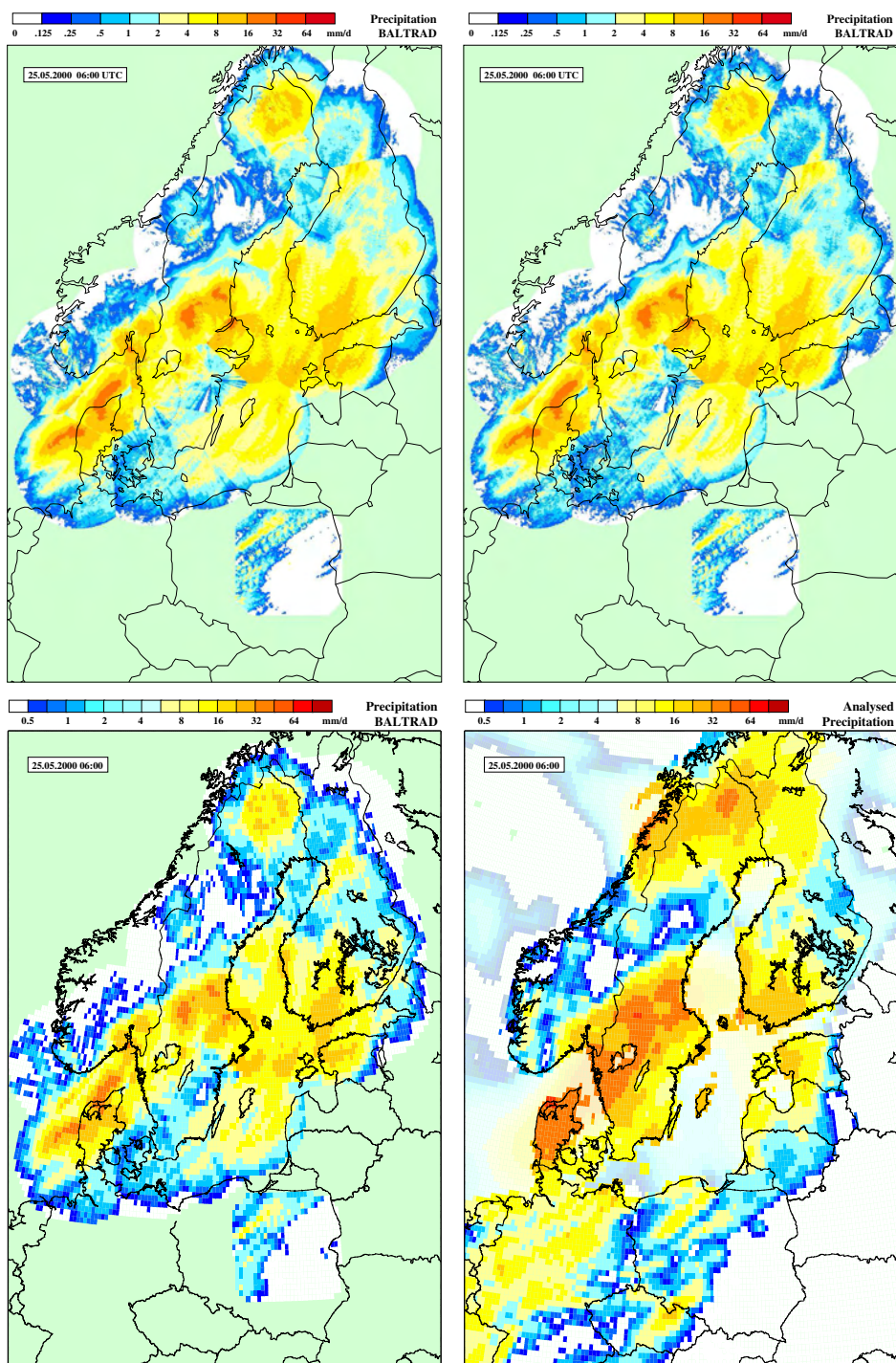
22.05.2000 06 UTC	uncorr.	corr.		uncorr.	corr.
Continous statistics			Categorical statistics		
Analysed	1.25		Hit rate, HR	0.66	0.63
Radar prec.	0.85	0.73	Critical success index, CSI	0.57	0.51
Mean error	-0.39	-0.51	Prob. of detection, POD	0.65	0.54
Mean absolute error	0.86	0.87	False alarm ration, FAR	0.17	0.11
RMS error	1.87	1.89	Bias score, BIAS	0.78	0.61
Rank-order correlation	0.57	0.59	True skill statistics, TSS	0.34	0.38



