

Anwendung verschiedener Verfahren zur Detektion von Hagel aus dreidimensionalen C-Band Radardaten

Diplomarbeit im Fach Meteorologie
von

Petra S. I. Kugel

April 2012



INSTITUT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMAFORSCHUNG
KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE

Referent:

Prof. Dr. Klaus Dieter Beheng

Korreferent:

PD Dr. Michael Kunz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Theoretische Grundlagen	9
2.1	Konvektion	9
2.2	Gewittersysteme	15
2.3	Entstehung von Hagel	22
2.4	Schadenwirkung von Hagel auf Gebäude	26
2.5	Radarmeteorologie	27
2.6	Hageldetektion	34
3	Verwendete Datensätze	35
3.1	Radardaten	35
3.2	Landnutzungsdaten	36
3.3	Untersuchungsgebiet	37
3.4	Versicherungsdaten der SV Sparkassenversicherung	38
3.5	Winddaten des Messmasts im KIT Campus Nord	39
3.6	Wolkenoberflächentemperatur	39
3.7	Hagelklimatologie	39
4	Angewendete Methoden zur Auswertung der Radardaten	41
4.1	Aufbereitung der Radardaten	41
4.2	Verifikation	41
4.3	Hagelkriterien	44
4.4	Auswertung über bebautem Gebiet	48
4.5	Kriterien zur Erfüllung eines Ereignisses	49
5	Fallstudien	51
5.1	Synoptische Beschreibung der Hageltage	51
5.2	Zusammenhang zwischen Hagelkriterien und Gebäudeschäden	52
5.3	Statistische Auswertung der Fallbeispiele	63

6 Langjährige Statistik	75
6.1 Auswertung der Hageldetektionsverfahren über 15 Jahre	75
6.2 Auswertung der vertikalen Erstreckung konvektiver Ereignisse	87
7 Zusammenfassung	93
Literaturverzeichnis	97
A Anhang	I

1. Einleitung

Hagelstürme verursachen in Deutschland immer wieder erhebliche Schäden sowohl in der Landwirtschaft, an Gebäuden oder auch Fahrzeugen. Trotz ihres lokalen Auftretens stellen sie in Baden-Württemberg mit einem Anteil von fast 40% die Hauptursache aller Elementarschadenereignisse an Gebäuden dar (Kunz und Puskeiler, 2010b). Es besteht daher ein großes Interesse daran, sowohl einzelne Hagelereignisse als auch deren Klimatologie möglichst genau zu detektieren. Da jedoch Hagel aufgrund seiner geringen räumlichen Ausdehnung nicht vollständig und flächendeckend an konventionellen Beobachtungsstationen detektiert werden kann, wird auf Radarbeobachtungen zurückgegriffen. Diese eignen sich wegen ihrer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung am besten für solche Analysen. Bei der Verwendung eines Niederschlagsradars kann zwar die konvektive Struktur eines Gewitters teilweise aufgelöst werden, jedoch lässt sich aus der Radarreflektivität nicht direkt auf Hagel am Boden schließen. Grund dafür ist vor allem die Proportionalität der Reflektivität Z zur 6. Potenz des Durchmesser des Streuers.

Untersuchungen von Schiesser und Schmid (2005), Cao (2008) sowie Kunz und Mohr (2009) weisen einen signifikanten Anstieg von Hagelereignissen in unterschiedlichen Zeiträumen und Gebieten nach. So zeigt die Untersuchung von Schiesser und Schmid den Anstieg der Anzahl der Hagelschäden in der Landwirtschaft in der Schweiz nördlich der Alpen über einen Zeitraum von 1920 bis 2002. Cao erhält bei der Auswertung der Hagelereignisse mit Korngrößen > 2 cm eine Zunahme im Untersuchungsgebiet Ontario. Auch die Studie von Kunz und Mohr (2009) zur Anzahl der Hagelereignisse mit Verifizierung mittels Daten der SV Sparkassenversicherung zeigen in Baden-Württemberg im Zeitraum 1986 bis 2004 diesen Trend. Die Analyse von Radar- und Schadendaten der SV Sparkassenversicherung (Puskeiler, 2009) zeigt eine große räumliche Variabilität von Häufigkeit der Hagelschäden und der Hagelereignissen auf. So ist die Hagelgefährdung in Baden-Württemberg im Großraum Stuttgart und südlich davon am höchsten. Diese Regionen mit vermehrtem Hagelschlag konnten in einer Seminararbeit von Damian (2011) mittels Analyse von Blitzdaten bestätigt werden. Auch Hohl et al. (2002) konnte diese hohe räumliche Variabilität von Hagelschlag mittels Hailpads nachweisen.

Für die Detektion von Hagel aus Radardaten zum Zweck des Nowcastings, d.h. Vorhersage für maximal 120 Minuten, werden verschiedene Hagelkriterien verwendet. Diese unterscheiden sich in ihrer Komplexität. Einfache Kriterien verwenden einen Schwellenwert der Radarreflektivität aus zweidimensionalen Radardaten, der häufig auf 55 dBZ festgelegt ist (Mason, 1971). Andere Kriterien verwenden dreidimensionale Radardaten und verknüpfen diese mit weiteren Parametern wie der Höhe einer oder mehrerer bestimmter Temperaturen (Waldvogel et al., 1979; Witt

et al., 1998), der Höhe des Echotops (Höhe der erfassten Radarreflektivität bei einem vorgegebenen Reflektivitätsschwellwert) (Smart und Alberty, 1985) oder der Wolkenoberflächentemperatur (Auer, 1994). Der amerikanische Radarverbund NEXRAD (Next Radar Generation) verwendet beispielsweise den Hail Detection Algorithm nach Smart und Alberty (1985) für die Warnungen vor möglichem Hagel. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) verwendet dagegen eine bodennahe Radarreflektivität >55 dBZ als Hagelsignatur bei seinem Zellverfolgungsalgorithmus KONRAD (Konvektionsentwicklung in Radarprodukten) und verschickt entsprechende Warnungen an seine Nutzer (DWD, 2012).

Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene Detektionsverfahren für Hagel aus Radardaten darauf zu untersuchen, inwieweit diese tatsächlich einen Rückschluss auf Hagelschlag am Boden zulassen. Um dies zu ermöglichen, werden für die Berechnung der verschiedenen Kriterien die dreidimensionalen Radardaten in Form von Rohdaten der Radarreflektivität vom C-Band Niederschlagsradar des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-TRO) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Campus Nord, verwendet. Diese stehen für den Zeitraum von 1997 bis 2011 zur Verfügung. Für die Validierung der verschiedenen Methoden werden zusätzlich Schadendaten von Gebäuden der SV Sparkassenversicherung AG verwendet, die für Baden-Württemberg sowohl für 5-stellige Postleitzahlgebiete als auch für ausgewählte Einzelereignisse georeferenziert und hausgenau vorliegen.

Dabei werden zunächst vier Fallbeispiele auf der Grundlage von Hagelzugbahnen (Puskeiler, 2009) und deren Länge (Kugel, 2010), die aus den Daten des IMK-Radars detektiert wurden, ausgewählt. Um möglichst unterschiedliche Ereignisse hinsichtlich der Anzahl der Gebäudeschäden, Stärke und Zugbahnlänge zu analysieren, werden Hagelgewitter mit unterschiedlicher Intensitäten und räumlicher Ausdehnung für die Auswertung herangezogen: ein starkes Ereignis mit sehr hohen Schäden, ein schwaches Ereignis mit wenigen Schäden an Gebäuden, eine horizontal stark ausgedehnte Gewitterline mit mehreren eingelagerten Hagelzellen sowie ein Gewitter, welches im Radargebiet entstanden und zerfallen ist. Anhand dieser Fallbeispiele werden verschiedene Detektionsverfahren für Hagel angewendet und hinsichtlich ihrer Güte und Charakteristik ausgewertet. Zur Optimierung der Detektion erfolgt gegebenenfalls eine Anpassung der Kriterien bzw. der Auswertungsmethode.

Im zweiten Schritt werden die Hagelkriterien auf alle Radardaten zwischen 1997 und 2011 in den Monaten April bis September angewendet und ausgewertet. Anschließend wird die vertikale Erstreckung ausgewählter Reflektivitäten analysiert. Dabei soll untersucht werden, in welcher Weise sich die vertikale Ausdehnung der Gewitterzelle sowohl im Jahresverlauf als auch möglicherweise in verschiedenen Gebieten unterscheidet. Hierbei werden sowohl die maximale Ausdehnung als auch die Häufigkeit der vertikalen Erstreckung einer vorherbestimmten Reflektivität untersucht.

Im Kapitel 2 werden zunächst die theoretischen Grundlagen der Gewitterentstehung, die relevanten mikrophysikalischen Vorgänge bei der Entstehung von Hagel in Gewitterwolken und die Schadenwirkung von Hagel vorgestellt. Es folgt eine kurze Einführung in die Radarmeteorologie und in die Nutzung von Radardaten zur Detektion von Hagelschlag. Kapitel 3 umfasst die Be-

schreibung des Untersuchungsgebiets wie auch die Beschreibung der für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Daten. Die verwendete Methode zur statistischen Auswertung und die detaillierte Erläuterung der angewendeten Kriterien zur Detektion von Hagel mittels Radardaten werden in Kapitel 4 vorgestellt. Eine ausführliche Auswertung und Diskussion der Einzelfallstudien, der Langzeitstudie über 15 Jahre sowie der Untersuchung der vertikalen Erstreckung erfolgt in den Kapiteln 5 und 6. Kapitel 7 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick auf weitere Perspektiven und Entwicklungsmöglichkeiten des Themas ab.

2. Theoretische Grundlagen

Gewittersysteme entstehen aus dem komplexen Zusammenspiel unterschiedlicher Prozesse und Mechanismen auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen. Sie sind häufig mit großen Schadenpotentialen durch starke Sturmböen, Überflutungen oder Hagel verbunden. Die folgenden Ausführungen geben einen kurzen Überblick über den aktuellen Stand des Wissens der anerkannten Theorien und Modelle über die Bildung verschiedener Gewittersysteme und von Hagel. Zunächst werden die verschiedenen Auslösemechanismen der Konvektion und die relevanten thermodynamischen Prozesse vorgestellt. Im Abschnitt 2.2 werden nachfolgend die einzelnen Gewittersysteme und deren Hagelpotential charakterisiert. Danach werden einige konzeptionelle Modelle zur Hagelbildung innerhalb der Gewittersysteme vorgestellt. Im Anschluss wird die aktuelle Theorie der Hagelentstehung, von der Eiskeimbildung bis zum ausgewachsenen Hagelkorn, sowie deren Charakteristik aufgezeigt. Danach folgt eine kurze Einführung in die Radarmeteorologie.

2.1 Konvektion

In der Meteorologie werden alle durch Auftriebskräfte verursachten kleinskaligen vertikalen Luftbewegungen in einer labilgeschichteten Luftmasse als Konvektion bezeichnet. Dabei wird Impuls, mechanische und thermische Energie sowie Wasserdampf transportiert. Die Auslösung von Konvektion erfolgt durch verschiedene Hebungsmechanismen. Aufteilen lässt sie sich in freie und erzwungene Konvektion. Als freie Konvektion werden alle nur mit thermischem Auftrieb verbundenen Prozesse bezeichnet. Erzwungene Konvektion dagegen benötigt einen externen Antrieb. Der thermische Auftrieb ist häufig im Sommer der Auslösemechanismus hochreichender Konvektion. Hierbei erwärmt sich ein Luftpaket an der Erdoberfläche durch Sonneneinstrahlung stärker als seine Umgebung. Der damit verbundene Dichteunterschied gegenüber der Umgebung führt zu einem positiven Auftrieb und damit zum aktiven Aufsteigen dieses Luftpaketes.

Für die Herleitung des Auftriebs in der Atmosphäre (Kraus, 2004) geht man von der Vertikalbeschleunigung eines Luftpaketes bei Vernachlässigung der Corioliskraft und der Reibung aus:

$$\frac{dw}{dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (2.1)$$

wobei w die vertikale Windkomponente, g die Schwerebeschleunigung, ρ_i die Dichte des Luftpaketes

kets und p_i der Druck des Luftpakets sind.

Wird in diese Gleichung nun die Zustandsgleichung für ein ideales Gas

$$p = \rho R_L T_v, \quad (2.2)$$

mit R_L für die Gaskonstante der trockenen Luft und T_v als virtuelle Temperatur und die hydrostatische Grundgleichung für die Umgebung,

$$\frac{\partial p_u}{\partial z} = -\rho_u g, \quad (2.3)$$

eingesetzt und die quasistatische Näherung berücksichtigt, d. h. $p = p_u$, ergibt sich für die Vertikalbeschleunigung:

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= -g + \frac{1}{\rho} \rho_u g \\ &= g \left(\frac{\rho_u - \rho}{\rho} \right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$= g \left(\frac{T_v - T_{vu}}{T_{vu}} \right) = B. \quad (2.5)$$

Ein Luftpaket erfährt dann einen positiven Auftrieb, wenn seine Temperatur höher ist als die Umgebungstemperatur. Dies entspricht einer labilen Schichtung, so dass das Luftpaket positiv nach oben hin beschleunigt wird. Für den Fall, dass $T_v < T_{vu}$ ist, erfährt das Luftpaket eine negative Beschleunigung, also einen Abtrieb. Besitzt das Luftpaket die gleiche virtuelle Temperatur wie die Umgebung ist die Auftriebskraft gleich Null.

Thermodynamik der Atmosphäre

Potentielle Temperatur

Die potentielle Temperatur gibt die Temperatur an, die ein trockenes Luftpaket mit einem Druck p und einer Temperatur T auf Normaldruckniveau p_0 (1000 hPa) annehmen würde. Um die potentielle Temperatur herzuleiten (Pichler, 1997), wird vom ersten Hauptsatz der Thermodynamik bei adiabatischen Prozessen

$$\delta q = du + \delta a = c_v dT + p d\alpha = 0 \quad (2.6)$$

mit der Wärmemenge δq , der Änderung der inneren Energie du und δa für die geleistete Arbeit sowie c_v für die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen und $\alpha = 1/\rho$ ausgegangen. In diesen wird die differentielle Form der Zustandsgleichung für ideale Gase

$$p d\alpha + \alpha dp = R_L dT \quad (2.7)$$

und die Relation von c_v mit der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p

$$c_p = c_v + R_L \quad (2.8)$$

eingesetzt und anschließend α durch die Zustandsgleichung eines idealen Gases (Gleichung 2.2) ersetzt:

$$c_p d \ln T - R_L d \ln p = 0. \quad (2.9)$$

Nach der Integration dieser Gleichung folgt

$$\frac{T_0}{T} = \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R_L}{c_p}}. \quad (2.10)$$

Setzt man nun $p_0 = 1000 \text{ hPa}$ und $T_0 \equiv \theta$ ergibt sich die Gleichung für die potentielle Temperatur

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R_L}{c_p}}. \quad (2.11)$$

Äquivalent–potentielle Temperatur

Die äquivalent–potentielle Temperatur bezeichnet die potentielle Temperatur, die ein Luftpaket aufweist, wenn der gesamte Wasserdampf kondensiert und die freiwerdende latente Wärme zum Erwärmen des Luftpakets genutzt wird. Dies wird erreicht, indem man ein Luftpaket erst trockenadiabatisch bis zum Kondensationsniveau, danach pseudoadiabatisch bis zum vollständigen Kondensieren des Wasserdampfs anhebt und es im Anschluss wiederum trockenadiabatisch auf $p_0 = 1000 \text{ hPa}$ bringt. Die Temperatur, die das Luftpaket nun besitzt, ist die äquivalent–potentielle Temperatur. Sie lässt sich näherungsweise mit der folgenden Formel

$$\theta_e = \theta \exp \left[\frac{L_c q_s}{c_p T} \right] \quad (2.12)$$

berechnen, wobei L_c die Kondensationswärme und q_s das Sättigungsmischungsverhältnis sind.

Brunt-Väisälä-Frequenz als Stabilitätsmaß

Sie ist ein Maß für die statische Stabilität der Atmosphäre. Sie lässt sich aus der Untersuchung der Stabilitätsbedingungen für eine virtuelle vertikale Auslenkung δz eines feuchten, aber nicht-gesättigten Luftpakets in einer beliebigen Umgebung herleiten. Dabei werden folgende Annahmen gewählt: Mischungsvorgänge mit der Umgebung sind ausgeschlossen, die virtuelle Verrückung beeinflusst die Umgebung nicht, adiabatisch, quasistatisch und Coriolis- und Reibungseffekte werden nicht berücksichtigt. Mit der Voraussetzung, dass der Druck des Luftpakets zu jeder Zeit dem Druck der Umgebung entspricht, kann z.B. nach Etling (2008) die potentielle Tempera-

tur auch wie folgt geschrieben werden:

$$\frac{\theta_u}{T_u} = \frac{\theta}{T} = \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R_L}{c_p}}. \quad (2.13)$$

Wird diese nun in die Ausgangsgleichung der Auftriebskraft (Gleichung 2.5) gesetzt, resultiert daraus:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = g \left(\frac{\theta_u - \theta}{\theta} \right). \quad (2.14)$$

Mit der Annahme eines linearen Verlaufs der potentiellen Temperatur mit der Höhe lässt sich die Reihe für die Temperatur $\theta(z_0 + \delta z)$ entwickeln:

$$\theta(z_0 + \delta z) \approx \theta(z_0) + \frac{\partial \theta}{\partial z} \delta z = \theta_0 + \frac{\partial \theta}{\partial z} \delta z \quad (2.15)$$

Dabei stellt θ_0 die potentielle Temperatur in der Höhe z_0 dar. Zusätzlich wird noch eine neue Höhenkoordinate Z eingeführt,

$$Z \equiv z - z_0 = \delta z, \quad (2.16)$$

die ihren Ursprung in der Ausgangshöhe z_0 hat. So folgt durch das Einsetzen in die Auftriebskraft (Gleichung 2.14):

$$\frac{d^2 Z}{dt^2} = -\frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial z} Z, \quad (2.17)$$

wobei Queney (1948)

$$\frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial z} = N^2 \quad (2.18)$$

als Brunt-Väisälä-Frequenz bezeichnet wird.

Die Lösung der gewöhnlichen Differentialgleichung

$$\frac{d^2 Z}{dt^2} + N^2 Z = 0 \quad (2.19)$$

für die Vertikalgeschwindigkeit ergibt nach der Fallunterscheidung:

$$w(t) = \begin{cases} w_0 \cosh(|N|t) & \text{für } N^2 < 0 \\ w_0 & \text{für } N^2 = 0 \\ w_0 \cos(Nt) & \text{für } N^2 > 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

Ist $N^2 < 0$, entfernt sich das Luftpartikel weiter vom Ort seiner Auslenkung, die Atmosphäre ist somit labil geschichtet. Für $N^2 = 0$ ist die Atmosphäre indifferent geschichtet und das Luftpaket erfährt nach der Auslenkung keine Beschleunigung. Für eine stabile Schichtung gilt $N^2 > 0$, hier schwingt das Luftpaket nach der Auslenkung um seine Ausgangslage mit der Frequenz N .

Adiabatischer und pseudoadiabatischer Temperaturgradient

Mit Hilfe der potentiellen Temperatur (2.11) lässt sich der Zusammenhang zwischen dem Tempe-

raturgradienten und der Änderung der potentiellen Temperatur mit der Höhe beschreiben. Nutzt man dazu noch zusätzlich die ideale Gasgleichung und die hydrostatische Approximation, ergibt sich folgende Gleichung:

$$\frac{T}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{g}{c_p}. \quad (2.21)$$

Nimmt man nun die potentielle Temperatur bei einer trocken-adiabatischen Vertikalbewegung als konstant an, ergibt sich für den Temperaturgradienten

$$-\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} \equiv \Gamma_d = 0,0098 \text{ K m}^{-1}. \quad (2.22)$$

Es gilt also:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial T}{\partial z} &< \Gamma_d \text{ trockenstabile Schichtung} \\ -\frac{\partial T}{\partial z} &= \Gamma_d \text{ trockenindifferente oder neutrale Schichtung} \\ -\frac{\partial T}{\partial z} &> \Gamma_d \text{ trockenlabile Schichtung} \end{aligned}$$

Bei der Herleitung des pseudoadiabatischen Temperaturgradienten, also bei Berücksichtigung der Feuchte, verwendet zum Beispiel Holton (2004) eine abgeleitete Form des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik bei Wasserdampfsättigung

$$T ds = 0 = c_p dT - \alpha dp + L_c dq_s = \frac{1}{T} dT - \frac{R}{c_p} d \ln p + \frac{L_c}{c_p T} dq_s \quad (2.23)$$

und berechnet die Änderung mit der Höhe, so folgt

$$\frac{d \ln T}{dz} - \frac{R}{c_p} \frac{d \ln p}{dz} = -\frac{L_c}{c_p T} \frac{dq_s}{dz}. \quad (2.24)$$

Mit Hilfe der hydrostatischen Approximation und der allgemeinen Gasgleichung lässt sich Gleichung (2.24) umschreiben in

$$\frac{dT}{dz} + \frac{g}{c_p} = -\frac{L_c}{c_p} \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial T} \right)_p \frac{dT}{dz} - \left(\frac{\partial q_s}{\partial p} \right)_T \rho g \right]. \quad (2.25)$$

Definiert man nun den pseudoadiabatischen Temperaturgradienten als $\Gamma_s \equiv -dT/dz$, ergibt sich folgende Gleichung

$$\Gamma_s \equiv -\frac{dT}{dz} = \Gamma_d \left[1 + \frac{L_c q_s}{(R_L T)} \right] \left[1 + \frac{\varepsilon L_c^2 q_s}{(c_p R_V T^2)} \right]^{-1}. \quad (2.26)$$

Dabei ist $\varepsilon = R_L/R_V = 0,622$, wobei R_V für die spezifische Gaskonstante für Wasserdampf steht.

Hierbei ist Γ_s der pseudoadiabatische Temperaturgradient, der immer geringer als Γ_d ist. Γ_s nimmt dabei in der unteren Troposphäre typische Werte zwischen $0,4$ und $0,6 \text{ K}(100 \text{ m})^{-1}$ und zwischen $0,6$ und $0,8 \text{ K}(100 \text{ m})^{-1}$ in der mittleren Troposphäre an.

Für eine gesättigte Atmosphäre ergeben sich daraus folgende Schichtungsbedingungen:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial T}{\partial z} < \Gamma_s & \text{ feuchtstabile Schichtung} \\ -\frac{\partial T}{\partial z} = \Gamma_s & \text{ feuchtindifferente Schichtung} \\ -\frac{\partial T}{\partial z} > \Gamma_s & \text{ feuchtlabile Schichtung} \end{aligned}$$

Ob Konvektion ausgelöst werden kann, hängt zunächst von der Schichtung der Luft ab. Herrscht eine stabile Schichtung vor, kehrt ein ausgelenktes Luftpaket wieder zurück zu seiner Ursprungslage und schwingt um diese mit der Frequenz N . Somit kann bei dieser Schichtung keine Konvektion initiiert werden. Wird bei einer labilen Schichtung ein Luftpaket nach oben ausgelenkt, ist es wärmer und leichter als die neue Umgebung und das Luftpaket erfährt einen positiven Auftrieb. Diese Schichtung kommt allerdings nur selten vor, hauptsächlich in den unteren Schichten der Troposphäre, wenn sich im Sommer eine überadiabatische Schichtung am Boden ausbildet. Diese Schichtung ist nicht stabil und führt zur vertikalen Umwälzung.