23.05.2000 06 UTC	uncorr.	corr.		uncorr.	corr.
Continous statistics			Categorical statistics		
Analysed	2.49		Hit rate, HR	0.78	0.74
Radar prec.	1.09	0.90	Critical success index, CSI	0.73	0.67
Mean error	-1.40	-1.58	Prob. of detection, POD	0.80	0.72
Mean absolute error	1.75	1.86	False alarm ration, FAR	0.10	0.08
RMS error	3.08	3.23	Bias score, BIAS	0.89	0.78
Rank-order correlation	0.73	0.70	True skill statistics, TSS	0.52	0.52



24.05.2000 06 UTC	uncorr.	corr.		uncorr.	corr.
Continous statistics			Categorical statistics		
Analysed	3.16		Hit rate, HR	0.81	0.78
Radar prec.	1.43	1.15	Critical success index, CSI	0.78	0.74
Mean error	-1.73	-2.01	Prob. of detection, POD	0.84	0.79
Mean absolute error	2.23	2.36	False alarm ration, FAR	0.09	0.07
RMS error	3.66	3.85	Bias score, BIAS	0.93	0.85
Rank-order correlation	0.58	0.56	True skill statistics, TSS	0.49	0.52



25.05.2000 06 UTC	uncorr.	corr.		uncorr.	corr.
Continous statistics			Categorical statistics		
Analysed	5.82		Hit rate, HR	0.87	0.83
Radar prec.	2.84	2.54	Critical success index, CSI	0.86	0.82
Mean error	-2.97	-3.28	Prob. of detection, POD	0.89	0.84
Mean absolute error	3.42	3.59	False alarm ration, FAR	0.03	0.03
RMS error	5.31	5.52	Bias score, BIAS	0.92	0.86
Rank-order correlation	0.68	0.67	True skill statistics, TSS	0.49	0.56

5.2 Verifikationsergebnisse für die gesamte Periode

In Tab. 5.1 und 5.2 sind die Verifikationsergebnisse für das gesamte Jahr 2000 sowohl für das CERAD als auch für das BALTRAD dargestellt. Beim CERAD wurden die Verifikationsmaße für die unkorrigierten und korrigierten Felder berechnet, beim BALTRAD nur die für die korrigierten Felder.

CERAD 2000	uncorr.	corr.		uncorr.	corr.
Continuos statistics			Categorical statistics		
Analysed	2.48		Hit rate, HR	0.74	0.74
Radar prec.	2.70	2.19	Critical success index, CSI	0.63	0.61
Mean error	0.22	-0.29	Prob. of detection, POD	0.75	0.69
Mean absolute error	2.73	2.38	False alarm ration, FAR	0.20	0.16
RMS error	7.92	6.10	Bias score, BIAS	0.94	0.83
Rank-order correlation	0.62	0.63	True skill statistics, TSS	0.47	0.50

Abb. 5.1: Verifikationsergebnisse des CERADs für das Jahr 2000.

Im Gebiet des CERADs wurde über das Jahr ein mittlerer Niederschlag von 2.48 mm/Tag gemessen. Während das unkorrigierte CERAD diesen Wert um 0.22 mm/Tag überschätzt, beträgt der mittlere Wert nach der Korrektur 2.19 mm/Tag und unterschätzt den tatsächlichen Wert um 0.29 mm/Tag. Hingegen wurde im Gebiet des BALTRADs ein Mittelwert von 2.40 mm/Tag gemessen. Die BALTRAD Daten unterschätzen diesen Wert deutlich um 1.64 mm/Tag.