Liegt der Temperaturgradient der Atmosphäre jedoch zwischen dem pseudoadiabatischen und dem trockenadiabatischen Temperaturgradienten, also $\Gamma_s < \Gamma < \Gamma_d$, ist die Atmosphäre bedingt-labil geschichtet. Je nach Feuchtigkeitsgehalt des Luftpaketes folgt es beim Aufsteigen der Sättigungs-Adiabaten oder der Trocken-Adiabaten. Beinhaltet das Luftpaket feuchte Luft und kommt es bei der Auslenkung zur Kondensation, dann verhält sich das Luftpaket labil, handelt es sich jedoch um trockene Luft, ist die Atmosphäre stabil oder neutral geschichtet.

Kondensationsniveaus und Auslösung von hochreichender Konvektion:

Während eines typischen Strahlungstags ohne Bewölkung ist die Ausgangssituation in den frühen Morgenstunden eine stabile bodennahe Inversionsschicht, die durch die nächtliche langwellige Ausstrahlung entstanden ist. Nach Sonnenaufgang wird der Erdboden und die darüberliegenden Luftschichten erwärmt und im Laufe des Tages entsteht eine adiabatische oder auch überadiabatische Schichtung der Luft. Einzelne Luftpakete steigen auf und transportieren die Wärme in höhere Schichten, bis sich ein Temperaturgleichgewicht zwischen ihnen und der Umgebungsluft einstellt. Es findet eine turbulente Durchmischung statt. Durch den vertikalen Wärmetransport nach oben dehnt sich die adiabatische Schichtung vom Boden ausgehend bis in höhere Schichten aus. Tritt schließlich Kondensation ein, ist das Kumuluskondensationsniveau (KKN) erreicht. Herrscht oberhalb davon eine bedingt labile Schichtung, erfahren aufsteigende Luftpakete nach Gleichung (2.5) eine weitere positive Beschleunigung, bis die Temperatur des Luftpaketes wieder der Umgebungstemperatur entspricht, die Wolkenobergrenze ist erreicht. Diese Höhe wird auch als Niveau des neutralen Auftriebs (NNA) bezeichnet.

Findet eine erzwungene Hebung eines Luftpaketes aufgrund äußerer Kräfte, wie beispielsweise

durch das Überströmen eines Gebirges, statt, wird es zunächst trockenadiabatisch vom Boden aus gehoben. Kommt es dabei zur Kondensation, ist das Hebungskondensationsniveau (HKN) erreicht. Das HKN gibt somit die Untergrenze der Wolken bei erzwungener Hebung an. Wird das Luftpaket vom HKN aus soweit gehoben, bis seine Temperatur über der Temperatur der Umgebung liegt, kommt es zum aktiven Aufsteigen. Der Punkt, an dem dies eintritt, heißt Niveau der freien Konvektion (NFK). Ab dem NFK erfährt das Luftpaket bis zum NNA einen positiven Auftrieb. Man spricht von einer latenten Instabilität. Somit ist eine bedingt oder latent labile Schichtung eine notwendige Bedingung für die Auslösung hochreichender Konvektion.

Nach Johns und Doswell III (1992) gelten hohe Luftfeuchtigkeit in den unteren Atmosphärenschichten, latente Labilität und ein Hebungsmechanismus als Grundvoraussetzungen für die Entstehung von Gewittern. Unter Hebungsmechanismen werden neben thermischen Auftrieb oder erzwungener Hebung auch Querkirkulationen an einer Front, Sekundärzirkulationen durch horizontal unterschiedliche Erwärmung, mesoskalig bedingte Hebung durch Böenfronten von schon vorhandenen Gewittern oder auch Konvergenzlinien verstanden. Um großräumige Vertikalbewegungen zu identifizieren, kann die Omegagleichung

$$\left(\sigma \nabla^2 + f_0^2 \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right) \omega = -f_0 \frac{\partial}{\partial p} [-\vec{v}_g \cdot \nabla_p (\zeta_g + f)] - \frac{R}{p} \nabla^2 [-\vec{v}_g \cdot \nabla_p T] - \frac{R}{c_p p} \nabla^2 H \quad (2.27)$$

mit dem Stabilitätsparameter σ , dem Coriolisparameter f , der Vertikalwindgeschwindigkeit im p -System ω , dem geostrophischen Wind \vec{v}_g , der geostrophischen relativen Vorticity ζ_g , dem Coriolisparameter f_0 in der geografischen Breite ϕ_0 und der diabatischen Wärmezufuhr H verwendet werden. Die Omegagleichung wird dabei im p -System aus der Wärme- und Vorticityänderung hergeleitet, indem beide über die Vertikalbewegung verknüpft werden. Sie stellt damit eine Beziehung zwischen der vertikalen Änderung der geostrophischen Vorticityadvektion, der geostrophischen Temperaturadvektion, der diabatischen Wärmezufuhr und dem Vertikalwind im p -System her. Hebung ($\omega < 0$) ist dann zu erwarten, wenn ein oder mehrere der folgenden Effekte in diesem Bereich dominieren: Zunahme positiver Vorticityadvektion mit der Höhe, relativ stärkste Warmluftadvektion oder relativ größte diabatische Wärmezufuhr (Kurz, 1990). Diese Bedingungen finden sich in der Regel vorderseitig (stomab) insbesondere an kurzwelligen Trögen. Ein solches Modell wird beispielsweise durch die „spanish plums“ von Morris (1986) als Voraussetzung für schwere Gewitterstürme beschrieben.

Welches Gewittersystem letztendlich entsteht, ist abhängig von den beteiligten Hebungsmechanismen und den vorherrschenden Windscherungen. Dabei sind die Übergänge zwischen den einzelnen Systemen fließend, jedes Gewitter besitzt zudem seine eigene Dynamik.

2.2 Gewittersysteme

In der Meteorologie werden Gewitter nach ihrer Dynamik und räumlichen Ausdehnung in fünf verschiedene Systeme unterteilt. Die Gewittersysteme unterscheiden sich dabei in ihrer Charakteristika wie ihrer Lebensdauer, ihrem durchschnittlichen Durchmesser, den Lebenszyklen und Schadenpotentialen (Tabelle 2.1). Für ihre Entstehung benötigen sie eine große Menge an Ener-

gie, die hauptsächlich durch frei werdende latente Wärme infolge der Kondensation von Wasserdampf bereit gestellt wird. Dabei wird die latente Energie in potentielle und schließlich in kinetische Energie transformiert. Die nachfolgende Beschreibung der Zellsysteme erfolgt nach vereinfachten Schemata.

Tabelle 2.1: Organisationsformen und Charakteristika der verschiedenen Gewittersystemen nach Kunz et al. (2007)

	mittlere Lebensdauer	mittlere horizontale Ausdehnung	Gefahrenpotential
Einzelzelle	30 min	2 bis 10 km	gering
Multizelle	mehrere Stunden	bis 50 km	hoch
Gewitterlinie	bis zu 24 h	~400 km	hoch
Mesoskaliges konvektives System	bis zu 24 h	100 km	mittel – hoch
Superzelle	mehrere Stunden	bis 50 km	sehr hoch

2.2.1 Einzelzelle

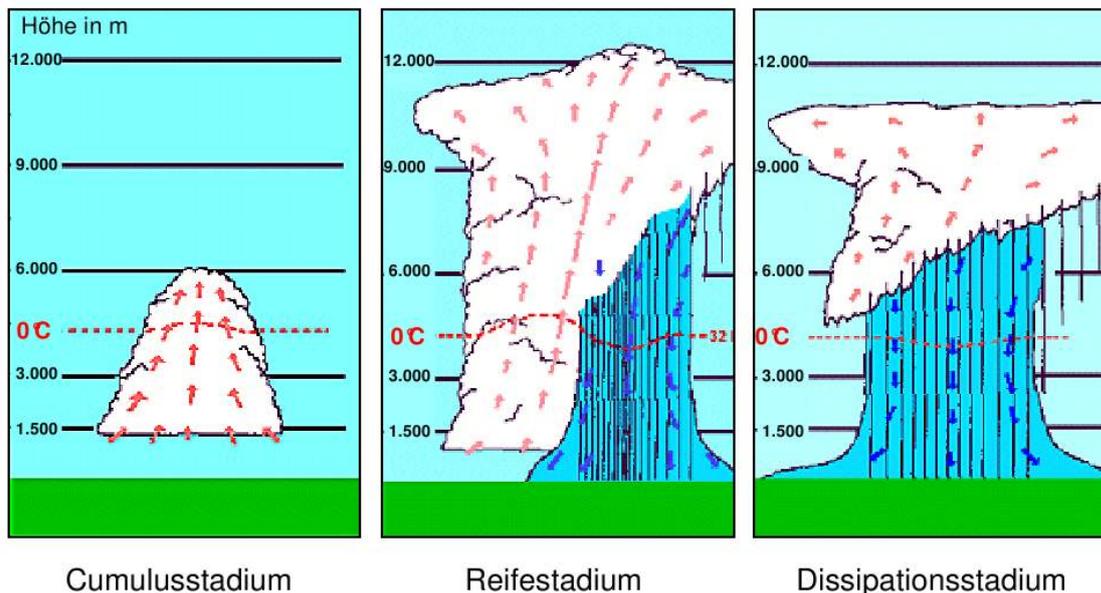


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der drei Entwicklungsstadien einer Einzelzelle nach Kunz et al. (2007).

Das häufigste Gewittersystem der mittleren Breiten ist die Einzelzelle (engl. single cell storm). Sie entsteht häufig an sommerlichen Strahlungstagen in den frühen Nachmittagsstunden bei geringen Windgeschwindigkeiten und geringer vertikaler Windscherung. Die überadiabatische Erwärmung

des Bodens und der untersten Luftschicht sowie deren Labilisierung bilden in der Regel den primären Hebungsmechanismus. Mit dem darauffolgenden Aufsteigen der Luftpakete wird das erste Entwicklungsstadium, das Cumulusstadium, erreicht (Abbildung 2.1). Es bilden sich zunächst Cumulus Congestus, die sich im weiteren Verlauf im Bereich des starken Aufwinds ab dem KKN oder NFK zu einem Cumulonimbus entwickeln. Durch den Aufwind werden die Wolkentröpfchen in die Höhe transportiert, aus denen sich bei hinreichend niedrigen Temperaturen Eispartikel bilden. Durch Deposition von Wasserdampf (Bergeron–Findeisen Prozess) und Koagulation von Wassertropfen (Akkreszenz und Autokonversion) bildet sich Graupel, mitunter auch kleiner Hagel (siehe Kap. 2.3). Fallen die Eisteilchen als Niederschlag zu Boden, ist das Reifestadium erreicht. In den meisten Fällen schmelzen die Eispartikel auf dem Weg zum Boden, mitunter können diese aber den Boden erreichen. Während des Reifestadiums trifft die aufsteigende Luft an die Tropopause und wird gezwungen, zur Seite auszuweichen. Es bildet sich ein Amboss, der aus Eiskristallen besteht. Der einsetzende Abwind wird durch den Luftwiderstand der fallenden Niederschlagspartikel verursacht. Verstärkt wird dieser Effekt durch ein teilweises Verdunsten der Niederschlagspartikel, verursacht durch das Einmischen seitlich einströmender trockener Luft. Es kommt hierbei zu einer Abkühlung der Luft und nach Gleichung (2.5) zu einer Verstärkung des Abwindes. Dessen Stärke nimmt immer mehr zu und wirkt dem Aufwind mehr und mehr entgegen, bis dieser und damit auch die Energiezufuhr der Zelle schließlich im Dissipationsstadium vollständig unterdrückt wird. Zu Beginn dieses Stadiums ist der Niederschlag am stärksten und es kann Starkniederschlag und Graupel, selten auch Hagel auftreten. Die Gewitterzelle ist allerdings von ihrer Energiequelle, der feucht-warmen Luft, abgeschnitten, so dass eine Weiterentwicklung nicht mehr möglich ist. Der Niederschlag wird schwächer, die Gewitterwolke zerfällt.

2.2.2 Multizelle

Multizellen sind ein Komplex aus mehreren Einzelzellen, die dynamisch miteinander gekoppelt sind. Dabei durchlaufen die einzelnen Gewitterzellen den gleichen Lebenszyklus wie Einzelzellen, können aber durch das rückseitige Ausströmen von Kaltluft einer Zelle im Reifestadium neue Zellen generieren. Dies ist schematisch in Abbildung 2.2 für eine Multizelle mit Zugrichtung von südwest nach nordost skizziert. Die Kaltluft (blau) der Böenfront schiebt sich dabei unter die vorgelagerte Warmluft (rot) und führt zu deren Aufsteigen. Bevorzugt bilden sich solche Multizellen bei großer vertikaler Geschwindigkeitsscherung ohne Richtungsscherung und labil geschichteten Luftmassen. Die vertikale Windscherung ermöglicht die Entstehung einer starken Böenfront und eine räumliche Trennung von Auf- und Abwind, so dass Multizellen im Lauf ihrer Entwicklung nicht wie Einzelzellen von der Energiezufuhr abgeschnitten werden. Durch diesen Mechanismus kann eine Multizelle über mehrere Stunden bestehen. Im Mittel bewegen sich solche Komplexe in einer bis 30° abweichenden Richtung gegenüber der Windrichtung in mittleren Höhen. Multizellen können mit Starkniederschlägen und Hagel einhergehen und haben ein mittleres Schadenpotential. Ziehen solche Komplexe sehr langsam oder bleiben stationär, können sie auch Überflutungen und Murengänge auslösen.

Hagel kann bei solchen Komplexen einen Durchmesser von über 2 cm erreichen. Durch die lange

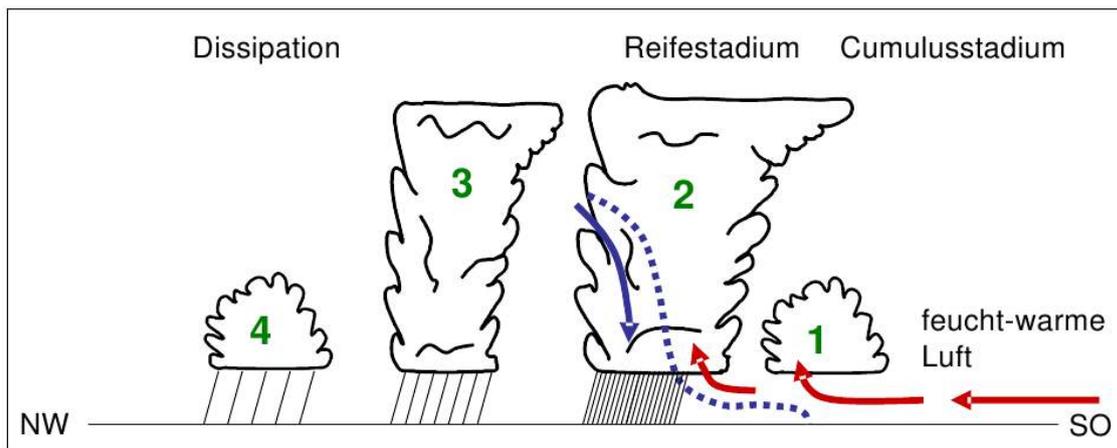


Abb. 2.2: Schematische Darstellung der Entwicklungsstadien einer Multizelle mit Zugrichtung von südwest nach nordost. Die Zahlen geben die einzelnen Stadien an, 1: Cumulusstadium, 2: Reifestadium, 3: Übergang vom Reife- ins Dissipationsstadium und 4: Dissipationsstadium. Die roten Pfeile stellen das Einströmen feucht-warmer Luft dar, der blaue Pfeil das Ausströmen von Kaltluft. Blau gestrichelt ist die Böenfront am Boden (Kunz et al., 2007).

Zugbahn des Komplexes können auch lange Hagelzüge entstehen.

2.2.3 Superzelle

Im Gegensatz zu Multizellen entstehen bei einer Superzelle nicht ständig neue einzelne Gewitterzellen, sondern der gesamte Komplex regeneriert sich kontinuierlich. Möglich macht dies das permanente Einströmen von feucht-warmer Luft in den Aufwindbereich der Zelle. Dort herrschen vertikale Windgeschwindigkeiten von über 50 m s^{-1} (Höller und Meischner, 1993). Die Superzelle ist somit eine einzige große Zelle mit einer horizontalen Ausdehnung bis 50 km und einer vertikalen Erstreckung bis an den unteren Rand der Tropopause. Sie kann durch ihre Rotation über mehrere Stunden existieren und ist mit Extremereignissen wie Sturmböen, Starkniederschlägen, Hagel und teilweise auch Tornados verbunden (Weisman und Klemp, 1986).

Voraussetzung für die Bildung einer Superzelle ist in der Regel ein großräumiger Hebungsantrieb: Bei divergenter Höhenströmung vorderseitig eines Trogs, durch den feucht-warme Luft am Boden und trockene, kalte Luft in der Höhe advehiert wird. Ein Low Level Jet begünstigt zusätzlich den Transport feucht-warmer Luftmassen in den Aufwind der Zelle (Houze, 1993). Weiterhin wird eine starke vertikale Windscherung, vor allem eine Richtungsscherung, benötigt. Diese führt zur Rotation des Aufwindes und der gesamten Zelle. Damit die hochreichende Konvektion erst am Nachmittag, dem Zeitpunkt mit der maximalen Energiezufuhr, erfolgt, ist eine starke Temperaturinversion von Vorteil. Eine Quercirkulation an der Front eines kräftigen Bodentiefs kann zudem die Auslösung hochreichender Konvektion begünstigen. Beide Bedingungen sind auch für die Bildung von Multizellen nötig. Der Unterschied ist hier, dass durch die synoptische Wetterlage die Windscherung und der großräumige Hebungsantrieb stärker ausgeprägt sein müssen.

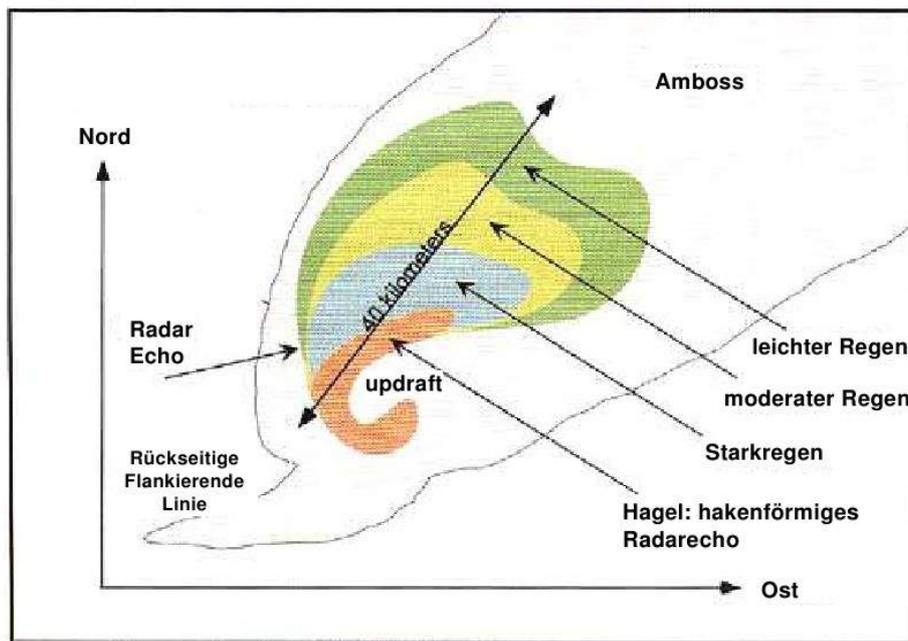


Abb. 2.4: Schematischer Horizontalschnitt durch eine Superzelle mit den verschiedenen Niederschlagsgebieten (farbig markiert) nach Rauber et al. (2008).

RFD) und eine weitere Böenfront in Bodennähe. Laufen die beiden Böenfronten aufeinander zu, so dass der rückseitige Abwind den Aufwindbereich mehr und mehr umschließt, wird die Zufuhr von feucht-warmer Luft eingeschränkt. Durch die darauf folgende starke Streckung der Luftsäule durch Konvergenz im Aufwindbereich verstärkt sich die Rotation des Aufwindeschlauchs erheblich. Durch die Zunahme der Vorticity kann sich zu diesem Zeitpunkt ein Tornado entwickeln. Wird die Zufuhr der feucht-warmen Luft endgültig unterbunden, kommt es zum Zerfall der Zelle. Es kann sich jedoch südöstlich des ursprünglichen ein neuer Aufwindbereich bilden und die Entwicklung einer neuen Zelle auslösen.

2.2.4 Mesoskalige Konvektive Systeme

Die Gewitterkomplexe mit der größten räumlichen Ausdehnung werden als Mesoskalige Konvektive Systeme (engl. Mesoscale Convective System, MCS) bezeichnet. Sie entstehen bei großräumiger Hebung an Fronten oder durch einen Höhentrog in einer labilen Umgebung und können eine erhebliche Lebensdauer aufweisen. Besonders große MCS werden nach Maddox (1980) als mesoskaliger konvektiver Komplex (engl. Mesoscale Convective Complex, MCC) bezeichnet.

Gewitterlinien

Die horizontale Ausdehnung des konvektiven Gebiets von Gewitterlinien beträgt nur wenige 10 km. In der Regel folgt ein großräumiges Gebiet mit stratiformen Niederschlägen nach. Die Lebensdauer erreicht mehrere Stunden bis hin zu einem Tag. Für die Entstehung ist eine großräu-

mige linienhafte Hebung und eine Luftmassengrenze, z. B. im Bereich einer Kaltfront, Voraussetzung. Dabei schiebt sich die kalte unter die feucht-warme Luft und hebt diese an (Abbildung 2.5). Am oberen Rand der Troposphäre bildet sich ein gut ausgeprägter Amboss aus, der sich durch die vorherrschende Windscherung weit in Strömungsrichtung, hier Richtung Osten, ausdehnt. Beim Aufwind (rot) kann es zudem durch die Trägheit der aufsteigenden Luftmassen zu einem hinein stoßen in die Topopause kommen. Rückseitig fließt wie bei Multi- und Superzellen kalte trockene Luft (engl. rear inflow jet) mit hoher Geschwindigkeit in das System ein. Der fallende Niederschlag induziert einen starken Abwind, der am Boden eine Böenfront bildet, die sich unter die Warmluft schiebt und somit die vorderseitige Hebung der feucht-warmen Luft und die Konvektion aufrecht erhält. Wie auch bei Multizellen und Superzellen sind der Ab- und der Aufwind durch die Windscherung voneinander getrennt, so dass sich Gewitterlinien selbst am Leben erhalten. Bei Gewitterlinien können starke Sturmböen bis hin zu Orkanböen mit über 150 km h^{-1} (Rauber et al., 2008) sowie großer Hagel auftreten.

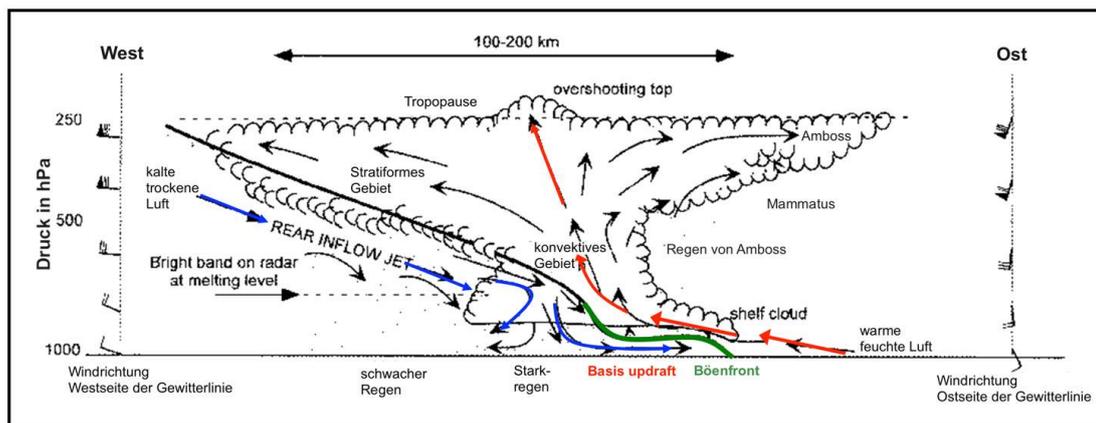


Abb. 2.5: Schematische Darstellung einer Gewitterlinie nach Rauber et al. (2008). Details im Text.