BALTRAD 2000	uncorr.	corr.		uncorr.	corr.
Continuos statistics			Categorical statistics		
Analysed	2.40		Hit rate, HR	-	0.66
Radar prec.	-	0.76	Critical success index, CSI	-	0.52
Mean error	-	-1.64	Prob. of detection, POD	-	0.55
Mean absolute error	-	1.95	False alarm ration, FAR	-	0.11
RMS error	-	4.17	Bias score, BIAS	-	0.62
Rank-order correlation	-	0.57	True skill statistics, TSS	-	0.42

Abb. 5.2: Verifikationsergebnisse des BALTRADs für das Jahr 2000. Auf die Berechnung der Verifikationsmaße der unkorrigierten Felder wurde verzichtet, da das BALTRAD nicht korrigiert wurde. Im BALTRAD wurde nur eine untere Schwelle für Niederschlagswerte gesetzt. Werte kleiner 0.2 mm/h werden Null gesetzt.

Beim CERAD sind der absolute Fehler und der RMS-Wert des korrigierten Niederschlags niedriger als der des unkorrigierten (MAE: uncorr.=2.73 mm/Tag, corr.=2.38 mm/Tag; RMS: uncorr.=7.92 mm/Tag, corr.=6.10 mm/Tag). Während die Trefferrate (HR) gleich geblieben ist,

hat sowohl die Entdeckungswahrscheinlichkeit (POD), als auch der BIAS abgenommen (HR: uncorr.=corr.=0.74, POD: uncorr.=0.75, corr.=0.69; BIAS: uncorr.=0.94, corr.=0.83). Die *False Alarm Ratio* (FAR) und der *True Skill Score* (TSS) verdeutlichen die höhere Genauigkeit des korrigierten Niederschlags (FAR: uncorr.=0.20, corr.=0.16; TSS: uncorr.=0.47, corr.=0.50).

Beim BALTRAD liegt der RMS-Wert bei 4.17 mm/Tag und ist deutlich niedriger als der des CERADs. Aber auch der Rang-Korrelationskoeffizient und der *True Skill Score* (TSS) sind geringer (R=0.57; TSS=0.42). Jedoch verfälschen vermutlich dies Stationen im Norden und die damit verbundene Abwächung das Ergebnis. Auch ist generell Schnee für Radargeräte schwieriger zu erfassen.

Kapitel 6

Diskussion

Diese Arbeit ist ein neuer Beitrag zur Radarmeteorologie, der Erstellung von 3- und 24-stündigen Niederschlagsfeldern zur Verwendung als Eingangsdaten für den Assimilationszyklus von NWP Modellen. Dazu wurde erstmals ein Radardatensatz bestehend aus zwei großen Radarnetzwerken, dem CERAD und BALTRAD, für eine 15-monatige Periode bearbeitet und den Partnern im EU-Projekt ELDAS zur Verfügung gestellt (Rubel et al., 2004).

Hauptziel dieser Arbeit war die Filterung radarspezifischer Fehler aus den vorliegenden Datensätzen. Hierbei wurde auf die Methode der multitemporalen objektiv vergleichenden Bildverarbeitung zurückgegriffen. Der Sinn dieser Filterung ist es Echos, die mit Niederschlägen verbunden sind, möglichst unverändert zu lassen und Störechos oder Echos, die nicht mit Niederschlag in Verbindung zu bringen sind, zu eliminieren.

Im Laufe der Arbeit zeigte sich, dass in den vorliegenden Daten viele verschiedenartige Probleme enthalten sind. Es stellte sich die Frage, auf welche Probleme das Hauptaugenmerk gerichtet werden soll. Da es Ziel dieser Arbeit war ein operationelles Verfahren zu entwickeln, stand die Reduzierung von Clutter und technische Probleme im Vordergrund. Andere Probleme, wie z.B. Entfernungsdämpfung, erfordern zusätzliche Informationen und blieben daher unberücksichtigt.

Es standen Daten von zwei europäischen Radarnetzwerken, dem CERAD und BALTRAD, zur Verfügung. Die Daten unterschiedlicher Radargeräte sind von unterschiedlicher Qualität. Auch sind die Daten von ein und demselben Radar durch die unterschiedliche Entfernungen der Echos und durch spezifische regionale Probleme beeinflusst. Daher ist die Güte der beiden Radarnetzwerke nicht nur aufgrund der Compositing-Algorithmen, sondern auch unter anderem aufgrund der geographischen Gegebenheiten verschieden.

Die hier angewandte Methode der multitemporalen objektiv vergleichenden Bildverarbeitung scheint vor allem wegen den Eigenschaften der Daten geeignet. Bearbeitet würden Daten einer 15-monatigen Periode, d.h. im Gegensatz zum operationellen Dienst sind nicht nur die vergangenen Bilder vorhanden, sondern auch die nachfolgenden.

Mit den in Kap. 4 beschriebenen Korrekturverfahren konnten etliche Probleme behoben bzw.

abgemildert werden. Vor allem Artefakte, wie Quadratur, Ringe, Sonneneinstrahlung, Ground und Sea Clutter, die das Bild und damit das Ergebnis der Akkumulation verfälschen, konnten teilweise komplett eliminiert werden bzw. durch bessere Werte ersetzt werden. Dadurch lassen sich die Radardaten effektiver auswerten, wenn gleich keine hundertprozentige Lösung gefunden wurde. Zu den nicht behebbaren Problemen zählen unter anderem die fehlenden Termine innerhalb der Periode, sowie die fehlenden Radarstationen in den Composites.

Die ständige Verbesserung und Optimierung der Korrekturalgorithmen an einzelnen Radarstationen wird an den verschiedensten Instituten, wie am IMK-FZK¹, betrieben. So werden z.B. für das Problem des Bright Band verschiedene Korrekturalgorithmen entwickelt (Gysi et al., 1997)). Die neuesten berücksichtigen unter anderem ein aus Bodenmessungen abgeleitetes mittleres Vertikalprofil der Temperatur. Auch die Abschattung durch die Orographie kann durch Extrapolation, des vertikalen Profils der Reflektivität zum Boden betrachtet werden (Germann et al., 2002). Jedoch einige der in Kap.2 erläuterten Fehlerquellen, wie Secondtrip-Clutter, können allerdings nicht behoben werden.

Die ZR-Beziehung ist hier von untergeordneter Bedeutung, da im ELDAS-Projekt eine Kalibrierung der Radardaten mit Bodenanalyse geplant ist (Skomorowski, 2004). Jedoch stellt die Untersuchung und Verbesserung der ZR-Beziehung einen interessanten Aspekt für die Forschung dar. In der Praxis werden die ZR-Beziehungen einheitlich für ein Messsystem verwendet. Wenn man bedenkt, dass in einem von einem Radar vermessenen Gebiet verschiedene niederschlags-erzeugende Wolkensysteme existieren können, kann man sich vorstellen, unterschiedliche ZR-Beziehungen in verschiedenen Teilen des Radarvolumens zu benutzen. Eine Differenzierung könnte anhand charakteristischer Parameter, wie dem radialen Reflektivitätsgradient, vorgenommen werden. All diese Methoden würden die Qualität der Ausgangsdaten und damit der Composites verbessern. Vermutlich wäre eine Optimierung des Korrekturalgorithmus durch die Einbeziehung von weiteren Parameter, wie Höhenquerschnitte oder die Orographie, zu erzielen.

Jedoch das eigentliche Hauptproblem besteht in der prinzipiellen Unkenntnis des atmosphärischen Zustands, wie Temperatur- oder Feuchteschichtung, und den damit verbundenen verschiedenen Aggregatzuständen des Wassers in der Atmosphäre.