Mesoskalige konvektive Systeme

Mesoskalige konvektive Systeme (MCS) sind große vor allem stratiforme Niederschlagsgebiete, in denen einzelne konvektive Zellen eingelagert sind. Typischerweise bilden sich MCS im Warmsektor eines Tief vorderseitig eines Trogs. Durch die positive, mit der Höhe zunehmende Vorticityadvektion und Warmluftadvektion kommt es gemäß der Omegagleichung (Gleichung 2.27) zu großräumiger Hebung. Zuerst entstehen einzelne isolierte Gewitterzellen, die mehr und mehr miteinander verschmelzen und letztendlich ein großes zusammenhängendes Niederschlagsgebiet mit starkem Niederschlag in den konvektiven Zellen und moderatem Niederschlag im stratiformen Bereich zwischen den Zellen formen (siehe Abbildung 2.6). Es bilden sich immer wieder neue konvektive Zellen, wobei aus den zerfallenden Zellen ein noch größeres stratiformes Niederschlagsgebiet entsteht. Die einzelnen Gewitterzellen durchlaufen dabei die einzelnen Stadien

einer Einzelzelle (s.o.). Schließlich bilden sich keine neuen konvektiven Zellen mehr und die aktiven Zellen durchlaufen ihren Lebenszyklus und schwächen sich ab, bis nur noch ein stratiformes Niederschlagsgebiet übrig bleibt. Durch hohe Regenmengen können Überschwemmungen hervorgerufen werden, aber auch Extremereignisse wie schwere Sturmböen am Boden und großer Hagel über große Flächen.

Damit solch ein MCS als MCC eingestuft wird, müssen nach Maddox (1980) folgende Bedingungen gegeben sein: genereller Wolkenschirm mit kontinuierlicher Infrarot-Temperatur geringer als -32°C über einer Fläche von mindestens 100.000 km^2 und, eingelagert, eine 50.000 km^2 große kalte Wolkenregion mit Temperaturen $< -52^{\circ}\text{C}$. Diese Bedingungen müssen mindestens 6 Stunden vorliegen.

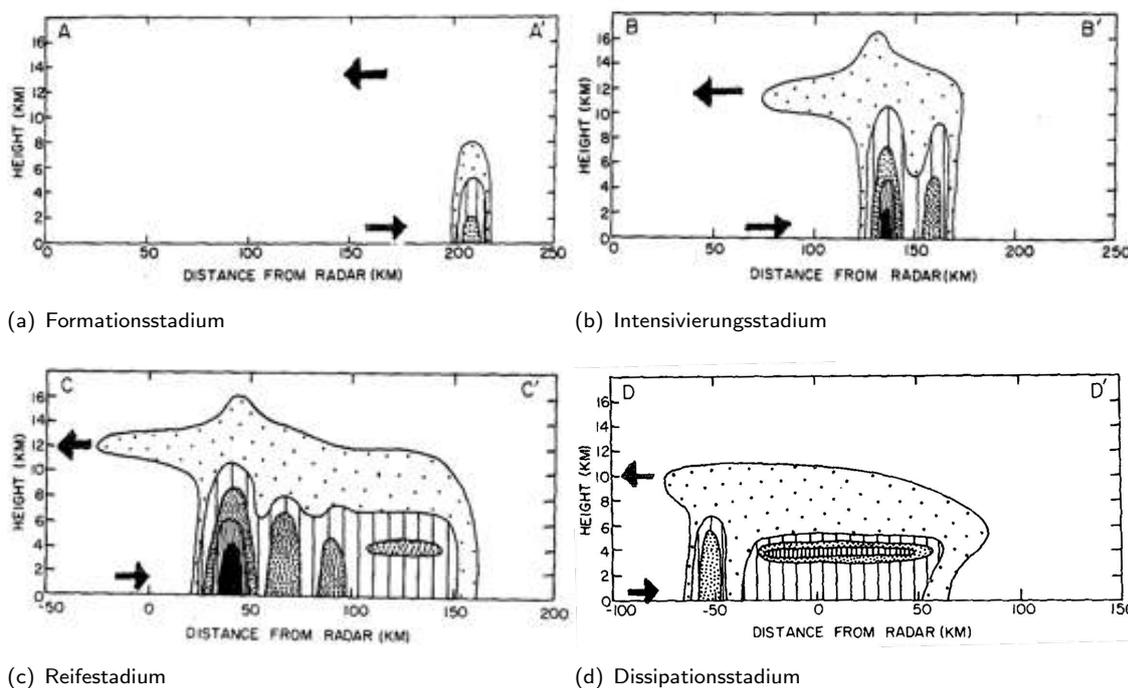


Abb. 2.6: Typischer Lebenszyklus eines mesoskaligen konvektiven Systems nach Radarmessungen von Leary und Houze (1979).

2.3 Entstehung von Hagel

Hagel ist als fester Niederschlag in Form von großen Eispartikeln oder Eiskugeln mit einem Durchmesser von mehr als 5 mm definiert (WMO, 1956). Die Dichte der Hagelkörner von etwa $\rho = 0,8\text{ g cm}^{-3}$ ist durch eingeschlossene Luft in kleinen Hohlräumen etwas geringer gegenüber reinem Eis mit einer Dichte von $0,9\text{ g cm}^{-3}$. Ist die Größe des Eispartikels kleiner als 5 mm spricht man von Graupel. Dabei unterscheidet sich Graupel von Hagel einerseits durch die geringere Dichte, die zwischen $0,3$ und $0,8\text{ g cm}^{-3}$ liegt (Pruppacher und Klett, 1997), andererseits durch die unterschiedlichen Wachstumsprozesse.

In einer Gewitterwolke laufen viele mikrophysikalischen Prozesse parallel ab. Einen groben Über-

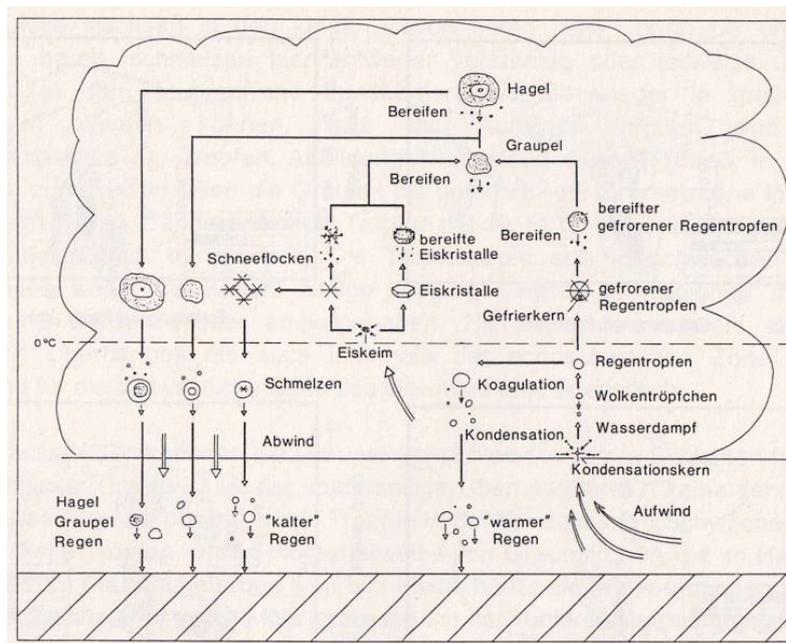


Abb. 2.7: Schematische Abbildung der mikrophysikalischen Prozesse in einer Gewitterwolke nach Höller und Meischner (1993).

blick darüber skizziert Abbildung 2.7 mit einer stark vereinfachten Darstellung der Entstehung von Regen, Graupel, Hagel und Schnee. Für das Wachstum von kleinen Eispartikeln zu großen Hagelkörnern sind mehrere Schritte und verschiedene Voraussetzungen nötig. Grundvoraussetzung ist das Vorhandensein von Eispartikeln in der Wolke, auch Hagelembryos genannt, und eine ausreichend hohe Konzentration unterkühlter Wolkentröpfchen.

Grundsätzlich lässt sich die mikrophysikalische Hagelbildung in zwei Schritte unterteilen – die Entstehung eines Hagelembryos und das Wachstum zum Hagelkorn, bis es zu Boden fällt.

Hagelembryos (Abbildung 2.8) sind wenige Millimeter große Eispartikel in Form von gefrorenen Tropfen, Eiskristallen oder Graupelkörnern. Damit sich solch ein Hagelembryo bilden kann, werden zunächst durch Nukleation die beweglichen Wassermoleküle des Flüssigwassers in die geordnete Struktur eines Kristallgitters transformiert. Bei der heterogenen Nukleation gefrieren die Wassertröpfchen an geeigneten Eiskeimen. Die Eiskeime sind organische oder anorganische Aerosole oder auch Eiskristalle selbst.

Von einer homogenen Nukleation spricht man, wenn bei der Kristallbildung kein Eiskeim, also keine fremde Substanz, beteiligt ist. Hier bildet sich das Eiskristall aus reinem Wasserdampf oder reinem Wasser bei sehr niedrigen Temperaturen von $< -35^{\circ}\text{C}$. Die Wassermoleküle kühlen dabei soweit ab, dass sich kristallartige Eisstrukturen bilden. Daran lagern sich nun weitere Wassermoleküle an und das Eiskristall wächst heran. Da für diesen Prozess sehr niedrige Temperaturen eine Voraussetzung sind, spielt die homogene Nukleation zur Bildung von Eiskristalle in der Troposphäre allerdings nur eine untergeordnete Rolle.

Die verschiedenen Eiskeime werden bei unterschiedlichen Temperaturen unterhalb des Gefrier-

punktes aktiv, so dass mit abnehmender Temperatur mehr und mehr Eispartikel gebildet werden können. Nach Pruppacher und Klett (1997) reichen die Aktivierungstemperaturen von anorganischen Eiskeimen von -3°C bei Silberiodid bis -15°C bei Tonmineralien. Bei organischen Eiskeimen liegt sie sogar schon bei -2°C (Rogers, 1979). Wasserdampf kann sich direkt an einen Gefrierkern oder Eiskristall niederschlagen und dort eine Eisschicht bilden, ohne vorher in die flüssige Phase überzugehen. Dieser Vorgang wird als Deposition des Wasserdampfes (engl. deposition freezing) bezeichnet. Ein weiterer Weg zur Entstehung von Eiskristallen ist das Gefrieren eines unterkühlten Tropfens bei mechanischem Kontakt mit einem Gefrierkern (engl. contact nucleation): Wird der unterkühlte Wassertropfen durch den Gefrierkern berührt, gefriert er instantan. Die dritte Möglichkeit ist der Umweg über einen unterkühlten Tropfen. Dabei bildet sich zuerst ein Wassertropfen an einem Kondensationskeim. Sinkt die Temperatur danach unter den Gefrierpunkt, wirkt der Kondensationskeim als Gefrierkeim und der unterkühlte Tropfen gefriert (engl. immersion freezing). Bei der heterogenen Nukleation gilt, je ähnlicher die Kristallstruktur des Gefrierkerns dem des Eises ist, umso geringer ist die Oberflächenenergie und umso besser wirkt der Eiskeim schon bei wenigen Grad unterhalb des Gefrierpunktes.

Nach der Entstehung der Eisteilchen oder Eiskristalle erfolgt das Anwachsen zu einem Hagelembyo und schließlich zum Hagel selbst. Zum einen geschieht dies bei Eisübersättigung durch weitere Deposition von Wasserdampf, zum anderen durch Kollision mit anderen Eiskristallen, die zu Verhaken oder Anfrieren (Aggregation) führen. Der wichtigste Wachstumsmechanismus aber ist das Aufeinandertreffen der Eisteilchen mit unterkühltem flüssigem Wasser und anschließendem spontanen Gefrieren. Dieser Vorgang wird als Bereifung, die Anlagerung selbst als Akkreszenz bezeichnet. Am schnellsten wächst der Eiskristall im Temperaturbereich zwischen 0°C und -5°C zum Hagelembyo heran (Houze, 1993).



Abb. 2.8: Entstehungsstufen eines Hagelembyos von einem bereiften Schneekristall bis zum Graupelkorn (links) und Querschnitt eines Hagelkorns (rechts) mit den deutlich sichtbaren Ringen (www.hagelforschung.de).

Beim Querschnitt durch ein Hagelkorn (Abbildung 2.8, rechts) zeigt sich der typisch geschichtete Aufbau. Es wechseln sich klare und undurchsichtige Schichten ab. Dies lässt sich durch zwei unterschiedliche Wachstumsregime, das feuchte und trockene Wachstum, erklären. Auf welche Art

das Hagelkorn wächst, ist vom Flüssigwassergehalt der Luft und der Temperatur seiner Umgebung abhängig (Lesins und List, 1986). Befindet sich das Hagelkorn in einer Umgebung mit sehr vielen unterkühlten Wolkentröpfchen und einer relativ warmen Umgebung ($> -25^{\circ}\text{C}$), dominiert das feuchte Wachstum. Durch das Anfrieren von Flüssigwasser an das Hagelkorn wird Schmelzwärme freigesetzt, die ausreicht, um die Oberfläche auf eine Temperatur von 0°C zu bringen. Dabei entsteht auf der Oberfläche des Hagelkorns eine Flüssigwasserschicht. Dieses Flüssigwasser kann in die Poren des Hagelkorns eindringen und dort gefrieren. Dabei bildet sich eine glasklare Schicht. Gelangt das Hagelkorn in Gebiete mit niedrigeren Temperaturen und/ oder einer geringen Dichte an unterkühlten bzw. gefrorenen Wassertropfen, erfolgt das trockene Wachstum. Hier wird beim Anfrieren der Wassertropfen nicht genügend Wärme zum Anschmelzen der äußersten Hagelschicht freigesetzt. Es folgt ein sofortiges Anfrieren mit kleineren Lufteinschlüssen. Die Schicht erscheint milchig, fast undurchsichtig. Ein Hagelkorn erfährt häufig je nach Wachstumsregion beide Wachstumsphasen, so dass ein schalenförmige Aufbau erfolgt. Der Grenzbereich zwischen feuchtem und trockenem Wachstum wird als Schumann-Ludlum Limit (LLM) bezeichnet (Schuma, 1938; Ludlam, 1950, 1958).

Damit sich aus einem Hagelembryo ein Hagelkorn entwickeln kann, muss das Hagelembryo in den Aufwindbereich der Gewitterzelle gelangen. Je nach Gewittertyp unterscheiden sich hierbei die makrophysikalische Prozesse zur Hagelbildung. Am Rand des Aufwindstroms angekommen, befindet sich das Hagelembryo in einem Bereich mit sehr vielen unterkühlten Wolkentröpfchen. Dort kann das Hagelembryo durch Bereifung vor allem bei Temperaturen zwischen -10°C und -20°C schnell an Größe gewinnen (Grenier et al., 1983). Um weiterhin vom Aufwind getragen werden zu können, muss das Hagelkorn vom Rand des Aufwindbereichs ins Innere des Aufwinds mit stärkeren Aufwinden gelangen. Dies geschieht nach Smith (2004) gewöhnlich über einen geeigneten Aufwind.

Makrophysikalische Bildung von Hagel in Gewittersystemen

Über die Entstehung von Hagel in Einzelzellen gibt es verschiedene Theorien. Nach Höller und Meischner (1993) bildet sich zunächst ein Hagelembryo, das im Aufwind in der Schwebelage gehalten wird und durch Akkreszenz so lange weiter wächst, bis es vom Aufwind nicht mehr getragen werden kann oder der Aufwindstrom abbricht. Der zweiten Theorie nach bildet sich das Hagelembryo im oberen Bereich der Wolke und fällt seitlich am Rand Richtung Boden. Dabei wird es im unteren Teil der Wolke vom Aufwind erfasst und kann so zu einem Hagelkorn wachsen. Bei einer Einzelzelle ist die Wachstumsphase aufgrund der geringen Lebensdauer im Schnitt auf 10 bis 15 min begrenzt. Daher liegt hier die Korngröße in der Regel unter 1,5 cm. Bei hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit schmelzen kleinere Hagelkörner jedoch häufig, bevor sie den Boden erreichen (Pruppacher und Klett, 1997).

In einer Multizelle entsteht Hagel bis zu einer Größe von 1,5 cm durch den gleichen Prozess wie bei einer Einzelzelle. Die größeren Hagelkörner bilden sich, indem die Eispartikel durch entsprechende Strömungsverhältnisse von der jüngeren Zelle in die ältere Zelle transportiert werden (Abbildung 2.9).

Bei Superzellen kann Hagel die größte Korngröße von über 4 cm erreichen. Das Modell zur Ha-

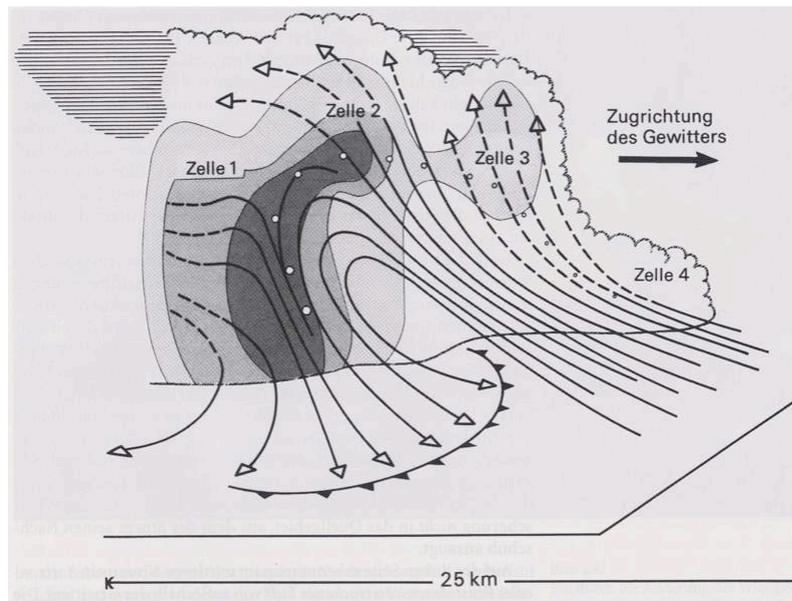


Abb. 2.9: Schemazeichnung der Hagelbildung in einer Multizelle nach Browning und Foote (1976). Die unterschiedliche Schraffierung zeigt die Radarreflektivität an, je dunkler, umso höher.

gelbildung in Superzellengewittern nach Browning und Foote (1976) geht davon aus, dass das entscheidende Kriterium zu Bildung von großem Hagel der Eintritt des Hagelembryos in den Randbereich des starken Aufwindbereichs ist. Hier wird das Hagelembryo zunächst an der rechten Flanke des Sturms mit der starken umgebenden Luftströmung um den Aufwindstrom herum geführt. Kommt das Hagelembryo dann doch in den Hauptaufwindbereich, findet es eine hohe Anzahl an unterkühlten Wolkentröpfchen und eine geringe Anzahl von größeren Niederschlagspartikeln vor. Damit kann das Hagelembryo schnell wachsen und eine große Korngröße erreichen. Sind jedoch die Hagelembryos zu leicht oder der Aufwindstrom zu stark, werden sie zu schnell in den oberen Bereich des Aufwinds transportiert, so dass ihre Größe klein bleibt. Hierdurch kommt es bei Superzellen zu der charakteristischen zeitlichen Abfolge der Niederschlagsarten wie anhand der Abbildung 2.4 beschrieben.

2.4 Schadenwirkung von Hagel auf Gebäude

Die Art und Stärke der Schäden durch Hagel sind von verschiedenen Faktoren abhängig. Zum einen kann sich das Schadenbild durch die Anzahl der fallenden Hagelkörner unterscheiden, zum anderen spielen dabei die Größe und damit die Fallgeschwindigkeit der Hagelkörner eine wichtige Rolle. Die Größe des Hagels hängt von der Zeit ab, die einem Hagelkorn für das Wachstum zur Verfügung steht. Diese ist, wie im Kapitel 2.2 beschrieben, mit dem Gewittertyp verbunden. Auch die Fallgeschwindigkeit ist sehr unterschiedlich, da die Endfallgeschwindigkeit auch durch Fallwinde verstärkt werden kann. Außerdem spielt die Form und die Oberflächenstruktur des Hagelkorns über den Reibungswiderstand eine wichtige Rolle. Um solche Fallgeschwindigkeiten

zu berechnen, wurden verschiedenen empirische Ansätze formuliert. So berechnen Matson und Huggins (1980) beispielsweise die Endfallgeschwindigkeit am Boden ,

$$v = \left(\frac{2m \cdot g}{\rho_a A C_d} \right)^{0,5} \quad \text{in } [m s^{-1}] \quad (2.28)$$

aus dem Querschnitt A und dem Widerstandsbeiwert C_d des Hagelkorns, der unter anderem vom Bereifungsgrad abhängt. Für die Berechnung benötigt man außerdem die Masse m des Hagelkorns und die Luftdichte ρ_a . Eine einfachere Approximation der Fallgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Durchmesser D (in cm) wurde von Pruppacher und Klett (1997) aufgestellt. Unter Annahme eines Luftdrucks von $p = 800$ hPa und einer Temperatur von $\vartheta = 0^\circ$ C ergibt sich

$$v \approx 9 D^{0,8} \quad \text{in } [m s^{-1}]. \quad (2.29)$$

Für Hagelkörner ergeben sich somit Endfallgeschwindigkeiten zwischen 5 und über $50 m s^{-1}$, die in Abbildung 2.10 für verschiedene Durchmesser aufgetragen sind.

Durch die kinetische Energie, die ein fallendes Hagelkorn aufweist, können an Gebäuden starke Schäden entstehen. Die Vulnerabilität der Gebäude, also ihre potentielle Schadenanfälligkeit, weist jedoch eine große Spannweite auf. Sie ist abhängig vom Typ und der Art der Gebäudehülle. Neue Gebäude mit Wintergärten und modernen Baumaterialien sind dabei deutlich anfälliger als traditionelle Wohngebäude (Stucki und Egli, 2007). So weisen Dächer aus Blech eine höhere Vulnerabilität auf als Ziegeldächer. Mit den größten Anteil an den gesamten Schäden haben dabei Rollläden und Dächer. Allgemein kann gesagt werden, dass Schäden an Gebäuden ab einer Hagelkorngröße von rund 2 cm entstehen können. In Tabelle 2.2 ist eine häufig verwendete Hagelschadenklassifizierung nach der ANELFA-Skala (Association National d'Etude et de Lutte contra les Fléaux Atmosphériques) von Dessens et al. (2007) dargestellt. Sie orientiert sich, wie die Fujita-Skala bei Tornados, an den entstandenen Schäden bei der Einordnung der Hagelgröße in verschiedene Klassen (Fujita, 1973). So treten ab Hagelkorngrößen von 1 cm bereits Schäden an Wein und Obst auf. Verletzungen an ungeschützten Personen treten dagegen ab einem Durchmesser von etwa 4 cm auf, die ab 5 cm bei Säuglingen sogar zum Tod führen können.

2.5 Radarmeteorologie

Der Begriff RADAR steht als Abkürzung für „Radio Detecting and Ranging“ (dt. Erkennung und Entfernungsbestimmung mit Radiowellen). Das Ziel einer Radarmessung besteht darin, über die rückgestreute elektromagnetische Strahlung Informationen über den Ort und die Intensität der Streuer zu gewinnen. In der Atmosphäre sind die Streuer vor allem die unterschiedlichen Niederschlagsteilchen, aber auch Insekten, Vögel oder Flugzeuge. Über ein Dopplerradar kann zudem mittels Bestimmung der Dopplergeschwindigkeit die radiale Geschwindigkeitskomponente der Streuer bestimmt werden.

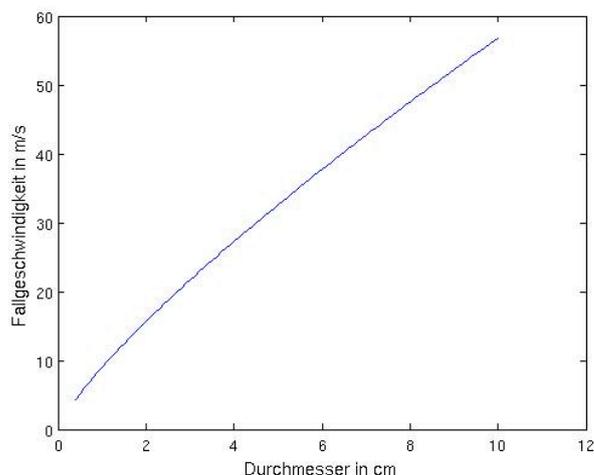


Abb. 2.10: Darstellung der approximierten Endfallgeschwindigkeit von Hagel in m/s in Abhängigkeit vom Durchmesser in cm nach Pruppacher und Klett (1997) bei einem Luftdruck von 800 hPa.

Tabelle 2.2: ANELFA-Skala für Hagelintensität nach Dessens et al. (2007).

Klasse	maximaler Korndurchmesser	Größenäquivalent	kinetische Energie in J/m^2	typische Schäden
A0	<1 cm	Erbse	0-30	Verkehrsunfälle, Schäden an Blüten
A1	1 - 1,9 cm	Traube	30-100	Schäden an Wein, Obst, Tabak
A2	2 - 2,9 cm	Taubenei, Murmel, Kirsche	100-400	schwere Schäden an Gemüse, Bäume, Getreide
A3	3 - 3,9 cm	Walnuss, Tischtennisball	400-800	Totalschaden an Feldfrüchten, (Fenster-)Glasbruch, PKW-Schäden
A4	4 - 4,9 cm	Hühnerei, Golfball	≥ 800	getötete Tiere, Verletzungen bei Menschen
A5	≥ 5 cm	Orange, Pfirsich, Apfel, Tennisball		sehr gefährlich, Dachschäden Tod ungeschützter Personen

2.5.1 Funktionsweise eines Radars

Das Radargerät sendet Pulse elektromagnetischer Wellen mit einer bestimmten Wellenlänge aus. Treffen diese auf Hindernisse in der Atmosphäre, werden sie zu einem Teil zurückgestreut und vom Empfänger wieder detektiert. Je nach Stärke des rückgestreuten Signals und der Dauer zwischen dem Senden und dem Empfangen des Signals kann auf die Intensität und die Entfernung der Streukörper geschlossen werden. Den Zusammenhang zwischen Radarreflektivität und den spezifischen Radarparametern beschreibt die Radargleichung. Sie stellt einen Zusammenhang zwischen der abgestrahlten Leistung P_a und der empfangenen Leistung P_e dar und lautet nach Sauvageot (1992):



Abb. 2.11: C-Band Dopplerradar des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung auf dem Gelände des KIT Campus Nord.

$$P_e = \frac{P_a G^2 \lambda^2 L^2}{(4\pi)^3} \frac{c\tau}{2} \frac{\eta}{r^2} \int_{\Omega} f^4(\theta, \Phi) d\Omega. \quad (2.30)$$

Dabei ist G der Antennengewinn, der das Verhältnis der Strahlungsintensität durch die Bündelung der Antenne relativ zur isotropen Abstrahlung angibt, λ ist die Wellenlänge, L die Dämpfung auf der Strecke vom Radar zum Streuer, r die Entfernung der Streuer zum Radar, c die Lichtgeschwindigkeit und τ die Pulsdauer der Radarstrahlung. η stellt den volumenspezifischen Rückstreuquerschnitt, auch als Radarreflektivität bezeichnet (siehe Gleichung 2.34), dar. Die Funktion $f(\theta, \Phi)$ ist die antennenspezifische Intensitätsverteilung in Abhängigkeit vom Azimutwinkel θ und vom Elevationswinkel Φ der Antenne, bei Parabolantennen haben beide den gleichen Wert. Die Integration erfolgt über den Raumwinkel Ω des Pulsvolumens, wobei eine homogene Verteilung der Streuteilchen angenommen wird. Die Radargleichung ermöglicht es, die Reflektivität η für beliebige Streuer in einem Volumen zu berechnen.

Ist die Wellenlänge viel größer als der Tropfendurchmesser, so kann für den Rückstreuquerschnitt σ die Rayleigh Approximation

$$\sigma_s(\pi) = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D^6 \quad (2.31)$$

mit dem Dielektrizitätsfaktor

$$|K|^2 = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (2.32)$$

verwendet werden. Dabei wird das Streuteilchen als oszillierender Dipol beschrieben, die multipolaren elektrischen und magnetischen Momente werden hier gegenüber der exakten Mie-Lösung vernachlässigt. Der Vorteil dabei ist die monotone Abhängigkeit von Streuquerschnitts zur radioelektrischen Größe des Streuers. Der Rückstreuquerschnitt ist also umgekehrt proportional zur

Wellenlänge λ^4 , proportional zum Dielektrizitätsfaktor $|K|^2$ und proportional zur 6. Potenz des Durchmesser D des Streuers. Durch die unterschiedlichen komplexen Brechungsindizes m von Eis und Wasser nimmt der Dielektrizitätsfaktor (2.32) nach Sauvageot (1992) den Wert 0,18 für Eis und Werte zwischen 0,91 und 0,93 für Wasser (abhängig von der Temperatur) an. In der Meteorologie werden für Niederschlagsradare in der Regel Wellenlängen zwischen ein und zehn Zentimetern verwendet, bei denen Rayleigh-Streuung im Fall von Regen in Näherung angenommen werden kann. Das IMK-Radargerät in Karlsruhe ist ein C-Band Dopplerradar und misst mit einer Wellenlänge von 5,4 cm. Werden die Streuer zu groß, z.B. bei Hagel, gilt die Annahme der Rayleigh-Näherung nicht mehr. Dabei müsste man auf die aufwändigere Mie-Lösung mit dem Rückstreuoeffizienten

$$\sigma_s(\pi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1) (a_n - b_n) \right|^2 \quad (2.33)$$

zur Berechnung zurück greifen. Dabei sind a_n und b_n Besselfunktionen, auch Mie Koeffizienten genannt, und vom komplexen Brechungsindex des Dielektrikums m abhängig. Die Anwendbarkeit der Rayleigh-Näherung lässt sich mit dem Verhältnis der Wellenlänge zum Durchmesser des Streuers $\alpha = \pi D/\lambda \ll 1$ bestimmen.

In Abbildung 2.12 ist der Rückstreuquerschnitt einer Kugel für verschiedene Wellenlängen aufgetragen, mit den Bereichen der Rayleigh-Streuung, Mie-Streuung und optischen Streuung. Dargestellt ist hier der Rückstreuquerschnitt, normiert auf die Querschnittsfläche einer Kugel, $\sigma_s/\pi r^2$. Danach ergibt sich im Rayleigh-Bereich ein Anstieg der Kurve mit dem Radius α^4 und erreicht im optischen Bereich den Wert 1.

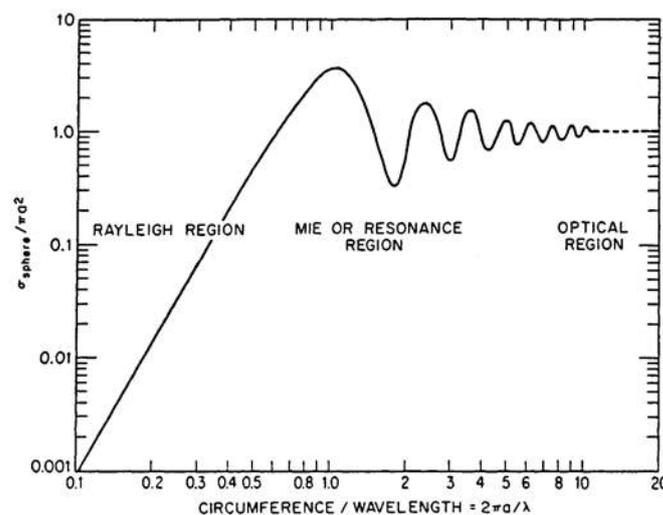


Abb. 2.12: Normierter Rückstreuquerschnitt einer Kugel $\sigma_s/\pi r^2$ aus Skolnik et al. (1990) als Funktion des Größenparameters $\alpha = \pi D/\lambda$ für Wasser.

Radarreflektivität

Im Fall der Rayleigh-Näherung ist die Radarreflektivität η

$$\eta = \int_0^{D_{max}} \sigma(D)n(D)dD \quad (2.34)$$

als Summe über sämtliche Rückstreuquerschnitte σ der verschiedenen Hydrometeore im Einheitsvolumen definiert. Dabei ist $n(D)$ die spektrale Anzahldichteverteilung. Da die Radarreflektivität so von der Wellenlänge abhängt, verwendet man häufig den unabhängigen Reflektivitätsfaktor

$$Z = \int_0^{D_{max}} D^6 n(D) dD. \quad (2.35)$$

Dieser hängt bei angenommener Rayleigh-Approximation von der 6. Potenz des Durchmessers D des Streuers ab. Im späteren Verlauf wird der Radarreflektivitätsfaktor als Radarreflektivität bezeichnet. Die Radarreflektivität Z mit der Einheit [$\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$] ist ein Maß für den Rückstreuquerschnitt von vielen Streuern im Pulsvolumen, die mit dem Radar detektiert werden. Sie ist proportional zur Energie, die von sämtlichen Streuteilchen im Radarstrahl zur Antenne zurückgestreut wird. Da die von der Antenne empfangene Energie aber von vielen Faktoren abhängt – unter anderem von der Entfernung, der Wellenlänge, der Antennenform und -größe sowie der ausgesendeten Energie – wird für meteorologische Zwecke die Reflektivität wie oben definiert, dass sie nur noch von den Eigenschaften der Streukörper abhängt. Bei Regen ist Z umso höher, je mehr und je größere Regentropfen im Volumen enthalten sind. Die Reflektivität wird meist in der logarithmischen Einheit

$$dBZ = 10 \cdot \log\left(\frac{Z}{\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}}\right) \quad (2.36)$$

angegeben, wobei dB das übliche Kürzel für Dezibel ist und Z für die Reflektivität steht. Eine Erhöhung um 10 dBZ entspricht also eine Verzehnfachung der Reflektivität, eine Erhöhung um 30 dBZ einer Vertausendfachung. Einen Zusammenhang zwischen der Regenrate in R , dem Tropfendurchmesser D und der Anzahl der Tropfen $N(D)$ stellten Marshall und Palmer (1948), durch

$$N(D) = N_0 e^{-\lambda D} \quad (2.37)$$

auf. Stratiforme Niederschläge können danach durch $N_0 = 8000 \text{ mm}^{-1} \text{ m}^{-3}$ und $\lambda = 4,1 R^{-0,21}$ beschrieben werden. Diese Verteilung charakterisiert viele kleine Tropfen und wenige große. Die gesuchte Regenrate ist definiert als

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} v(D)n(D)D^3 dD. \quad (2.38)$$

Damit kann die folgende Beziehung zwischen Reflektivität Z bzw. deren logarithmische Wert

(dBZ) zur Niederschlagsrate R (in mm h^{-1}) hergestellt werden:

$$Z = aR^b \leftrightarrow R = \left(\frac{Z}{a}\right)^{\frac{1}{b}} \quad \text{und} \quad (2.39)$$

$$R = \left(\frac{10^{\frac{\text{dBZ}}{10}}}{a}\right)^{\frac{1}{b}}. \quad (2.40)$$

Die empirisch ermittelten Koeffizienten a und b können aus der theoretischen Studie von Marshall und Palmer (1948) bestimmt werden. Am IMK-Radar sind die Werte für a im Sommer 300 und im Winter für Regen 200 und für Schnee 1800, für den Koeffizienten b wird im Sommer der Wert 1,5, im Winter für Regen 1,6 und für Schnee 2,2 verwendet. Die unterschiedlichen Größen für a und b bei Regen und Schnee sind eine Folge des unterschiedlichen Dielektrizitätsfaktors K (Gleichung 2.32) der beiden Niederschlagsarten. Zur quantitativen Analyse der Niederschlagsintensität müssen jedoch weitere Vergleichsmessungen herangezogen werden. In Tabelle 2.3 sind Niederschlagsmengen für gemessene Radarreflektivitäten und deren Beschreibung bzw. Intensität dargestellt.

Tabelle 2.3: Zuordnung der Niederschlagsintensität pro Stunde zur gemessenen Radarreflektivität (Jaeneke, 2012).

Radarreflektivität in dBZ	Niederschlagsintensität in mm h^{-1}	Niederschlagsbeschreibung/ Intensität
7-18,9	0,06 - 0,4	geringer Regen
19 - 27,9	0,4 - 1,9	leichter bis mäßiger Regen
28 - 36	1,9 - 8,1	mäßiger Regen, Schauer
37 - 45	8,1 - 35,9	starker Regen, Schauer, z.T. Gewitter
46 - 54,9	36,9 - 150,0	sehr starker Regen, Gewitter
>55	>150	extremer Regen, Hagel, schweres Gewitter

2.5.2 Probleme bei der Radarmessung

Bei der Radarmessung können einige Effekte zu Fehlinterpretationen der Signale führen. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

Das „Helle Band“

Passieren Schnee und Eisteilchen die 0°C -Grenze, beginnen diese zu schmelzen und bilden an der Oberfläche einen Wasserfilm. Da Wasser ($|K^2| \approx 0,93$) einen wesentlich höheren Dielektrizitätsfaktor als Eis ($|K^2| \approx 0,18$) besitzt und die Partikel zu diesem Zeitpunkt wesentlich größer sind als Regentropfen, ist die Radarreflektivität aufgrund der Proportionalität zum Durchmesser in der 6. Potenz relativ zu Eis stark erhöht (Gleichung 2.31). Diese Zunahme der Radarreflektivität wird „Helles Band“ (engl. bright band) genannt. Das „Helle Band“ erscheint bei einem Vertikalschnitt des Radarbilds in Höhe der Schmelzzone, die etwa 200 bis 300 m unterhalb der 0°C -Grenze zu finden ist. Bei stratiformem Niederschlag ist dieser Effekt am stärksten. Bei automatischen Detektierungsverfahren, wie beispielsweise TRACE3D (Handwerker, 2002), bereitet es häufig Schwierigkeiten, das „Helle Band“ von einer konvektiven Zelle zu unterscheiden. Der Effekt des „Hellen Bandes“ tritt nicht auf, wenn der Niederschlag bis zum Boden vollständig gefroren bleibt.

Zusätzlich treten im „Hellen Band“ noch diese Effekte auf:

- veränderte Partikelkonzentration: Bei einer über die Höhe angenommenen konstanten Niederschlagsrate (Gleichung 2.38, aber unterschiedliche Fallgeschwindigkeit der Niederschlagspartikel durch das Schmelzen), ergibt sich eine veränderte Partikelkonzentration $n(D)$. Dies führt zu einer Abnahme der Reflektivität Richtung Boden.
- Wachstum und Zerfall von Partikel: nasse Partikel wachsen besonders gut zusammen, so dass besonders große Tropfen entstehen. Diese zerfallen bzw. platzen jedoch durch die hohe Fallgeschwindigkeit schnell wieder.
- Form der Partikel: die Hydrometeore formen sich aus einem unförmigen Eiskorn zu einer flüssigen Kugel.

Bodenechos

Trifft ein Radarstrahl oder seine Nebenbeulen auf feste Hindernisse wie beispielsweise Gebäude oder Gebirgszüge, treten sogenannte Bodenechos (engl. ground clutter) auf. Meist sind diese bei niedrigen Elevationen zu beobachten. Um dies zu vermeiden, können Karten mit Stördaten (engl. clutter map) erstellt werden. Die Reflektivitätswerte der Stördaten werden dann von den gemessenen Reflektivitätswerten abgezogen. Ein weiteres Verfahren für Doppler-Radare, wie dem IMK-Radar, ist der Einsatz eines Dopplerfilters. Hier kann unter Berücksichtigung des Dopplereffekts die radiale Geschwindigkeit eines Objekts bestimmt werden. Mit dem Dopplerfilter werden alle Echos, die keine radiale Geschwindigkeit aufweisen, herausgefiltert.

Eine zweite Art des Bodenechos, das Anaprop Echo (Abk. für anomales propagation echo, dt. anomale Ausbreitung), entsteht, wenn der Radarstrahl aufgrund einer starken Inversion stärker als normal gebrochen wird. Dadurch kann der Erdboden ein Bodenecho erzeugen, das normalerweise nicht vom Radarstrahl erreicht wird. Auch hier kann der Dopplerfilter angewendet werden, um diese Störechos herauszufiltern.

Abschattung und Dämpfung

Rückseitig orografischer Hindernisse kann der Radarstrahl teilweise oder auch vollständig abgeschattet sein. Als Folge sind die gemessenen Reflektivitäten hinter Gebirgen oftmals deutlich geringer, als vorderseitig oder nicht vorhanden. Um dies zu korrigieren, werden die Reflektivitäten der höheren Elevationen für die niedrigeren Schichten extrapoliert oder an langjährige Mittelwerte und Bodenmessungen angepasst.

Ein weiterer Effekt, der die Radarreflektivität stark modifiziert, ist die Dämpfung des Signals durch starke Niederschläge. Sie tritt zum Einen hinter konvektiven Zellen, zum Anderen im gesamten Radarmessgebiet auf, wenn starker Niederschlag zu einem Wasserfilm auf der Radarkuppel, dem Radom führt. Die Reflektivität wird in beiden Fällen deutlich zu schwach angegeben. Eine Korrektur kann mittels einer rekursiven Korrekturformel erfolgen, die häufig aber nicht stabil ist (Löffler-Mang et al., 1999, Blahak, 2004). Beim IMK Radar wird dies jedoch nicht weiter berücksichtigt.

2.6 Hageldetektion

Da Hagel aus den im vorigen Abschnitt diskutierten Gründen mit einem konventionellen Doppler-C-Band Radar, dessen Daten hier verwendet werden, nicht direkt gemessen werden kann, erfolgt die Detektion häufig über sogenannte Hagelkriterien. Zusätzlich zur gemessenen Radarreflektivität wird je nach Hagelkriterium die Wolkenoberflächentemperatur, die integrierte Wasserdampfsäule oder der Energiefluss verwendet. Häufig wird ab einer Reflektivität über 55 dBZ von Hagel ausgegangen (Mason, 1971). Diese hohen Reflektivitäten deuten zwar auf große bzw. eine hohe Anzahl von Partikel hin, geben jedoch keinen Rückschluss darauf, ob es sich um festen Niederschlag handelt, der auch den Boden erreicht. Hier muss neben dem Reflektivitätswert auch auf die gemessene Höhe der Reflektivität geachtet werden. Zusätzlich zur Höhe der gemessenen Radarreflektivität gibt auch die Mächtigkeit der Reflektivitätsschicht einen Hinweis darauf, ob die Zelle mit Hagel verbunden ist. Dabei gilt: je größer die vertikale Erstreckung der hohen Reflektivität, umso größer die Wahrscheinlichkeit von Hagelschlag.

Hagelkriterien werden bei den verschiedenen Wetterdiensten auch im Nowcasting-Bereich verwendet, um Warnungen herauszugeben. Der deutsche Wetterdienst (DWD) verwendet hierbei sein Zellverfolgungsprogramm „KONvektionsentwicklung in RADARprodukten“ (Konrad; Lang, 2002). Hier werden neben dem Berechnen der Zugbahnen von Gewitterzellen auch Hagelwarnungen in verschiedenen Stufen herausgegeben. Die in dieser Arbeit verwendeten Hagelkriterien werden im Kapitel 4.3 detailliert vorgestellt.

3. Verwendete Datensätze

3.1 Radardaten

Die für die Berechnung der Hagelkriterien und der räumlichen Muster der Vertikalstruktur verwendeten Daten stammen vom C-Band Doppler-Radargerät des IMK am KIT Campus Nord in Karlsruhe (technische Details siehe Tabelle 3.1). Der Standort (49°05'33" N, 8°26'13" E) befindet sich im Rheintal östlich von Eggenstein-Leopoldshafen in einer Höhe von 148 m ü. NN. Das Radargebiet (Abb. 3.1) liegt in einem Radius von 120 km um Leopoldshafen und erstreckt sich über den Odenwald, den Kraichgau, die Schwäbische Alb, den Nordschwarzwald, das nördliche Elsass, den Pfälzer Wald, das südliche Rheinhessen sowie den Oberrheingraben.

Tabelle 3.1: Technische Daten des IMK-Radars am KIT Campus Nord.

Gerät	C-Band-Doppler-Radar METEOR 360 AC
Hersteller	Gematronic GmbH, Neuss
Frequenz	5620 MHz
Wellenlänge	5,4 cm
Pulsleistung	250 kW
Pulswiederholungsfrequenz	250 bis 1150 Hz
Pulsdauer	0,85 ms (short pulse), 2,0 ms (long pulse)
Keulbreite -3dB	0,98° (Hauptkeule)
Antennendurchmesser	4,2 m
Gain (Antennengewinn)	44,7 dB
Messbereich Reflektivität	-31,5 bis +95 dBZ
Auflösung	1° azimuthal, 500 m radial

Während eines Volumenscans werden die Reflektivität und die Radialwindkomponente als Messgrößen ermittelt. Aus diesen kann wiederum die Niederschlagsintensität, der vertikale Flüssigwassergehalt und das Windprofil in radialer Richtung abgeleitet werden. Die Auflösung der Daten beträgt radial 500 m und azimuthal 1°. Durch Interpolation ergibt sich daraus eine Auflösung der abgeleiteten Produkte von 500 m × 500 m. Beim IMK-Radar ist die tiefste nicht mehr durch Abschattung betroffene Elevation 2.0°.

Der Scanmodus, der alle 10 min wiederholt wird, umfasst

- einen vollständigen Volumenscan mit Reflektivität Z und Dopplergeschwindigkeit V in 14 Elevationen bei 0,4, 1,1, 2,0, 3,0, 4,5, 6,0, 7,5, 9,0, 11,0, 13,0, 16,0, 20,0, 24,0 und 30,0

Grad mit 120 km Radius,

- einen Scan der Reflektivität (PPI (Z), Plan Position Indicator), bei dem die Radarantenne bei 1,0 Grad Höhenwinkel eingestellt und einmal 360 Grad azimuthal mit 250 km Radius gemessen wird,
- weitere Volumenscans (nur Z) mit 14 Elevationen bei 0,4, 1,1, 2,0, 3,0, 4,5, 6,0, 7,5, 9,0, 11,0, 13,0, 16,0, 20,0, 24,0 und 30,0 Grad mit 120 km Radius.