Das Radar und Radarnetzwerke gewannen als Nowcasting-Instrument und Frühwarnsystem nicht erst mit den Überschwemmungen in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung. Vielleicht wird dadurch auch der Nachbreitung und Weiterverarbeitung der Radardaten, z.B. als Eingangsdaten für hydrologische Berechnungen, mehr Aufmerksamkeit geschenkt. Im Rahmen des ELDAS-Projekts wird nun erstmalig versucht Radardaten über die Bodenfeuchte in NWP's einfließen zu lassen. Es bleibt zu hoffen, dass damit ein weiterer Bereich der Radardatennutzung erschlossen wird.

¹Institut für Meteorologie und Klimaforschung - Forschungszentrum Karlsruhe

Anhang A

CERAD - vorhandene Termine

In der Tabelle ist die Anzahl der vorhandenen Termine des CERADs aufgelistet. Pro Tag können maximal 48 Termine vorhanden sein. Neben der Gesamtanzahl pro Monat ist auch der Prozentsatz der fehlenden Termine pro Monat angegeben. In den Monaten Feb. - März und Okt. 2000 sind für ca. ein Drittel der Termine keine Radardaten verfügbar.

Tag	1999			2000				
	Okt.	Nov.	Dez.	Jän.	Feb.	März	April	Mai
01	47	47	37	14	28	24	0	5
02	46	41	33	43	43	38	0	0
03	45	47	44	45	40	40	0	0
04	45	45	47	48	47	47	33	0
05	44	47	47	48	43	48	48	31
06	47	47	47	36	47	48	45	47
07	47	46	47	48	42	46	47	48
08	47	44	47	42	45	46	47	47
09	44	44	46	48	46	47	48	48
10	2	44	46	47	38	47	48	47
11	46	41	46	47	43	48	48	48
12	23	46	47	48	44	47	48	48
13	10	46	47	48	39	48	48	48
14	30	47	47	47	47	46	48	48
15	43	48	45	47	45	46	48	48
16	46	47	47	48	4	38	16	47
17	47	45	46	48	0	45	25	48
18	43	46	47	48	26	38	0	47
19	46	47	47	48	41	43	0	48
20	45	47	48	48	45	42	0	48
21	45	47	47	48	48	45	0	48
22	43	42	48	48	43	42	0	46
23	45	44	47	48	17	47	0	47
24	41	45	48	48	21	48	39	48
25	41	47	48	47	48	23	47	48
26	45	45	47	42	46	0	48	47
27	43	47	48	48	30	0	48	48
28	45	47	48	47	0	0	48	48
29	44	47	48	48	0	0	47	48
30	46	30	48	48	-	0	47	48
31	47	-	48	48	-	0	-	46
ges.	1273	1353	1433	1385	1006	1077	921	1273
%	14	6	4	7	28	28	36	14

	2000						
Tag	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt	Nov.	Dez.
01	48	47	48	48	48	25	48
02	47	48	48	48	48	0	48
03	48	46	48	48	47	31	48
04	48	48	48	48	48	46	47
05	48	47	48	48	48	48	48
06	45	47	48	48	48	46	48
07	48	48	47	47	48	48	48
08	48	48	48	48	48	48	48
09	48	48	48	48	46	48	48
10	48	44	47	48	0	47	48
11	48	0	47	48	0	47	48
12	48	0	48	48	30	47	47
13	48	0	48	48	48	47	48
14	48	0	48	39	48	48	48
15	48	0	48	48	48	46	47
16	48	0	47	47	48	46	48
17	47	29	47	48	48	46	48
18	48	48	48	48	48	46	48
19	48	48	48	48	47	47	41
20	48	48	48	48	47	43	48
21	48	48	47	48	48	46	48
22	48	47	47	48	48	46	48
23	48	48	48	48	4	44	48
24	48	48	47	48	0	47	48
25	48	48	48	48	0	48	42
26	47	47	48	48	0	44	47
27	47	46	48	48	0	44	47
28	48	19	47	48	0	48	47
29	48	27	48	48	0	48	48
30	48	48	48	47	0	47	48
31	-	47	47	-	20	-	47
ges.	1433	1117	1478	1428	961	1312	1468
%	0.5	25	0.7	0.8	35	9	1

Literatur

- Bader, M., G. Forbes, J. Grant, R. Lilley, und A. Waters, 1995: *Images in Weather Forecasting - A Practical Guide for Interpreting Satellite and Radar Imagery*. University Press, Cambridge, pp. 50–69.
- Battan, L., 1973: *Radar Observation of the Atmosphere*. University of Chicago Press, Chicago, pp. 324.
- Benhang, K., und J. Handwerker, 2001: “Verbreitet Niederschlag“ - Niederschlagsmessung mit Radar: Ein Überblick. *Nachrichten-Forschungszentrum Karlsruhe*, **1**, 12–22.
- Collier, C., 1996: *Applications of Weather Radar Systems: A Guide to Uses of Radar Data in Meteorology and Hydrology*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, pp. 1–126.
- Ellis, S., C. Kessinger, T. O’Bannon, und J. Van Andel, 2003: Mitigation ground clutter contamination in the WSR-88D. In *19th Conference on IIPS*.
- Emeis, S., 2000: *Hirts Stichwörterbuch: Meteorologie in Stichworten*. Geb. Borntraeger, Berlin, Stuttgart, pp. 200.
- Germann, U., und J. Joss, 2002: Mesobeta profiles to extrapolate radar precipitation measurements above the Alps to the ground level. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 542–557.
- Gunn, K., und T. East, 1954: The microwave properties of precipitation particles. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **80**, 522–545.
- Gunn, K., und J. Marshall, 1958: The distribution with size aggregate snowflakes. *J. Meteorol.*, **15**, 452–461.
- Gysi, H., 2003: Kleines ABC der Radar-Meteorologie und technische Details. <http://radar-info.fkz.de/abc.html>.
- Gysi, H., R. Hannedes, und K. Beheng, 1997: A method of bright-band correction in horizontal rain intensity distributions. In *Proc. 28th Radar Conference*, pp. 214–215. Amer. Met. Soc., Austin.
- Jann, A., 1993: Untersuchung der Verwendungsmöglichkeiten der operationellen österreichischen Radardaten. Diplomarbeit, Universität Wien, pp. 157.

- Joss, J., und A. Waldvogel, 1969: Raindrop size distribution and sampling size errors. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 566–569.
- Köck, K., 1999: *Nationale und internationale Wetterradarnetzwerke und ihre Kalibrierung mittels Regenmesserdaten für quantitative Verwendung*. Dissertation, Universität Graz, pp. 143.
- Koistinen, J., 2000: Bird migration patterns on weather radars. *Phys. Chem. Earth (B)*, **24**, 1185–1193.
- Krennert, T., 2001: Tracking konvektiver Zellen. Diplomarbeit, Universität Wien, pp. 107.
- Leitner, T., 1999: *Clutter-Erkennung und -Unterdrückung in Wetterradar-Bildern mit multi-temporalen mehrparametrischer Bildverarbeitung*. Dissertation, Universität Graz, pp. 175.
- Lucchinetti, F., 2001: Die Verdunstung in der Radarmeteorologie: Korrekturverfahren zur Abschätzung des Bodenniederschlags aus Radarmessungen. Semesterarbeit am ETH Zürich, pp. 29. <http://n.ethz.ch/student/profeta/radar.ps>.
- Marshall, J., und W. Palmer, 1948: The distribution of the raindrops with size. *J. Meteorol.*, **5**, 165–166.
- Michelson, D., 2004: BALTEX Radar Center - homepage. <http://www.smhi.se/brdc>.
- Michelson, D., T. Andersson, J. Koistinen, C. Collier, J. Riedl, J. Sytarc, U. Gjertsen, A. Nielsen, und S. Overgaard, 2000: *BALTEX Radar Data Centre Products and their Methodologies*. 90, SMHI Report Meteorology and Climatology, pp. 76.
- Riedl, J., 1986: Radar-Flächenniederschlagsmessung. *Promet*, **16**, 20–23.
- Rubel, F., 2004: European precipitation dataset for NWP model verification and data assimilation studies. *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. WMO-TD, submitted.
- Rubel, F., und M. Hantel, 1999: Correction of Daily Rain Gauge Measurements in the Baltic Sea Drainage Basin. *Nord. Hydrol.*, **30**, 191–208.
- Rubel, F., und M. Hantel, 2001: BALTEX 1/6-degree daily precipitation climatology 1996–1998. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **77**, 155–166.
- Rubel, F., P. Skomorowski, und K. Brugger, 2004: A new 3-hourly precipitation dataset for nwp model verification and data assimilation studies. In *4th Study Conference on BALTEX*. submitted.
- Sauvageot, H., 1992: *Radar Meteorology*. Artech House, Norwood (MA), pp. 366.
- Schönwiese, C.-D., 2000: *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Geb. Borntraeger, Berlin, Stuttgart, pp. 298.