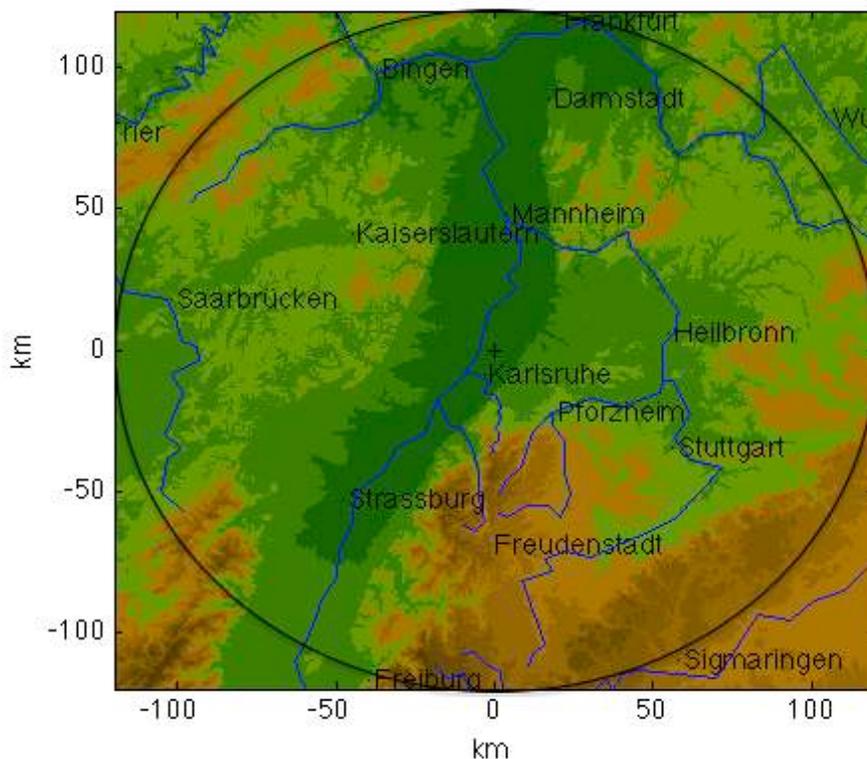


Abb. 3.1: Die Abbildung zeigt den gesamten Scanbereich (schwarzer Kreis) des IMK-Doppler-Radar (+) am Campus Nord des KIT.

Für die Berechnung der Hagelkriterien werden die gemessenen Radarreflektivitäten Z für alle 14 Elevationen für den Zeitraum von 1997 bis 2011 für die Monate April bis September verwendet, in diesen Monaten tritt üblicherweise Hagel auf. Dabei stehen nur Tage zur Verfügung, an denen Niederschlag mittels Radar gemessen wurde.

3.2 Landnutzungsdaten

Um die Hagelkriterien nur über bebauten Gebieten auswerten zu können liegen dafür die Daten der CORINE Landcover 2000 (Coordination of Information on the Environment: europaweite Kartierung der Bodenbedeckung und Landnutzung) vor. In Abbildung 3.2 sind diese Daten für

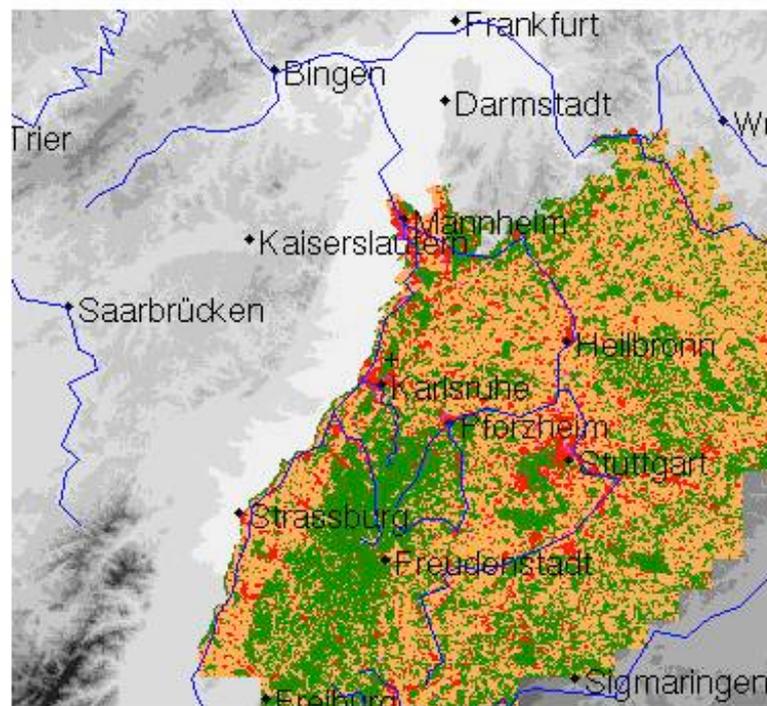


Abb. 3.2: Die Abbildung zeigt das erfasste Radargebiet von Baden-Württemberg. Dargestellt sind die verschiedenen Klassifizierungen der Landnutzung mit Gebäuden (rot), Landwirtschaft (ocker), Vegetation/Wald (grün) und Gewässer (blau) der CORINE Landcover 2000 Daten (Coordination of Information on the Environment: europaweite Kartierung der Bodenbedeckung und Landnutzung). Die Auflösung beträgt $500\text{ m} \times 500\text{ m}$.

die verschiedenen Klassifizierungen der Landnutzung in Baden-Württemberg wie folgt dargestellt: Gebäude (rot), Landwirtschaft (ocker), Vegetation/Wald (grün) und Gewässer (blau). Die Auflösung beträgt $500\text{ m} \times 500\text{ m}$.

3.3 Untersuchungsgebiet

Für die Auswertung der Daten ist nur der nordwestliche Teil des Landes Baden-Württemberg (Abbildung 3.2) relevant, da nur hier Schadendaten der SV SparkassenVersicherung AG, siehe Kapitel 3.4, vorliegen. Durch das gesamte Untersuchungsgebiet zieht sich der Oberrheingraben, der gleichzeitig die niedrigste Region mit Höhen zwischen 300 m ü. NN im Süden und weniger als 100 m ü. NN im Norden repräsentiert und ist geprägt von ausgedehnten Wäldern, Ackerbau und Weinbau. Nördlich von Karlsruhe liegt der Odenwald, der sich über den Norden Baden-Württembergs und Teile Südhessens erstreckt. Im Radargebiet liegt nur der südöstlichste Teil, der eine Höhe von 600 m ü. NN erreicht. Südlich von diesem Gebiet schließt der Kraichgau an, eine hügelige, durch Ackerbau gekennzeichnete Landschaft, die mit knapp über 300 m ü. NN relativ flach ist. Am südöstlichen Rand des Radargebiets erstreckt sich von Nordost nach Südwest

der Höhenzug der Schwäbischen Alb. An der nordwestlichen Seite befindet sich die recht steile Albkante mit Höhen bis 700 m ü. NN, im Westen werden Höhen bis 1000 m ü. NN (Lemberg, 1015 m) erreicht. Zum Donautal im Süden fällt die schwäbische Alb sehr flach ab. Die nördliche Seite ist hauptsächlich bewaldet, auf der Hochebene und im südlichen Bereich wird Ackerbau betrieben. Südlich von Karlsruhe beginnt der Nordschwarzwald. Er liegt östlich des Oberrheingrabens und erreicht Höhen bis knapp 1200 m ü. NN (Hornisgrinde 1164 m). Im Süden wird der Nordschwarzwald durch das Kinzigtal vom Südschwarzwald getrennt. Die Orographie ist durch viele tief einschneidende Täler geprägt. Das gesamte Gebiet ist zum größten Teil von Wald bedeckt.

Da im folgenden immer der gesamte Scan-Bereich (wie in Abbildung 3.1) dargestellt ist, kann zur groben Orientierung für das Untersuchungsgebiet als westliche Grenze der Rhein und als nördliche Grenze im Westen die Stadt Mannheim Richtung Main südöstlich vom „t“ von Darmstadt und im Nordosten den Main und die Tauber herangezogen werden.

3.4 Versicherungsdaten der SV Sparkassenversicherung

Die Daten für die Analyse der Hagelereignisse in Baden-Württemberg stammen von den Elementarschadendaten der SV Sparkassenversicherung AG zwischen 1997 und 2011. Bei der Gebäudeversicherung werden folgende Elementarschäden unterschieden: Sturm, Hagel, Hochwasser und Überschwemmung, Schneedruck und Lawinen, Erbeben, Erdfall und Erdbeben. Dabei bilden Hagelschäden die höchste Schadensursache mit ca. 40% bei den Gesamtschäden durch Elementarereignisse (Zeitraum 1986 bis 2008; Kunz und Puskeiler, 2010b).

Bis 1994 galt in Baden-Württemberg eine Elementarversicherungspflicht für alle Privat-, Industrie- und Gewerbegebäude. Die SV Sparkassenversicherung, Abteilung Gebäudeversicherung, ging nach Aufhebung der Versicherungspflicht aus der Monopolstellung dieser Gebäudeversicherung hervor. Trotz der heute nicht mehr geltenden Elementarversicherungspflicht liegt der Anteil an versicherten Gebäuden durch die SV Sparkassenversicherung bei etwa 60% aller Gebäude in Baden-Württemberg und Hessen (eigene Angabe der Versicherung). Da sich seit 1994 die Anzahl der versicherten Gebäuden durch Kündigung oder Abschluss des Versicherungsschutzes sowie durch Übernahme anderer Versicherungsunternehmen verändert hat (2004: 71% gegenüber 1994), muss diese Veränderung in der Anzahl der Versicherungen vor der Verwendung der Daten entsprechend korrigiert werden (Kunz et al., 2009).

Im Rahmen dieser Arbeit werden nur Hagelschadenmeldungen der SV Sparkassenversicherung berücksichtigt. In den Bestandsdaten ist die Lage jedes Gebäudes über UTM-Koordinaten georeferenziert. Für diese Arbeit stehen die Daten der Schadenmeldungen für die bearbeiteten Beispielfälle (20.06.2002, 16.07.2003, 24.06.2005 und 29.07.2005) in UTM-Koordinaten zur Verfügung. Die Auswertung über den Zeitraum der letzten 15 Jahre bezieht sich auf die Schadenanzahl pro 5-stelligem Postleitzahlgebiet. Außerdem wird mit Hilfe der Bestandsdaten der Schadensatz (Anzahl Schadenmeldungen zu Anzahl Verträge pro Postleitzahlgebiet) für jedes Ereignis bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass der Selbstbehalt bei den meisten Verträgen 100 € beträgt.

3.5 Winddaten des Messmasts im KIT Campus Nord

Der Messmast des IMK-TRO am Campus Nord des KIT mit den Standortkoordinaten $49^{\circ}05'33''$ N, $8^{\circ}25'33''$ E und 110,4 m ü. NN ist 200 m hoch und besitzt in verschiedenen Höhen Messeinrichtungen für die Windmessung. Für eine erweiterte Auswertung des Hagelzugs am 20.06.2002 werden aus den Höhen 40 m, 100 m und 200 m die mittlere und maximale Windgeschwindigkeit (10 min) sowie die Windrichtung verwendet.

3.6 Wolkenoberflächentemperatur

Mittels Satelliten können Wolkenoberflächentemperaturen über das Infrarot-Spektrum im sogenannten fernen Infrarot (IR) mit Wellenlängen zwischen $11,5 \mu\text{m}$ und $12,5 \mu\text{m}$ gemessen werden. In dieser Arbeit wird die IR-Wolkenoberflächentemperatur für die Berechnung des Hagelkriteriums nach Auer (1994) benötigt. Die Daten stammen vom NOAA NCEP-NCAR CDAS-1 DAILY Diagnostic high-cloud top temp¹ und liegen für den Zeitraum von 2002 bis 2011 vor. Die Wolkenoberflächentemperatur ist in Kelvin angegeben und liegt in einem Gitterabstand von $1,875^{\circ}$ geografischer Breite vor. Hier werden die Wolkenoberflächentemperaturen des Gitterpunktes mit der Koordinate ($48,57052^{\circ}$ N, $9,375^{\circ}$ E) verwendet. Dies liegt etwas südlich von Nürtingen im Landkreis Esslingen. Die jeweilige Messung der Temperatur liegt täglich, soweit hohe Wolken vorhanden sind, für 12 UTC vor.

3.7 Hagelklimatologie

Aus der Analyse von Radardaten des IMK-Radars mit SV Schadendaten in Baden-Württemberg von Puskeiler (2009) sowie Kunz und Puskeiler (2010a) wurde eine Hagelgefährdungskarte (Abbildung 3.3) mit fünf Gefährdungsklassen erstellt. Die Hagelwahrscheinlichkeit hat demnach eine hohe räumliche Variabilität. Danach tritt im Großraum Stuttgart eine Häufung von Hagelgewittern auf. Gebiete wie der Schwarzwald oder die Rheinebene dagegen sind weniger gefährdet. Auch lässt sich ein deutlicher Anstieg der Hagelereignisse an der nördlichen Kante der schwäbischen Alb erkennen. Die Arbeiten zeigen dabei auch einen Zusammenhang zwischen der Intensität (Radarreflektivität) und der Häufigkeit des Auftretens. So ist in den Gebieten mit vielen Gewittern auch mit mehr schweren Hagelstürmen zu rechnen. Zusätzlich wurden diese Hot Spots durch eine unabhängige Untersuchung von Blitzdaten durch Damian (2011) bestätigt.

Nach den Strömungsuntersuchungen für Baden-Württemberg mit semi-idealisierten Modellsimulationen von Brombach (2012) kommt es bei südwestlichen Winden durch die Umströmung des Südschwarzwalds zu einer Konvergenz der Strömung im nördlichen Leebereich. Auch führt das gleichzeitige Überströmen der Schwäbischen Alb zu einer bodennahen Konvergenz nördlich davon. Zusätzlich kommt es zur Auslösung von Schwerewellen über der Schwäbischen Alb sowie

¹NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, NCEP: National Centers for Environmental Prediction, NCAR: National Center for Atmospheric Research, CDAS I: Climate Data Assimilation System I, DAILY Diagnostic high-cloud top temp: Täglich bestimmte Oberflächentemperatur der hohen Wolken

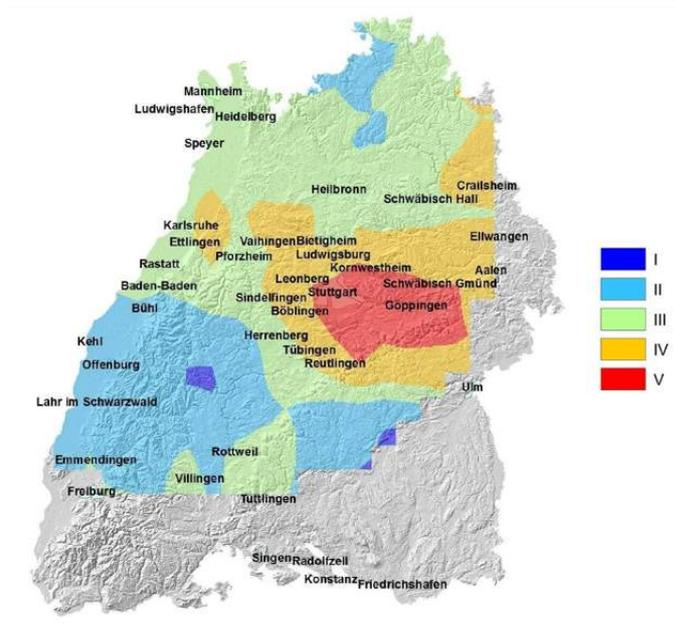


Abb. 3.3: Die Abbildung zeigt die Hagelgefährdungskarte für das Untersuchungsgebiet nach Puskeiler (2009). Die Farben geben die Gefährdung in den Klassen I (gering) bis V (hoch) wieder.

am Nord- und Südschwarzwald. Im Aufwindbereich dieser Wellen kann in höheren Atmosphärenschichten Konvektion ausgelöst oder verstärkt werden. Dabei eignet sich die Froude-Zahl gut, um die Strömungsregime zu analysieren (Kunz und Puskeiler, 2010a). So kommt es bei niedrigen Froude-Zahlen, die häufig an Hageltagen vorherrschen (Kunz und Puskeiler, 2010b), vermehrt zur Umströmung des Südschwarzwalds.

4. Angewendete Methoden zur Auswertung der Radardaten

4.1 Aufbereitung der Radardaten

Die nachfolgende Aufbereitung der Radardaten und anschließende Auswertung der verschiedenen Verfahren zur Detektion von Hagel erfolgt mithilfe einer MATLAB-Routine. Hierzu werden zunächst die Reflektivitäten auf kartesische Koordinaten interpoliert und in eine $480 \times 480 \times 40$ Matrix übertragen, dies entspricht einer Auflösung des Gitters von $500 \times 500 \times 250 \text{ m}^3$.

Mit diesen Datensätzen werden zunächst MaxCAPPIs (wie Abbildung A.1) zur Identifikation des Gewittersystems und zur Übersicht der Zugbahn über den gesamten Tag erstellt. Der Begriff MaxCAPPI setzt sich dabei aus *Maximum Constant Altitude Plan Position Indicator* zusammen. Wobei PPI für ein Messverfahren bezeichnet, in dem die Radarantenne auf einen bestimmten Höhenwinkel gestellt wird und in diesem einen Scan durchführt und auf eine Ebene von konstanter Höhe interpoliert. Bei einem MaxCAPPI wird dieses Verfahren für verschiedene Höhenwinkel durchgeführt und anschließend die Maxima der Daten dargestellt. Dies erfolgt zum einen über eine Vertikal-Maximumprojektion in einem Bildauftritt, zum anderen durch die Horizontal-Maximumprojektionen von Süd nach Nord und West nach Ost in Seitenrissen. Die Skala der Seitenrisse gibt dabei die Höhe in km an.

Auf die Reflektivitäten werden die Hagelkriterien (Kapitel 4.3) anschließend angewendet und mit Hilfe der Kontingenztabelle (Kapitel 4.2) die Gütemaße berechnet. Die Abbildung der Datensätze der Kriterien erfolgt wie bei den MaxCappis über das Plotprogramm von MATLAB.

4.2 Verifikation

Zur Verifikation der verschiedenen aus Radardaten abgeleiteten Hagelkriterien werden kategoriale Größen verwendet. Unter kategorischen Größen versteht man die Beschreibung des Auftretens oder Nichtauftretens eines Ereignisses in einem binären System, in diesem Fall Hagel Ja oder Nein. Mit Hilfe einer Kontingenztabelle (Tabelle 4.1) werden dann Häufigkeitsverteilungen der Vorhersage und Beobachtung erstellt. Aus dieser Kontingenztabelle lassen sich verschiedene Qualitätsmaße (engl. Skill Score) wie beispielsweise der Heidke Skill Score (HSS) und verschiedene Genauigkeitsmaße, wie die Detektionswahrscheinlichkeit (Probability of Detection, POD) berechnen. Für die Verifikation der Hagelkriterien werden hier die SV Versicherungsdaten ver-

Tabelle 4.1: Kontingenztabelle für die kategorielle Verifikation nach Wilks (1995).

Vorhersage mittels Hagelkriterium	Beobachtung mittels Gebäudeschäden		
	ja	nein	Summe
ja	a	b	a + b
nein	c	d	c + d
Summe	a + c	b + d	a + b + c + d

wendet.

4.2.1 Gütemaße

Detektionswahrscheinlichkeit (engl. Probability of Detection)

Die Probability of Detection (POD) gibt die Trefferrate der Ereignisse an:

$$POD = \frac{a}{a + c}. \quad (4.1)$$

Für eine perfekte Prognose ergibt sich ein Wert von 1. Hier werden jedoch nur die richtigen Ja-Aussagen betrachtet, falsche Aussagen dagegen nicht. Dadurch kann eine zu häufige Vorhersage des positiven Ereignisses die POD maximieren. Zusätzlich zur POD wird auch die Probability of False Detection (POFD) verwendet, die analog zum POD definiert ist:

$$POFD = \frac{b}{b + d}. \quad (4.2)$$

Dabei werden aber nur die richtigen Nein-Aussagen erfasst.

Fehlalarmrate (engl. False Alarm Rate)

Die False Alarm Rate (FAR) wertet nur die falschen Vorhersagen bezüglich aller positiven Vorhersagen aus:

$$FAR = \frac{b}{a + b}. \quad (4.3)$$

Die FAR nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, wobei der Wert 0 die beste Vorhersage repräsentiert. Die POD und die FAR betrachten jeweils nur einen Teilaspekt und stellen deshalb keine perfekten Gütemaße da. Daher sollten sie auch stets mit anderen Maßzahlen betrachtet werden.

Kritischer Erfolgsindex (engl. Critical Success Index)

Der Critical Success Index (CSI)

$$CSI = \frac{a}{(a + b + c)}, \quad (4.4)$$

auch Threat Score genannt, berücksichtigt die falschen Alarme (b) und die nicht vorhergesagten Ereignisse (c), die Nicht-Ereignisse (d) jedoch nicht. Der CSI nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, wobei 1 bedeutet, dass alle Vorhersagen eingetroffen und beobachtet wurden.

Equitable Threat Score

Der Equitable Threat Score (ETS) ist ähnlich dem Critical Success Index aufgebaut. Der Unterschied besteht darin, dass hier die zufälligen Treffer der positiven eingetroffenen Ereignisse und die zufälligen Vorhersagen a_r herausgefiltert werden.

$$ETS = \frac{(a - a_r)}{(a + b + c - a_r)} \quad (4.5)$$

$$a_r = \frac{(a + b)(a + c)}{n} \quad (4.6)$$

Der ETS hat einen Bereich von $-1/3$ bis 1. Tritt der Fall $(a + c) = n$ ein, so nähert sich der ETS dem CSI an. Auch hier entspricht der Wert 1 einer perfekten Vorhersage.

Heidke Skill Score

Ein oft verwendetes Qualitätsmaß für die Verifikation seltener Ereignisse stellt der Heidke Skill Score (HSS) dar. Er gibt an, wie gut eine Vorhersage mit den tatsächlichen Beobachtungen übereinstimmt. Das Ergebnis des HSS

$$HSS = 2 \frac{(a \cdot d - b \cdot c)}{[(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)]} \quad (4.7)$$

liegt zwischen -1 und 1. Wenn alle Prognosen eintreten, ist das Ergebnis 1, tritt keine der Prognosen ein, folgt daraus $HSS = -1$. Liegt der Wert über 0, ist die Prognose besser als der Zufall.

True Skill Statistic oder Hans-Kuiper discriminant

Die True Skill Statistic (TSS) berechnet sich aus der POD und der POFD mit

$$\begin{aligned} TSS &= POD - POFD \\ &= 2 \frac{(a \cdot d - b \cdot c)}{(a + c)(b + d)}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Er hat einen Wertebereich zwischen -1 und 1, wobei 1 der beste zu erreichende Wert ist. Liegt der Wert über 0, so ist auch hier die Vorhersage besser als der Zufall.

Frequency Bias

Der frequency Bias

$$Bias = \frac{(a + b)}{(a + c)} \quad (4.9)$$

gibt das Verhältnis zwischen vorhergesagten Ereignissen und tatsächlich beobachteten Ereignissen an und kann Werte zwischen 0 und ∞ annehmen. Nimmt der Bias den Wert 1 an, so sind b und c gleich 0, so dass alle Vorhersagen auch beobachtet werden. Ist der Wert größer als 1, wird zu viel oder zu oft das Ereignis vorhergesagt, ist er kleiner als 1, so wird das Ereignis öfter beobachtet als vorhergesagt.

4.3 Hagelkriterien

Für die Detektion von Hagel mittels verschiedener Kriterien sind in der Vergangenheit verschiedene Verfahren aufgestellt worden. Das einfachste Hagelkriterium nach Mason (1971) verwendet einen Schwellenwert von 55 dBZ des MaxCappi. Bei einem MaxCappi wird die höchste gemessene Reflektivität von dreidimensionalen Daten auf eine Fläche projiziert. Andere Ansätze wie beispielsweise der „Hail Detection Algorithm“ nach Smart und Alberty (1985) werden aus dreidimensionale Radardaten abgeleitet oder verwenden zusätzlich noch weitere Parameter. Bei einigen Methoden geht die Höhe einer bestimmten Temperatur als weitere Größe ein. Hierzu gehören die Kriterien nach Waldvogel et al. (1979), Holleman et al. (2000) sowie die „Probability of severe Hail“ nach Witt et al. (1998). Auer (1994) benutzt die Wolkenoberflächentemperatur und stellt damit einen Zusammenhang zur Hagelentstehung in Gewitterwolken her. Alle Hagelkriterien wurden auf der Grundlage einzelner Ereignisse abgeleitet. Eine Untersuchung der Kriterien über einen langen Zeitraum wie in dieser Arbeit wurde bisher nicht durchgeführt.