- Skomorowski, P., 2002: Verifikation globaler täglicher Satellitenniederschläge über den Alpen. Diplomarbeit, Universität Wien, pp. 137.
- Skomorowski, P., 2004: *Niederschlagsfelder zur Bestimmung der Bodenfeuchte in ELDAS*. Dissertation, Universität Wien. in Arbeit.
- Skomorowski, P., F. Rubel, und B. Rudolf, 2001: Verification of GPCP-1DD Global Satellite precipitation products using MAP Surface Observations. *Physik. Chem. Earth (B)*, **26**, 403–409.
- Strümpel, S., 2001: Vergleich von BALTRAD-Niederschlagsfeldern mit anderen Methoden der Niederschlagsmessung. Diplomarbeit, Universität Kiel, pp. 119.
- Svabik, O., 1989: Review of meteorological aspects on hail defense activities in Austria. *Theor. Appl. Climatol.*, **40**, 247–254.
- Ulbrich, C., 1983: Natural variation in the analytical form of raindrop size distribution. *J. Clim. Appl. Meteor.*, **22**, 1764–1775.
- Van den Hurk, B., 2001: Development of a European Land Data Assimilation System to Predict floods and droughts (ELDAS) - A Project summary. pp. 6.
- Van den Hurk, B., 2004: ELDAS - homepage. <http://www.knmi.nl/samenw/eldas>.
- Wiesner, J., 1895: Beiträge zur Kenntnis des tropischen Regens. Bericht Math. Nat. Kl. Wien.
- Wolff, C., 2003: Radargrundlagen - Vorlesung über Grundlagen der Radartechnik. <http://mitglied.lycos.de/radargrundlagen/top.html>.
- Wüest, M., T. Grimbacher, E. Barthazy, R. Schefeld, und H. Weber, 2002: Radarmeteorologie und Niederschlagsphysik am Institut für Atmosphäre und Klima IACETH, ETH Zürich. CD zum Tag der offenen Tür der Physik 2002, <http://www.iac.ethz.ch/en/groups/richner/cd/index.html>.

Lebenslauf

Name: Katharina Brugger
geboren am: 14.02.1980 in Wien
Eltern: Dipl.Ing. Hermann Brugger, Angestellter
Gertrude Brugger, geb. Stiedl, Hausfrau
Geschwister: Johanna (1983)

Ausbildung

1986-1998

Besuch der Volksschule in Wien 18.

Besuch des Realgymnasium in Wien 18.

Matura Juni 1998

seit Oktober 1998

Inskription an der Formal- und Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Wien,
Studienrichtung Meteorologie und Geophysik

April 2001

1. Diplomprüfung und Spezialisierung auf Meteorologie

Berufliche Erfahrung

Sept. 2000: Ferialpraktikum bei der Verbundgesellschaft, Wien

Aug. 2001: Ferialpraktikum bei MC-Wetter, Berlin

Sept. 2001: Ferialpraktikum beim Deutschen Wetterdienst, Potsdam

Sept. 2002: Ferialpraktikum bei Siemens AG, Wien

seit Feb. 2003: Projektmitarbeit bei ELDAS (Development of an European Land Data Assimilation System to predict floods and droughts)