4.3.1 Mason-Kriterium

Das Mason-Kriterium (Mason, 1971) ist das einfachste Hagelkriterium. Mason geht davon aus, dass bei einer gemessenen Radarreflektivität von über 55 dBZ Hagel auftritt. Dabei wird die Höhe, in der diese Radarreflektivität auftritt, nicht berücksichtigt. Dies ist jedoch wichtig, da kleiner Hagel in großen Höhen beim Fallen zum Teil oder vollständig Schmelzen kann.

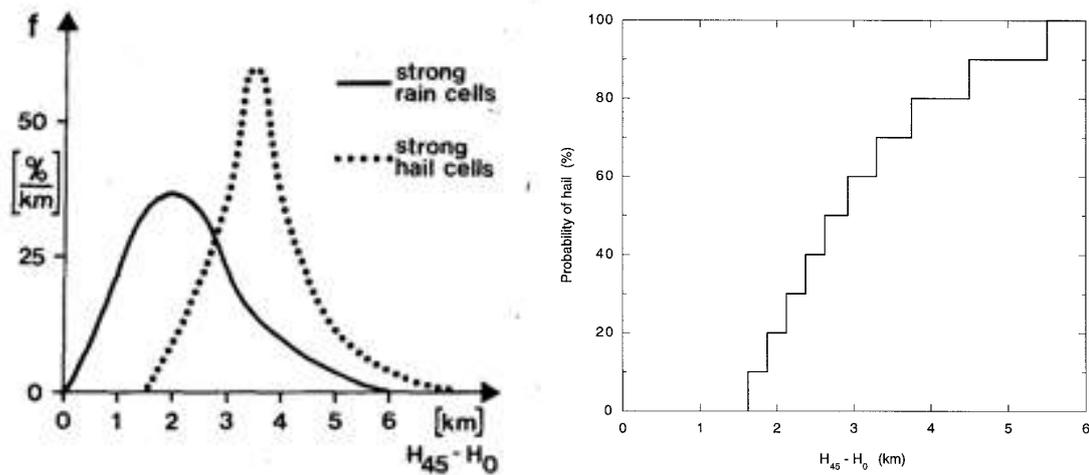
4.3.2 Waldvogel-Kriterium

Nach dem Hagelkriterium von Waldvogel et al. (1979) kann Hagel am Boden auftreten, wenn die Höhe der 45 dBZ Radarreflektivität mindestens 1,4 km über der Höhe der 0° C-Grenze liegt:

$$H(45 \text{ dBZ}) - H(0^\circ \text{C}) \geq 1,4 \text{ km.} \quad (4.10)$$

Abbildung 4.1 a zeigt dabei die Verteilungsfunktionen für Starkniederschlag und Hagel für die Differenz von der 45 dBZ Höhe und der 0° C-Grenze ($\Delta H_{45 \text{ dBZ}} = H_{45 \text{ dBZ}} - H_{0^\circ \text{C}}$) nach Waldvogel et al. (1979). Die Untersuchungen zeigen demnach zwar Hagel ab $\Delta H_{45 \text{ dBZ}} \geq 1,4 \text{ km}$ an, die Häufigkeit hat jedoch ihr Maximum bei etwa 3,5 km.

Die Abbildung 4.1b zeigt die Hagelwahrscheinlichkeit am Boden in Abhängigkeit von $\Delta H_{45 \text{ dBZ}}$ nach Untersuchungen von Witt et al. (1998). Danach liegt bei $\Delta H_{45 \text{ dBZ}} = 4,5 \text{ km}$ die Hagelwahrscheinlichkeit am Boden bei 90%, bei $\Delta H_{45 \text{ dBZ}} = 5,5 \text{ km}$ beträgt sie fast 100%. Hagel tritt



(a) Häufigkeitsverteilung des Parameters ($H_{45 \text{ dBZ}} - H_{0^\circ\text{C}}$)

(b) Hagelwahrscheinlichkeit

Abb. 4.1: Normierte Häufigkeitsverteilung des Parameters ($H_{45 \text{ dBZ}} - H_{0^\circ\text{C}}$) für starken Regen (durchgezogene Linie) und starken Hagel (gepunktete Linie) nach Waldvogel et al. (1979) (links). Wahrscheinlichkeit von Hagel als Funktion der Differenz ΔH_{45} nach Untersuchungen von Witt et al. (1998) (rechts).

bei dieser Untersuchung allerdings erst ab $\Delta H_{45 \text{ dBZ}} \geq 1,8 \text{ km}$ auf. Diese Höhe entspricht dem im nachfolgenden Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Kriterium nach Holleman et al. (2000).

4.3.3 Holleman-Kriterium

Das Holleman-Kriterium (Holleman et al., 2000) leitet sich direkt vom Waldvogel-Kriterium ab, verwendet als Schwellenwert aber einen Abstand von mindestens 1,76 km:

$$H(45 \text{ dBZ}) \geq H(0^\circ\text{C}) + 1,76 \text{ km.} \quad (4.11)$$

Auch hier kann, wie beim Waldvogel-Kriterium beschrieben, ab dieser Differenz der beiden Höhen von 1,76 km Hagel auftreten, die Wahrscheinlichkeit dafür ist aber sehr gering.

4.3.4 Auer-Kriterium

Auer (1994) benutzt zusätzlich zur Radarreflektivität die Temperatur der Wolkenobergrenze T_B (in $^\circ\text{C}$) und die Low-Level CAPPI Reflektivität Z_e :

$$2,6Z_e(\text{dBZ})^{-1} + T_B(^\circ\text{C}^{-1}) \geq 85. \quad (4.12)$$

Die Funktion muss dabei einen Schwellenwert von 85 überschreiten. Die Low-Level CAPPI Reflektivität ist der Scan mit der niedrigsten Elevationsstufe, wo der Radarstrahl alle Bereiche abdeckt. Hier wird die interpolierte 2 km Höhe über dem Radar als Low-Level CAPPI Reflektivität

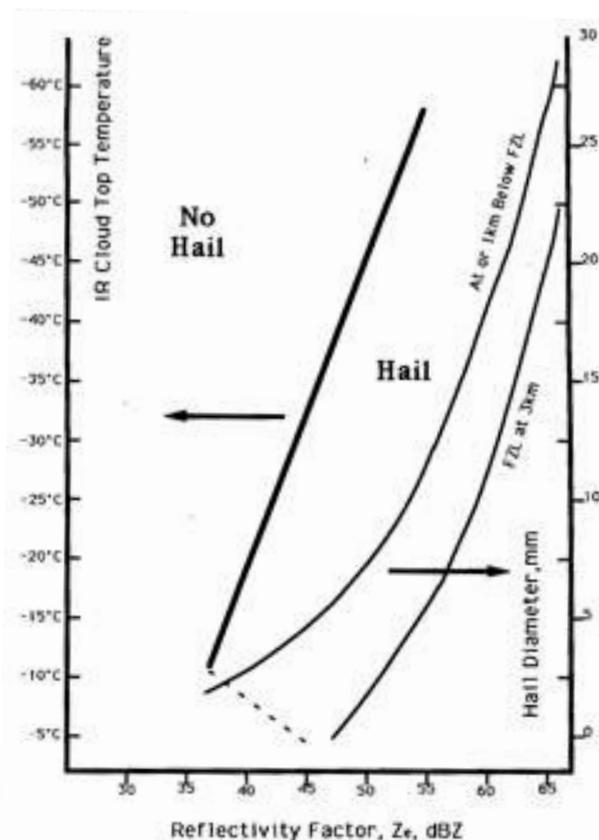


Abb. 4.2: IR-Wolkenoberflächentemperatur in °C (links) und Hagelkorndurchmesser in mm (rechts) als Funktion des Radarreflektivitätsfaktors in dBZ. Die Kurven zeigen das Auer-Kriterium für Hagel (fette Linie) den Durchmesser eines Hagelkorns in Höhe des Schmelz- bzw. Gefrierniveaus (FZL, engl. Freezing Level) bis einen Kilometer unterhalb (mittlere Kurve), sowie den Hageldurchmesser am Boden bei einer Höhe der 0° C -Grenze von 3 km (Auer, 1994).

genommen. Abbildung 4.2 zeigt neben dem eigentlichen Hagelkriterium (dicke Linie) den Durchmesser des fallenden Hagels in Höhe des Schmelzniveaus bis einen Kilometer unterhalb (linke dünne Linie) sowie den Durchmesser am Boden bei einem Schmelzniveau von 3 km (rechte dünne Linie) an. Nach Gleichung (4.12) muss, damit Hagel am Boden auftritt, bei einer Temperatur der Wolkenoberfläche von -30° C mindestens eine Reflektivität Z_e von 45 dBZ herrschen, bei Temperaturen unter -55° C sogar eine Reflektivität Z_e von fast 55 dBZ. Dabei tritt nach Auer (1994) ein Hageldurchmesser von über 20 mm am Boden bei 3 km Höhe der 0° C -Grenze ab einer Reflektivität von 65 dBZ im Low-Level CAPPI auf. Ist die Reflektivität dagegen bis 1 km unterhalb der 0° C -Grenze über 60 dBZ, kann schon in diesem Bereich Hagel einen Durchmesser von 20 mm aufweisen.

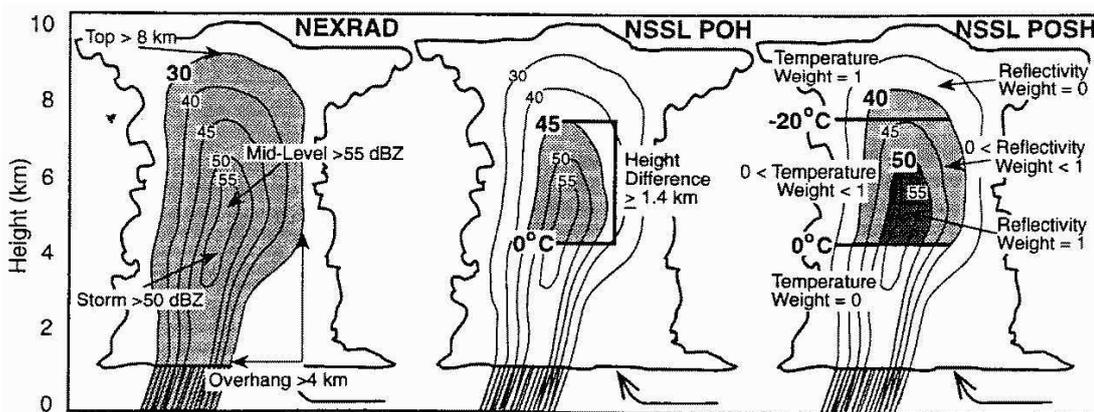


Abb. 4.3: Darstellung der Hagelkriterien in schematisch gezeichneten Gewitterzellen nach Kessinger und Smith (1995) (aus Holleman und KNMI., 2001). Von links nach rechts ist der HDA, das Kriterium nach Waldvogel und der POSH abgebildet.

4.3.5 Hageldetektionsalgorithmus

Für den Hageldetektionsalgorithmus (engl. Hail Detection Algorithm, HDA) nach Smart und Albery (1985) wird die Höhe des Echotops, also eine definierte Höhe der Gewitterzelle, und die Höhe der 50 dBZ Reflektivität benötigt. Die Höhe des Echotops wird durch geringe Reflektivitäten zwischen 7 dBZ und 30 dBZ, in dieser Arbeit bei 15 dBZ, festgelegt. Ist im Bereich zwischen 5 und 12 km die 50 dBZ Reflektivität zu finden und gleichzeitig die Höhe der Gewitterzelle mindestens 8 km hoch, so kann in diesem Gebiet Hagel fallen. Beim HDA wird die Reflektivität von über 50 dBZ zur Detektion von schmelzenden Eispartikeln verwendet. Mit der Höhe des Echotops wird überprüft, ob es sich dabei tatsächlich um hochreichende Konvektion handelt. Damit kann das „Helle Band“ bei stratiformen Niederschlägen ausgeschlossen werden. Beschrieben wird der HDA von Holleman et al. (2000), der in dieser Form für den Radarverbund Next Radar Generation (NEXRAD), dem Wetterradarsystem des amerikanischen Wetterdienstes, von Smart und Albery (1985) entwickelt wurde.

4.3.6 Wahrscheinlichkeit von schwerem Hagel

Die empirische Formel der Wahrscheinlichkeit von schwerem Hagel (engl. Probability of Severe Hail, POSH) von Witt et al. (1998) berechnet die Wahrscheinlichkeit von Hagel während eines Gewitters. Dazu wird über die Reflektivität zunächst der Energiefluss der hagelkinetischen Energie

$$\dot{E} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{0,084 \cdot Z} \cdot W(Z) \quad (4.13)$$

mit einer Wichtungsfunktion

$$W(Z) = \begin{cases} 0 & \text{für } Z \leq Z_L, \\ \frac{Z-Z_L}{Z_U-Z_L} & \text{für } Z_L < Z < Z_U, \\ 1 & \text{für } Z \geq Z_U \end{cases} \quad (4.14)$$

berechnet. Dabei sind $Z_L = 40$ dBZ und $Z_U = 50$ dBZ und Z die gemessene Reflektivität. Aus dem Integral über die Höhe zwischen der 0°C -Grenze und der Höhe der Gewitterzelle von dem berechneten Energiefluss und einer Gewichtung der Höhe der Reflektivität berechnet man im zweiten Schritt den „Severe Hail Index“, kurz SHI:

$$SHI = 100 \cdot \int_{H_0}^{H_{Echotop}} W_T(H) \dot{E} dH. \quad (4.15)$$

Die Wichtungsfunktion der Temperatur W_T berechnet sich dabei über die Höhe der 0°C -Grenze H_0 , der -20°C -Grenze H_{m20} und der Höhe der gemessenen Reflektivität H :

$$W_T = \begin{cases} 0 & \text{für } H \leq H_0, \\ \frac{H-H_0}{H_{m20}-H_0} & \text{für } H_0 < H < H_{m20}, \\ 1 & \text{für } H \geq H_{m20}. \end{cases} \quad (4.16)$$

Die eigentliche Hagelwahrscheinlichkeit wird dann über die Formel

$$POSH = 29 \cdot \ln\left(\frac{SHI}{W_T}\right) + 50 [\%] \quad (4.17)$$

berechnet. Dazu wird der natürliche Logarithmus aus dem SHI und der Funktion

$$WT = 57,5 \cdot H_0 - 121 \quad (4.18)$$

berechnet. Dabei werden die Ergebnisse von $POSH < 0$ auf 0% Hagelwahrscheinlichkeit und die Ergebnisse $POSH > 100$ auf 100% Hagelwahrscheinlichkeit gesetzt.

4.4 Auswertung über bebautem Gebiet

Für die Beispieltage im ersten Teil der Auswertung in Kapitel 5 liegen georeferenzierte Standorte der durch Hagel beschädigten Gebäude vor. Da große Teile des Untersuchungsgebiets unbesiedelt (Besiedlungsdichte Baden-Württemberg 12,1% in 2012) sind, wurde für die Auswertung der Hagelkriterien über das Untersuchungsgebiet die Landnutzung mit einer horizontalen Auflösung von $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ gelegt. Um die Schadendaten in UTM-Koordinaten mit den Hagelkriterien und den CORINE Landnutzungsdaten vergleichen zu können, wurden die Schadenmeldungen zunächst auf ein Gitter mit der gleichen Auflösung von $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ interpoliert. Damit besitzt die neue Matrix der Schadenmeldungen die gleiche Auflösung wie die Matrix des Ha-

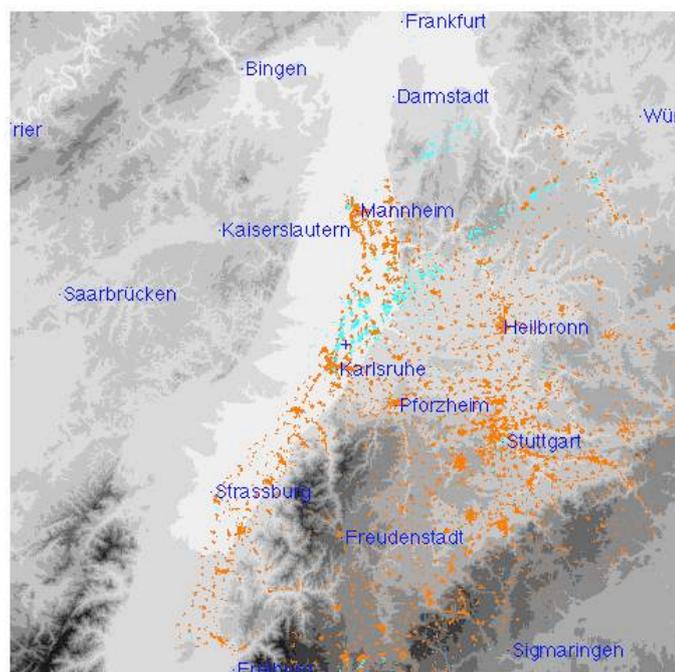


Abb. 4.4: Die Abbildung zeigt im baden-württembergischen Radargebiet die Bebauung (orange). Darüber gelegt sind die am 20.06.2002 gemeldeten Gebäudeschäden der SV SparkassenVersicherung (türkis). Die Auflösung beträgt hier $500\text{ m} \times 500\text{ m}$.

gelkriteriums und der Landnutzungsdaten. Für die Berechnung der Gütemaße wurden nur besiedelte Flächen zugelassen. Abbildung 4.4 zeigt beispielhaft die Gebäudeverteilung im baden-württembergischen Teil des Radargebiets mit allen gemeldeten Gebäudeschäden nach dem Hagelereignis am 20.06.2002. Deutlich ist dabei die Struktur der Besiedlung anhand der gemeldeten Hagelschäden an Gebäuden zu erkennen.

4.5 Kriterien zur Erfüllung eines Ereignisses

Zur Berechnung der verschiedenen Gütemaße nach der Kontingenztabelle (Tabelle 4.1) wird wie folgt vorgegangen. Über jeden Punkt der Matrix mit den Radardaten im Untersuchungsgebiet wird ein Quadrat mit einer Kantenlänge von 3 km, 5 km und 10 km gelegt (vgl. Abbildung 4.5). Die Kantenlänge wurde dabei so gewählt, dass eine mögliche Verdriftung des Hagels während der Fallstrecke zum Boden hin mit einbezogen wird. Schuster et al. (2006) beispielsweise haben gezeigt, dass durch auftretende Böen Hagel um mehrere Kilometer verdriften kann.

Zunächst wird an jedem Punkt überprüft, ob das Hagelkriterium erfüllt ist. Ist dies der Fall, gibt es zwei Unterscheidungen. Ist in der schraffierten Quadratsfläche ein Schaden aufgetreten, wird es als positives Ereignis gewertet (Kontingenztabelle Kategorie a); ist dies nicht der Fall, zählt es als vorhergesagt, aber nicht eingetreten (Kategorie b). Ist an dem überprüften Punkt das Hagelkriterium nicht erfüllt, wird wiederum die schraffierte Fläche auf Schaden überprüft. Ist auch hier ein Schaden gemeldet, wird dies als nicht vorhergesagt, jedoch eingetroffen gewertet (Kategorie

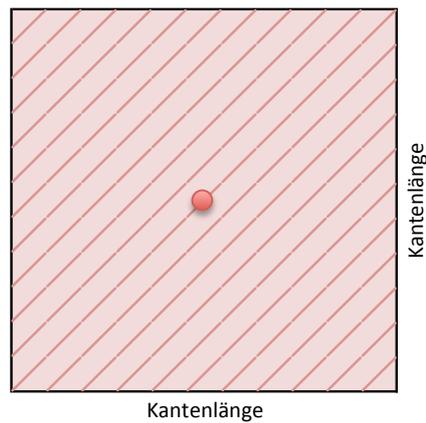


Abb. 4.5: Die Grafik stellt die Auswertungsmethode dar, näheres siehe Text.

c). Bei keiner Schadenmeldung ist es ein positives Nicht-Ereignis (Kategorie d). Bei dieser Methode bleibt also die Anzahl der Schadenmeldungen unberücksichtigt. Es wird nur überprüft, ob ein Schaden im Gebiet aufgetreten ist oder nicht. Durch diese Vorgehensweise ist der Einfluss der Vulnerabilität der Gebäude auf die Ergebnisse minimiert.

5. Fallstudien

Im ersten Teil der Auswertung werden an vier Fallbeispieltagen (20.06.2002, 16.07.2003, 24.06.2005 und 29.07.2005) die im vorherigen Kapitel diskutierten Hagelkriterien auf die Daten des C-Band Radars angewendet und deren Charakteristika untersucht.

Dabei wird auf zwei grundlegende Auswertemethoden zurückgegriffen. Im Abschnitt 5.2 erfolgt zunächst eine quantitative Betrachtung der Hagelkriterien. Zudem werden für einen Einzelfall die Daten durch mögliche Dämpfungseffekte korrigiert und die von Schuster et al. (2006) beobachtete horizontale Verdriftung der Hagelkörner untersucht. Im Abschnitt 5.3 erfolgt die statistische Auswertung der Hagelkriterien mit Hilfe verschiedener Gütemaße nach der kategoriellen Verifikation (Kapitel 4.2).

Für die Auswahl der Fallbeispiele sind zum einen verschiedene Gewittersysteme und deren Schadenanzahl relevant, zum anderen das Vorliegen der georeferenzierten Schadendaten. Als Fallbeispiele werden der 16.07.2003 mit einer Multizelle und einer mittleren Schadenanzahl, eine Superzelle am 29.07.2005 und eine Gewitterlinie am 20.06.2002 mit jeweils einer sehr hohen Schadenanzahl sowie ein schwaches Hagelgewitter am 24.06.2005 mit einer sehr geringen Anzahl gemeldeter Gebäudeschäden betrachtet. Die Klassifizierung der Gewittersysteme erfolgt über die MaxCappis der Radardaten in einzelnen Zeitschritten. In Abbildung A.1 sind die MaxCappis für den gesamten Tag ab einer Reflektivität von 40 dBZ aufgetragen. Dadurch kann ein grober Überblick über die Zugbahnen von konvektiven Zellen gewonnen werden.

5.1 Synoptische Beschreibung der Hageltage

Am 20.06.2002 lag Baden-Württemberg vorderseitig eines Troges, dessen Achse sich im Laufe des Tages von Westen her annäherte. Zudem befand sich ein Randtief über dem Nordwesten Deutschlands. Die Temperaturen stiegen an diesem Tag auf Werte von über 30° C. Durch positive Vorticityadvektion und Schichtdickenadvektion kam es gemäß der Omegagleichung (Gl.2.27) zu großräumiger Hebung. Durch die Advektion feucht-warmer Luftmassen mit einer Südwestströmung war das Gewitterpotential mit CAPE-Werten zwischen 2400 und 2600 J kg⁻¹ sehr hoch. Vorderseitig der Kaltfront des Randtiefs bildete sich am Nachmittag eine Gewitterlinie aus, die das baden-württembergische Radargebiet ab 15:30 MESZ überquerte.

Auch am 16.07.2003 lag das Untersuchungsgebiet vorderseitig eines Troges und im Einflussbereich eines Tiefdruckgebiets am Boden, die zu einer starken Winddrehung mit der Höhe führte.

Die CAPE an diesem Tag war mit etwa 1200 J kg^{-1} ebenfalls recht hoch. Nachmittags konnte sich dann ein Multizellen-Gewitter im Tal zwischen Schwarzwald und Schwäbischer Alb ausbilden, welches sich durch die Entstehung und sein Zerfall im Radargebiet auszeichnete.

Ein Beispiel für sehr geringe Hagelschäden an Gebäuden ist der 24.06.2005. Dieses Gewitter ist zudem im Untersuchungsgebiet entstanden und zerfallen. Die großräumige Wetterlage wurde an diesem Tag durch ein Randtief im Westen und einem schwachen Tiefdruckgebiet am Boden beeinflusst, so dass über dem gesamten Gebiet großräumige Hebung vorherrschte. Dazu wurden CAPE-Werte bis 1600 J kg^{-1} erreicht.

Am Fallbeispieltag 29.07.2005 bildete sich bereits in der Schweiz eine Superzelle, die über Basel und Villingen-Schwenningen in das Untersuchungsgebiet zog. An diesem Tag befand sich um 12 UTC Süddeutschland vorderseitig eines Trogens mit Achse über Westfrankreich und einem schwachen Tiefdruckgebiet am Boden. Es herrschte eine starke Vertikalbewegung und eine große Windscherung mit der Höhe vor. Die Superzelle entwickelte sich vorderseitig einer Kaltfront, die im Laufe des Abends über Deutschland hinweg zog.

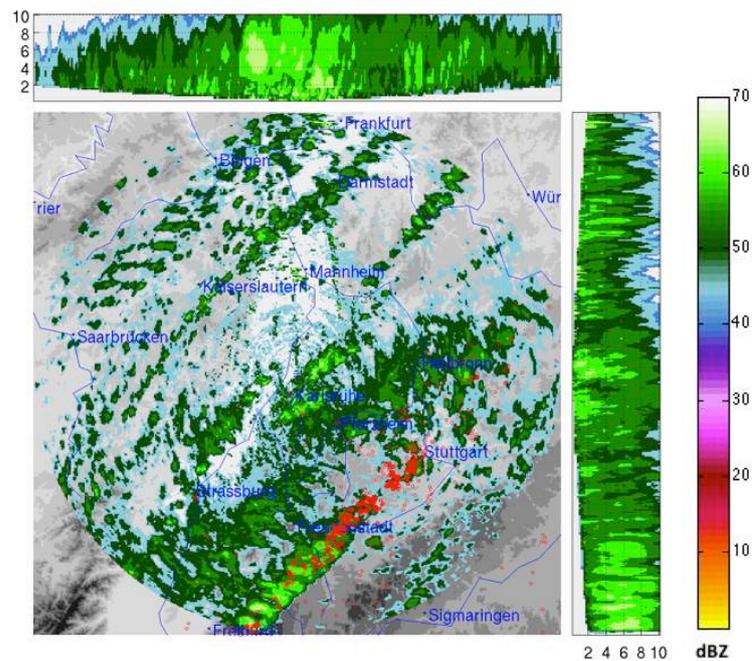
5.2 Zusammenhang zwischen Hagelkriterien und Gebäudeschäden

Zunächst werden für die gewählten Beispieltage die verschiedenen Hagelkriterien berechnet und den Schadenereignissen der SV gegenüber gestellt. Dabei erfolgt die Auswertung zunächst qualitativ. Bei allen folgenden Darstellungen ist zu berücksichtigen, dass das gesamte Radargebiet abgebildet ist, die Auswertung jedoch nur über dem Baden-Württembergischen Teil stattfindet.

Beispielhaft für alle Fallbeispiele wird in den Abbildungen 5.1, 5.2 und 5.3 der Hagelzug der Superzelle am 29.07.2005 gezeigt. Das MaxCappi (Abbildung 5.1) stellt zur Übersicht die Niederschlagssituation ab einer Reflektivität von 40 dBZ und die gemeldeten Hagelschäden an Gebäuden (rote Punkte) für diesen Tag dar. Es sind einige Gewitterzugbahnen von südwest nach nordost erkennbar, unter anderem auch die der Superzelle mit teilweise sehr hohen Reflektivitäten.

In Abbildung 5.2a sind das Waldvogel-Kriterium (blau) und die Schadenmeldungen (Punkte) aufgetragen. Die Farbe der Schadenmeldungen gibt eine bestimmte Schadensumme in Euro an. Rot gekennzeichnet sind alle Schäden über 1000 €, gelb alle Schäden im Bereich zwischen 100 € und 1000 € und grün alle Schäden von weniger als 100 € (sehr geringe Anzahl). Die Verteilung der Farben zeigt, dass im Haupthagelzug hauptsächlich hohe Schäden, aber auch einige mittlere und vereinzelt geringe Schäden zu finden sind. Zudem sind auch hohe Hagelschäden als auch mittlere Schäden in den Randgebieten verzeichnet.

Allgemein lässt sich das Kriterium von Waldvogel (Waldvogel et al., 1979) als relativ niederschwellig beschreiben, so dass viele Gebiete auch markiert werden, obwohl dort keine Hagelschäden gemeldet wurden. Besonders deutlich ist dies in den Gebieten um Heilbronn und südöstlich von Straßburg. Eine mögliche Ursache ist, dass der Schwellenwert sehr niedrig gewählt ist. In Abbildung 5.1 ist bei den MaxCappis der Höhen (über und rechts der Hauptabbildung) die



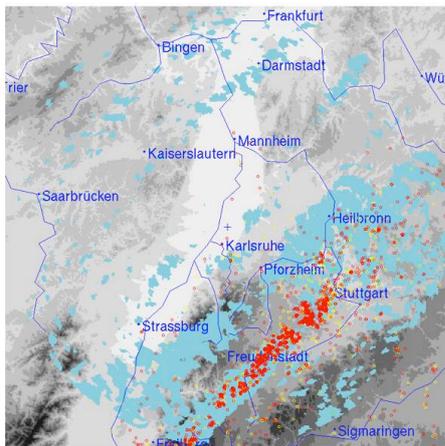
(a) Maxcappi-Plot vom 29.07.2005

Abb. 5.1: MaxCappi ab 40 dBZ am 29.07.2005 und die dazu gemeldeten Versicherungsschäden an Gebäuden.

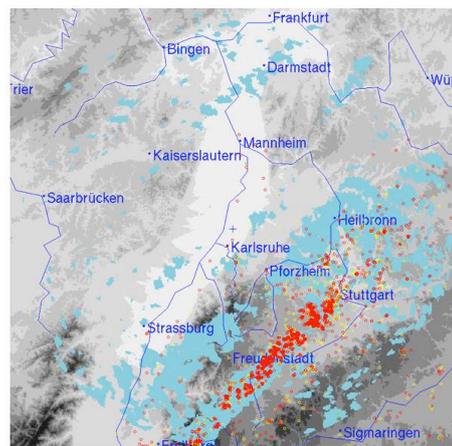
45 dBZ Reflektivität immer über 4 km hoch. Aus diesem Grund wird am Ende dieses Abschnitts eine Variation des Waldvogel-Kriteriums vorgestellt und diskutiert.

Das Kriterium nach Holleman in Abbildung 5.2b ist dem des Kriteriums nach Waldvogel sehr ähnlich, so dass auch deren räumliche Verteilungen sehr ähnlich sind. Da die vertikale Auflösung der Radardaten jedoch bei 250 m liegt und die Differenz ($H_{45\text{ dBZ}} - H_{0^\circ\text{C}}$) zwischen dem Waldvogel-Kriterium und dem Holleman-Kriterium nur 360 m beträgt, wird das Holleman-Kriterium teilweise nicht öfter erfüllt. So detektiert auch hier das Kriterium wesentlich häufiger eine Wahrscheinlichkeit für Hagel als tatsächlich durch Schäden an Gebäuden nachweisbar sind. Wegen der Ähnlichkeit zum Waldvogel-Kriterium wird das Holleman-Kriterium in den nächsten Auswertungen nicht mehr berücksichtigt.

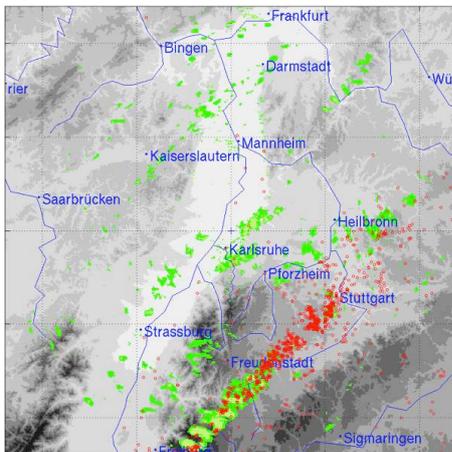
Das Kriterium nach Mason (Abbildung 5.2c) ist im Fall des 29.07.2005 über deutlich geringeren Gebieten erfüllt als die Kriterien nach Waldvogel oder Holleman. Auch gut zu erkennen ist, dass hier einige Gebiete mit Schadenmeldungen nicht erfasst werden. Dies sind vor allem Gebiete um Pforzheim und nordöstlich von Stuttgart. Auch der Hauptteil der Schäden im Bereich südlich von Stuttgart wird durch das Kriterium nicht erfasst. Die Gründe hierfür sind zum einen das Abschatten der Superzelle durch parallel ziehende Gewitterzelle im Radarstrahl, und zum anderen ein weiteres Gewitter innerhalb eines Messzeitpunkts über dem Radar, das zu einer Dämpfung des gesamten Signals aufgrund des Wasserfilms auf dem Radom führt. Das Mason-Kriterium zeigt eine Unterschätzung des Hagelgebiets, da gerade bei Abschattungseffekten sehr schnell der 55 dBZ Schwellenwert unterschritten wird.



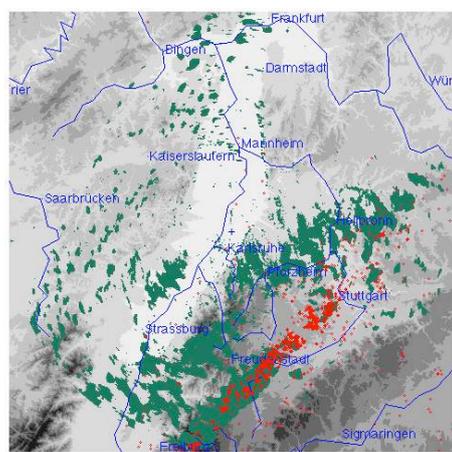
(a) Waldvogel-Kriterium



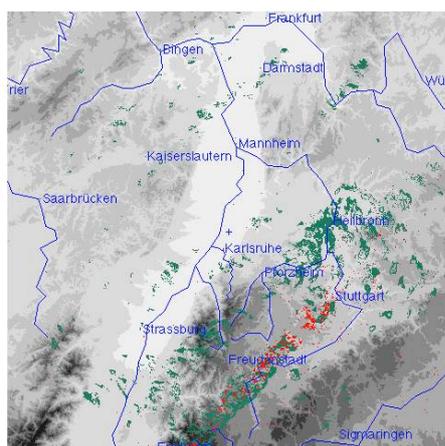
(b) Hollman-Kriterium



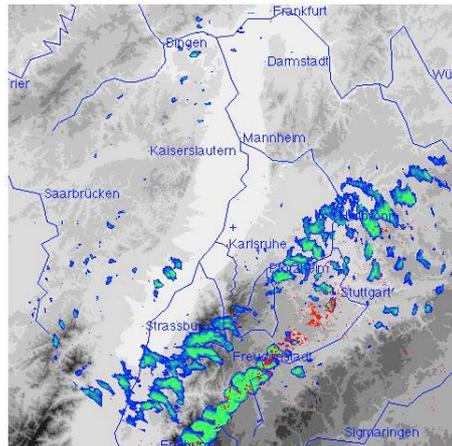
(c) Mason-Kriterium



(d) Auer-Kriterium



(e) Hail-Detection-Algorithm



(f) POSH ab einer Wahrscheinlichkeit von 50%

Abb. 5.2: Verschiedenen Hagelkriterien am 29.07.2005. Die eingefärbten Gebiete stellen die Gegenden mit dem jeweiligen erfülltem Hagelkriterium dar, die roten Punkte sind die gemeldeten Gebäudeschäden der SV SparkassenVersicherung.

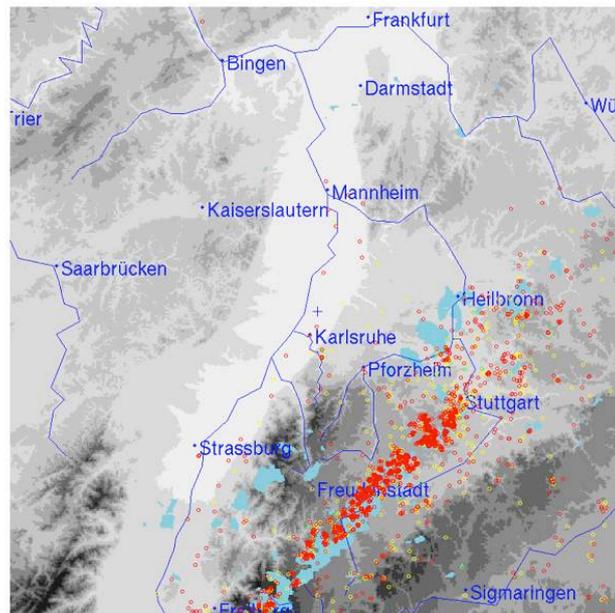


Abb. 5.3: Verändertes Kriterium nach Waldvogel mit einer Mindesthöhe der 45 dBZ Reflektivität von $\Delta H_{45} > 4,5$ km am 29.07.2005.

Das Auerkriterium (Abbildung 5.2d) zeigt ein ganz anderes Detektionsmuster. Besonders Zellen, die ins Dissipationsstadium übergehen, oder durch andere Gewitterzellen abgeschattet werden, können mit diesem Kriterium teilweise noch berücksichtigt werden. So werden nun einige Bereiche mit Hagelschaden detektiert, die mit Hilfe des Waldvogelkriteriums auf Grund der Abschattung oder der starken Dämpfung durch Starkniederschlag über dem Radom oder im Gebiet nicht erfasst werden. Grund für die teilweise bessere Detektierung oder Erkennung anderer Gebiete mit möglichem Hagelschlag könnte die Verwendung der Reflektivität im Low-Level CAPPI sein.

Der hier verwendete HDA (Abbildung 5.2e) detektiert die Gebiete mit möglichem Hagel gut. Außerdem kann der HDA am besten die Linie der Hagelschaden annähernd wiedergeben. Die falsche Zuordnung über Gebieten ohne Hagelschäden ist deutlich geringer im Vergleich zu den anderen Kriterien. Dies kann daran liegen, dass der Schwellenwert mit 50 dBZ über 5.000 m recht hoch gewählt ist und so die schwächeren Gewitterzellen nicht wie bei den anderen Kriterien fälschlicher Weise detektiert werden.

In Abbildung 5.2f ist die POSH ab einer Hagelwahrscheinlichkeit von 50% dargestellt. Die hier verwendete Farbskala reicht von blau $\hat{=}$ 50% bis hell-grün $\hat{=}$ 100% Wahrscheinlichkeit. Im direkten Vergleich mit den anderen Kriterien fällt auf, dass über wesentlich weniger Flächen Hagel detektiert wird. Die nun fehlenden nicht detektierten Flächen entsprechen hier schwachen Gewittern, die keinen Hagel mit Gebäudeschäden verursachten und somit mit diesem Kriterium in diesem Beispielfall gut herausgefiltert werden. Jedoch werden auch einige Gebiete mit Hagelschlag südwestlich von Stuttgart nicht erfasst. Dies ist teilweise auch der Fall, wenn die Hagelwahrscheinlichkeit ab 20% dargestellt wird (Abbildung A.2).

Das angepasste Waldvogelkriterium (Abbildung 5.3), wie in Kapitel 4.3 beschrieben, ist bei der

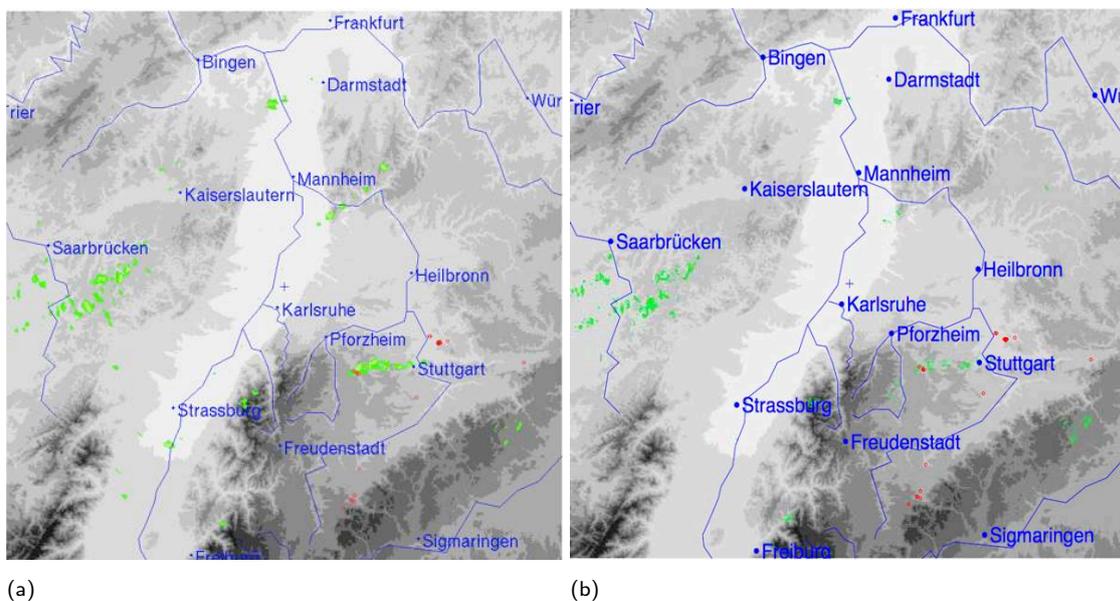


Abb. 5.4: Daten des Kriteriums nach Mason (a) und HDA (b) mit Gebäudeschäden (rote Punkte) am 24.06.2005.

Höhe der 45 dBZ Reflektivität verändert worden. In diesem Fall ist nun $\Delta H_{45dBZ} \geq 4,5$ km (statt 1,4 km) angesetzt. Dadurch können einige Gebiete, die in Abbildung 5.2a noch möglichen Hagelschlag angezeigt haben, herausgefiltert werden. Jedoch sind auch im Bereich des eigentlichen Hagelzugs Gebiete wie beispielsweise südwestlich von Stuttgart mit diesem Hagelkriterium nun nicht mehr erfüllt. Im Abschnitt über die statistische Auswertung (Kapitel 5.3) erfolgt eine erweiterte Variation des Kriteriums nach Waldvogel.

Das Gewitter am 24.06.2005 ist im Vergleich zu den anderen Fallbeispieltagen ein sehr schwaches Hagelereignis mit nur wenigen Gebäudeschäden. Alle Hagelkriterien können hier nur die Gebiete mit den Gebäudeschäden westlich von Stuttgart detektieren, exemplarisch für das Mason-Kriterium und den HDA in Abbildung 5.4 dargestellt. Bei der Betrachtung des MaxCappi (Abbildung A.1) zeigt sich, dass die anderen Schäden außerhalb der stärksten Reflektivität ≥ 40 dBZ liegt und somit nicht von den Kriterien erfasst werden können. Diese nicht detektierbaren Gebäudeschäden treten auch an den anderen Fallbeispieltagen auf und werden im Abschnitt 5.2.3 näher untersucht.

5.2.1 Überprüfung und Auswertung der Verdriftung von Hagel mittels Winddaten

Die Abbildungen 5.5a (Mason-Kriterium) und 5.5b (MaxCappi ab einer Radarreflektivität von 40 dBZ) zeigen eine leichte Abweichung von etwa 1 bis 2 km des Hagelschlags zur höchsten gemessenen Radarreflektivität am 20.06.2002. Um zu überprüfen, ob diese horizontale Verdriftung des Hagels durch starke bodennahe Windgeschwindigkeiten während des Gewitters entsteht, werden die Winddaten des Messmasts vom IMK am 20.06.2002 untersucht. Diese Überprüfung mit

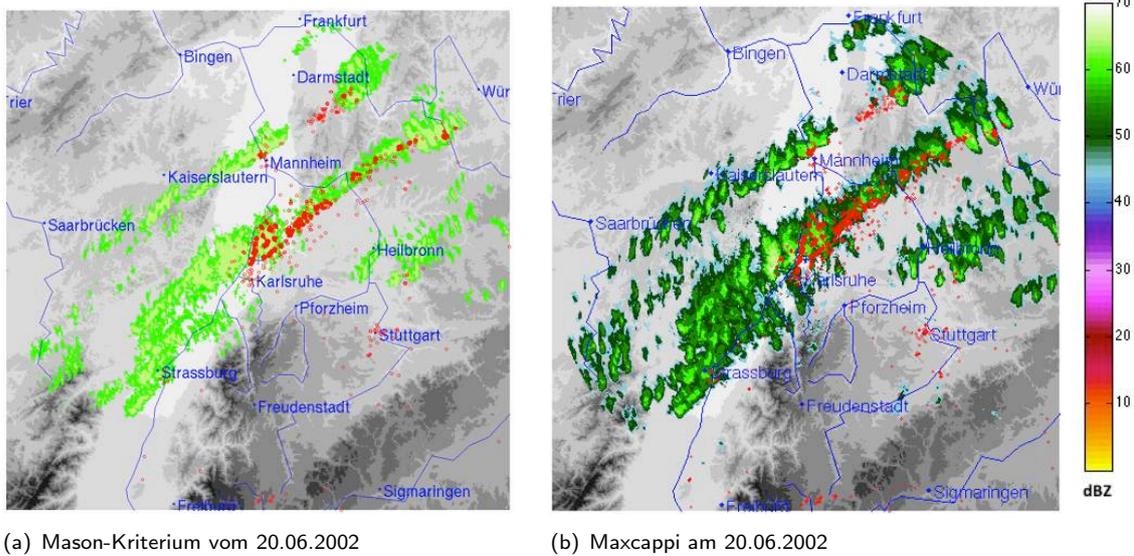


Abb. 5.5: Mason-Kriterium (a) und MaxCappi (b) mit Gebäudeschäden für den 20.06.2002.

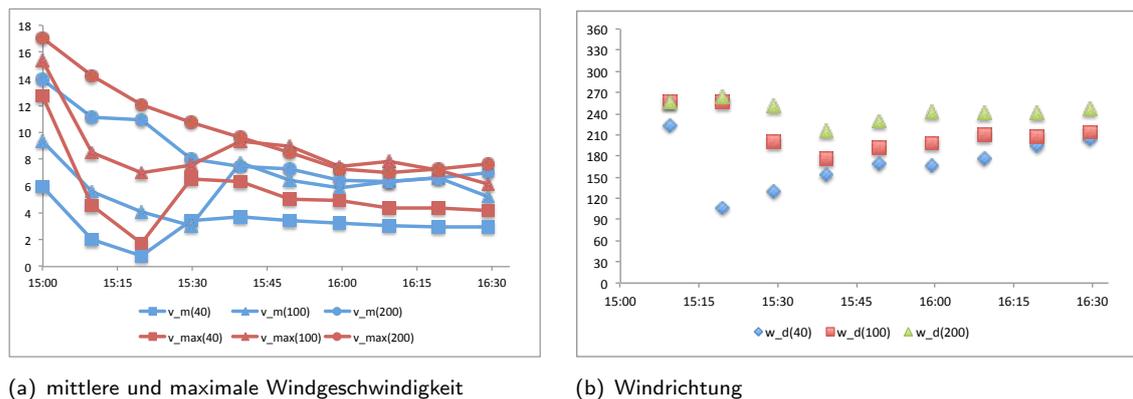


Abb. 5.6: Darstellung der mittleren und maximalen Windgeschwindigkeit sowie der Windrichtung in den Höhen 40, 100 und 200 m zum Zeitpunkt des Überquerens der Gewitterlinie über das Radar von 15:00 bis 16:30 MESZ.

Hilfe der Winddaten wird nur am 20.06.2002 durchgeführt, da in keinem weiteren Fallbeispiel ein Gewitter mit Hagelbildung über den Messmast hinweg gezogen ist. Zusätzlich wird eine mögliche Verdriftung des Hagels mit der Methode des Auswertungsquadrats aus Kapitel 4.5 berücksichtigt. Die verschiedenen Winddaten von mittlerer Windgeschwindigkeit, maximal gemessener Windgeschwindigkeit sowie die Windrichtung in den Höhen von 40, 100 und 200 m sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Die einzelnen Werte können in der Tabelle A.1 im Anhang nachgelesen werden. Die mittlere Windgeschwindigkeit bezieht sich dabei auf das 10 min-Mittel. Die Abbildungen 5.7 und 5.8 zeigen zu jedem Messzeitpunkt des MaxCappi und die dazugehörige Windrose in 200 m Höhe. Die Abbildungen 5.7 (a)-(c) zeigen die Hagelzelle westlich von Karlsruhe. Hier ist der Wind von 15:00 bis 15:20 Uhr zunächst mäßig, dann schwach, und die Windrichtung dreht von 300° auf etwa 110° in 40 m Höhe und von etwa 280° auf ca. 260° in 200 m. Ab 15:30 Uhr frischt

der Wind wieder etwas auf und bleibt im Mittel bei etwa 3 bis 4 m s^{-1} in 40 m , um 6 m s^{-1} in 100 m und bei ungefähr 7 m s^{-1} in 200 m . Die markante Rechtsdrehung des Windes um $15:40$ Uhr deutet den Durchgang der Gewitterlinie an. Der Wind dreht in 200 m Höhe von 250° um $15:30$ Uhr zunächst auf 216° um $15:40$ Uhr, um dann auf etwa 240° ab $16:00$ Uhr zu drehen. Um $15:45$ Uhr erreicht die Gewitterzelle den Radarstandort. Hierbei werden um $15:40$ Uhr und $15:50$ Uhr die höchsten Windgeschwindigkeiten in 100 m -Höhe gemessen. Die maximale Windgeschwindigkeit während des Gewitterdurchgangs ist allerdings nicht markant höher und in den Höhen von 200 m und 40 m sogar niedriger. Es werden also keine gewitterbedingten Starkwindböen in diesen Höhen aufgezeichnet. Nach Durchzug der Zelle nimmt die Windgeschwindigkeit noch leicht ab und der Wind dreht auf Südwest. Der Wind in 200 m Höhe bzw. die Messungen darunter erklären somit nicht die Verdriftung des Hagels. Da jedoch 200 m relativ niedrig sind, kann es sein, dass die Winddrehung in der Höhe noch weiter auf Westwind fortführt. Dies lässt sich aber mit den vorhandenen Daten nicht zeigen. Wäre dies wiederum der Fall, könnten Hagelkörner aus der Zelle, deren Zugbahn Richtung Nordosten verläuft, durch den Wind nach Osten verdriften und scheinbar in der Abbildung des gesamten Tages südlich der Zugbahn zu Boden fallen. Abbildung 5.9 zeigt schematisch den Verlauf der Zugbahn, die vorherrschende Windrichtung und die entstandenen Schäden. Dabei soll verdeutlicht werden, dass der Westwind die Schäden bei ganztägiger Betrachtung südlich der Zugbahn erscheinen lässt. Wird dagegen jeder Zeitpunkt einzeln betrachtet, befinden sich die Gebäudeschäden östlich der Zelle.

5.2.2 Korrektur der Dämpfung und deren Einfluss

Eine zu niedrig gemessene Reflektivität durch Dämpfungseffekte führt häufig dazu, dass Hagel Schlag nicht detektiert werden kann. In diesem Abschnitt wird die Dämpfung durch einen Wasserfilm auf dem Radom am Fallbeispiel des 20.06.2002 von $15:45$ bis $16:00$ MEZ näher untersucht. Um die Dämpfung auszugleichen, wird zu diesem Zeitpunkt für das komplette Radargebiet die gemessene Radarreflektivität um 10 dBZ angehoben. Die 10 dBZ werden daher gewählt, da in Abbildung 5.7d die Reflektivität der Zelle bei über 70 dBZ liegt, dann in Abbildung 5.7e um etwa 10 dBZ abnimmt und in Abbildung 5.8a sich wieder um etwa 10 dBZ erhöht. Die Abbildung 5.10 zeigt das MaxCappi mit und ohne Ausgleich der Dämpfung. Mit dieser Methode kann eine Verbesserung der Werte der gemessenen Radarreflektivitäten erzielt werden. Somit werden nun zusätzlich in anderen Gebieten die Hagelkriterien nach Waldvogel, Holleman und der HDA erfüllt, da diese sich über bestimmte Werte verschiedener Radarreflektivitäten berechnen. Es kann aber nicht in allen Gebieten eine Verbesserung erreicht werden, vor allem in Bereichen, die eine zusätzliche Dämpfung der Reflektivität durch vorgelagerte hochreichende Konvektion erfahren. So wird in Abbildung 5.7f der Radarstrahl noch zusätzlich durch die Zelle direkt nördlich des Radars so stark gedämpft, dass die Gewitterzelle südlichwestlich von Darmstadt mit einer Reflektivität unter 45 dBZ detektiert wird, und daher in dieser Abbildung nicht mehr dargestellt ist. In diesem Fall ist es jedoch nicht möglich, dies auszugleichen. Eine automatische Anhebung der Reflektivität bei Starkniederschlägen über dem Radom wurde aufgrund der damit verbundenen hohen Rechenzeit nicht implementiert.

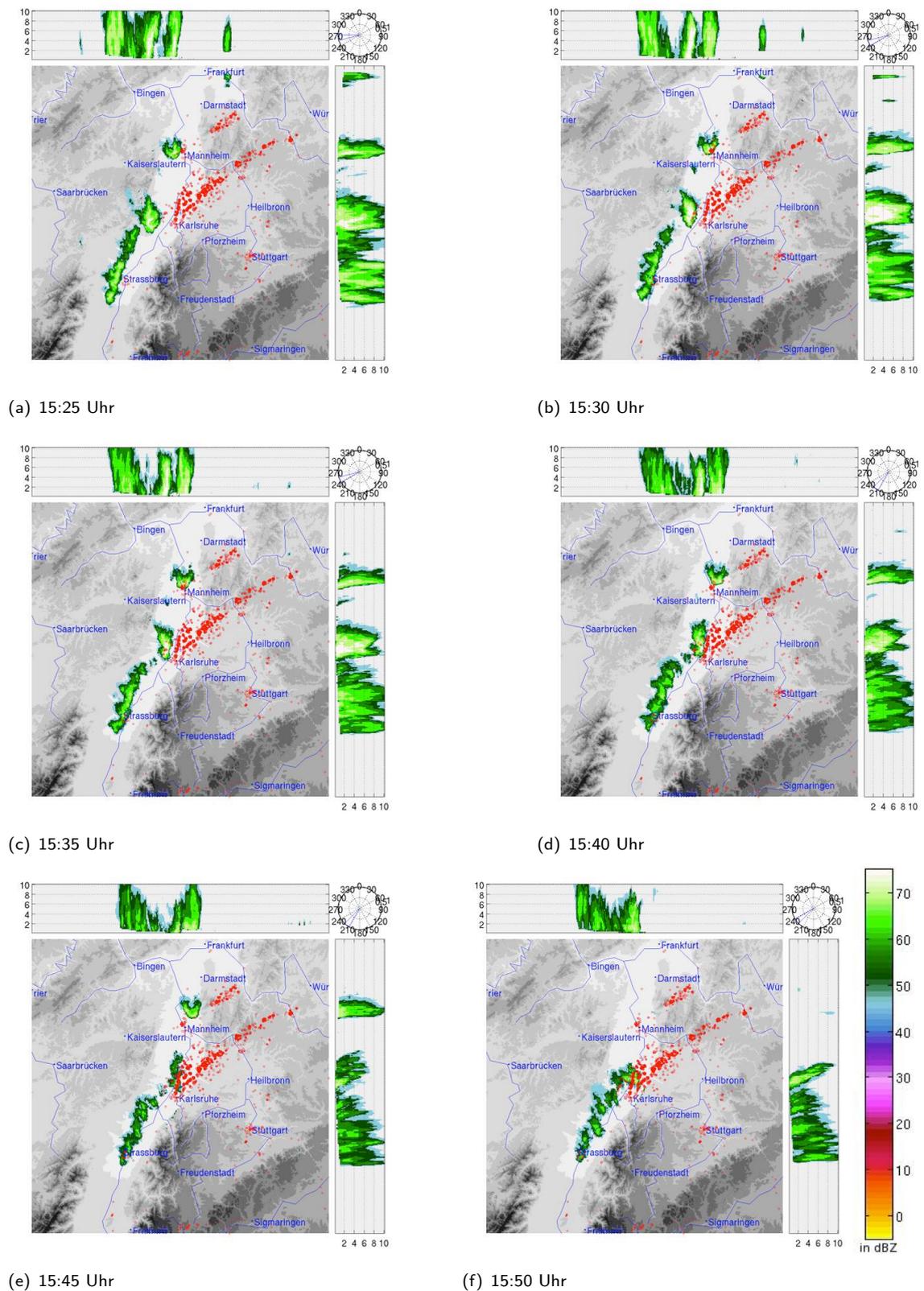
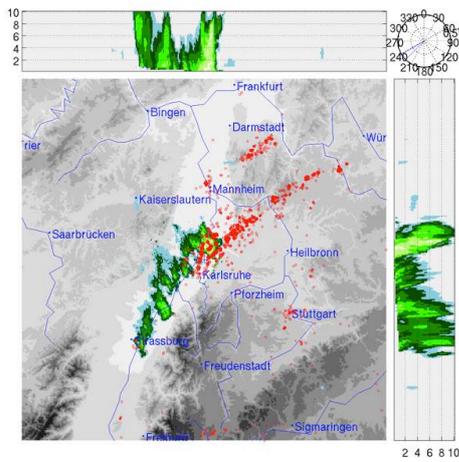
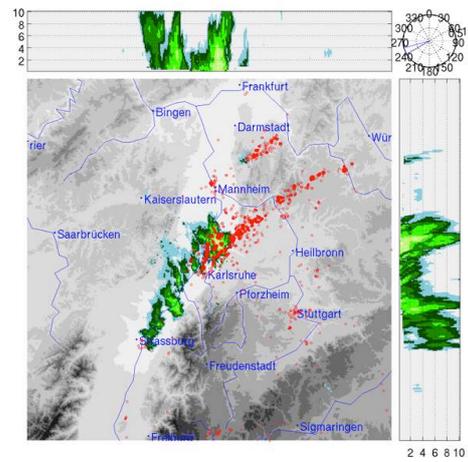


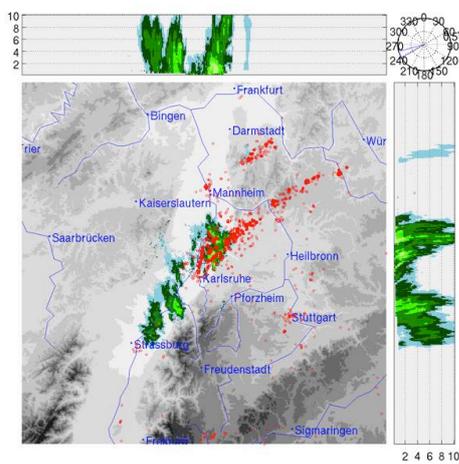
Abb. 5.7: Darstellung der einzelnen MaxCappis zu den angegebenen Uhrzeiten in MESZ am 20.06.2002. In der rechten oberen Ecke befindet sich die Windrose für den Wind in 200 m Höhe.



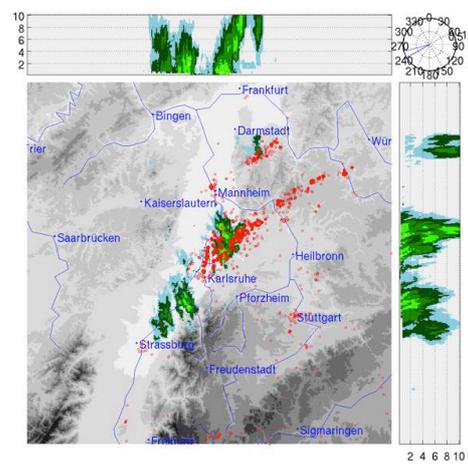
(a) 15:55 Uhr



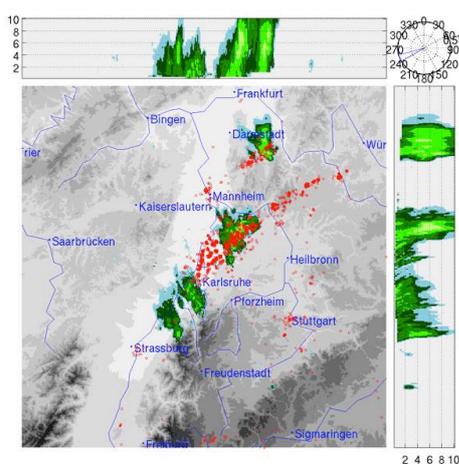
(b) 16:00 Uhr



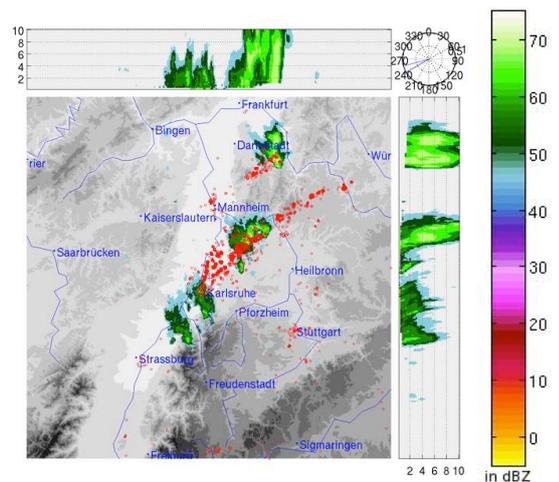
(c) 16:05 Uhr



(d) 16:10 Uhr



(e) 16:15 Uhr



(f) 16:20 Uhr

Abb. 5.8: Wie Abbildung 5.7, aber für andere Uhrzeiten in MESZ.

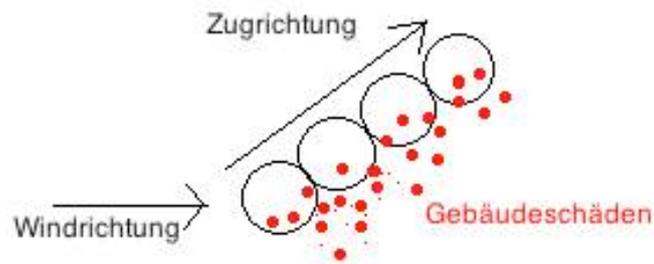


Abb. 5.9: Skizze der Zugbahn des Gewitters am 20.06.2002 mit der Windrichtung und den Gebäudeschäden.

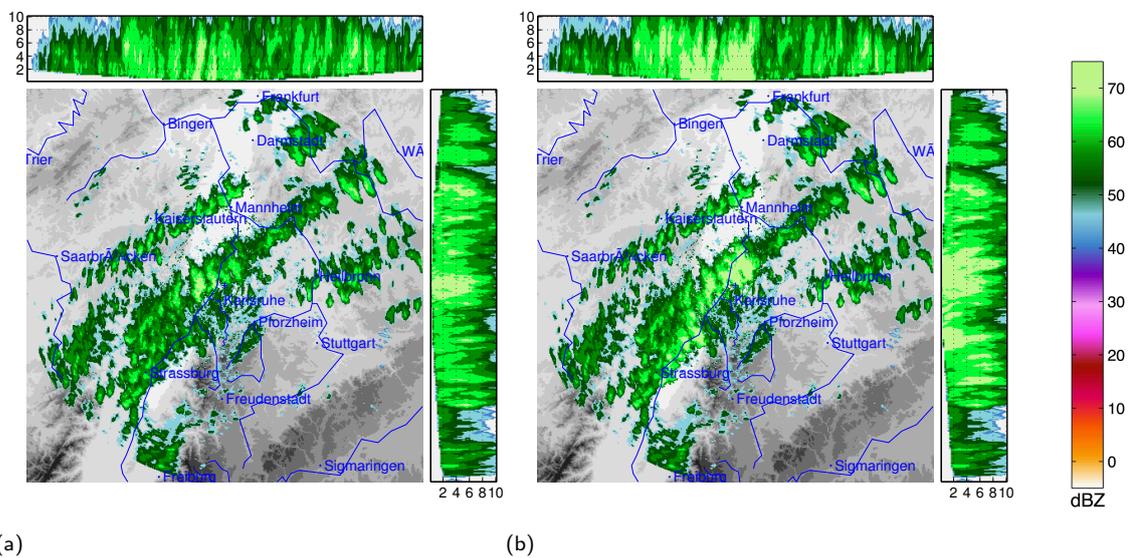


Abb. 5.10: MaxCappi vom 20.06.2002 ohne (a) und mit Korrektur der Dämpfung (b), dargestellt ab einer Reflektivität von 45 dBZ.

(südlich von Straßburg) zeigt beispielhaft Schadenmeldungen, die trotz der bereits beschriebenen Effekten nicht zugeordnet werden können. Insgesamt liegt die Anzahl aber unter 20 Schäden. Möglich wäre, dass diese Schäden nicht durch Hagel, sondern durch ein anderes Elementarereignis wie Sturmböen oder Starkniederschlag verursacht sind. Außerdem ist Versicherungsbetrug eine Möglichkeit, die sich allerdings nicht herausfiltern läßt. Da die nicht zuordenbaren Gebäudeschäden nur einen geringen Anteil der Gesamtschäden ausmachen, können diese hier vernachlässigt werden, müssen aber bei der statistischen Auswertung in Bezug auf die Kontingenztabelle berücksichtigt werden. Es wird im Folgenden aber auf die Zusammenlegung mehrerer Tage bei der statistischen Auswertung mittels Kontingenztabelle verzichtet, da in diesem Fall auch die Schäden für alle Tage vorliegen müssen. Da die genauen Schadenpositionen nicht für jeden Tag vorhanden sind, wird darauf verzichtet.

5.3 Statistische Auswertung der Fallbeispiele

5.3.1 Auswertung für die gesamten Fläche des Untersuchungsgebiets

Für das Untersuchungsgebiet werden für die Hagelkriterien nach Waldvogel, Mason und Auer, sowie für den HDA und die POSH die verschiedenen Gütemaße aus der Kontingenztabelle berechnet. Dabei wird für alle Fälle das Auswertungsquadrat mit den Kantenlängen von 3, 5 und 10 km verwendet (Abbildung 4.5). Im Folgenden werden die einzelnen Kriterien diskutiert. Die dort präsentierten Werte beziehen sich auf ein Auswertungsquadrat der Kantenlänge 10 km.

In Tabelle 5.1 sind die berechneten Qualitätsmaße für das Kriterium nach Waldvogel für die vier Beispieltage dargestellt. Der frequency Bias deutet mit den Werten > 1 in allen Fällen auf eine zu häufige Vorhersage, also zu häufige Detektion von Hagel durch das Kriterium gegenüber der Beobachtung hin. Nur am 29.07.2005 ist der frequency Bias mit 1,57 vergleichsweise niedrig und deutet auf eine recht gute Übereinstimmung der Schadendaten mit der detektierten Fläche hin. Auch für die FAR und den HSS sind die Werte vom 29.07.2005 am niedrigsten bzw. höchsten, für die anderen Tage deuten die Werte eine nicht optimale Vorhersage mit relativ hohen bzw. niedrigen Werten an. Die Berechnung der statistischen Werte beim Mason-Kriterium (Tabelle 5.2) ergibt im Allgemeinen für die Gütemaße etwas höhere Werte. Die FAR liegt hier bei den Tagen 20.06.2002, 16.07.2003 und 29.07.2005 um ca. 0,1 niedriger und deutet auf eine etwas bessere positive Vorhersage hin. Auch der ETS, mit dem zufällige Treffer herausgerechnet werden, ist mit Werten zwischen 0,47 und 0,66 nur mittelmäßig, aber besser als beim Waldvogel-Kriterium. Dies wird auch vom HSS und dem frequency Bias bestätigt. Das Kriterium nach Auer (Tabelle 5.3) erzielt hier auch nur mittelmäßige Werte, hat aber für den 20.06.2002 eine leichte Verbesserung gegenüber dem Waldvogel-Kriterium. Die anderen Tage erzielen dagegen etwas schlechtere Werte gegenüber dem Waldvogel-Kriterium. Der HDA (Tabelle 5.4) und die POSH (Tabelle 5.5) mit einer Hagelwahrscheinlichkeit ab 80% erzielen bei dieser Auswertungsmethode die besten Ergebnisse, wobei beide Methoden zur Hageldetektierung ähnlich gut abschneiden. Beide Methoden besitzen mit Werten um 0,7 den höchsten HSS und auch die FAR ist im Vergleich zu den vorangegangenen Kriterien deutlich geringer. Die Werte werden auch durch den frequency Bias be-

stätigt. Hier liegen die Werte am 20.06.2002 bei 1,14 bzw. 1,20 und am 29.07.2005 bei 1,25 bzw. 1,21, die der perfekten Prognose mit dem Wert 1 schon sehr nahe kommen.

Bei allen betrachteten Kriterien sind die Werte der Qualitätsmaße noch nicht optimal, obwohl in der Höhe der Werte der Qualitätsmaße einige Unterschiede zwischen den Kriterien zu sehen sind. Zwar ist in allen Fällen die Trefferquote deutlich größer als es per Zufall wäre, dennoch wird, wie schon bei den Analysen im vorherigen Abschnitt angedeutet, zu häufig Hagel mit den Kriterien vorhergesagt. Dies wird durch einen frequency Bias > 1 bestätigt.

Am 24.06.2005 werden bei allen qualitativen und quantitativen Auswertungen die schlechtesten Ergebnisse erreicht. Bestätigt wird dabei Hagel nur durch sehr wenige Schäden an Gebäuden. Es kann daher vermutet werden, dass der fallende Hagel zum größten Teil eine zu kleine Korngröße besaß, um Schäden an Gebäuden zu verursachen. Hinzu kommt, dass eine vergleichsweise hohe Anzahl der Schäden an einem anderen Tag entstanden sein müssen (etwa 30%). Durch diese wenigen Meldungen sind die Beobachtungen im Vergleich zu der Vorhersage so gering, dass eine quantitative Auswertung mittels der verwendeten Gütemaße nicht durchzuführen ist.

Wie bereits oben erwähnt sind die besten Hagelkriterien der HDA und die POSH. Mit dem Grenzwert von 80% Hagelwahrscheinlichkeit bei der POSH werden die besten Werte erzielt. Wird von einer niedrigeren Schwelle ausgegangen, werden mehr Flächen mit möglichen Hagelschlag detektiert, die jedoch nicht durch Gebäudeschäden bestätigt werden. Bei einer höheren Hagelwahrscheinlichkeit $> 80\%$ wird zu wenig Hagelschlag vorhergesagt.

Das Kriterium nach Waldvogel ist nach der statistischen Auswertung mit dem Auer-Kriterium am schlechtesten. Der Schwellenwert des Waldvogel-Kriterium wird sehr schnell erreicht und zeigt möglicherweise auch kleinen Hagel an, der hier nicht beobachtet wurde. Deshalb wird im nächsten Schritt das Kriterium systematisch verändert. Die Auswertung dazu wird im nächsten Abschnitt gezeigt.

Zudem hat das einfache Mason-Kriterium gezeigt, dass die Reflektivität > 55 dBZ eine bessere Trefferquote erzielt als das Kriterium nach Waldvogel. Deswegen wird nun nachfolgend die Differenz von $(H_{45\text{ dBZ}} - H_{0^\circ\text{C}})$ auf $(H_{50\text{ dBZ}} - H_{0^\circ\text{C}})$ und $(H_{55\text{ dBZ}} - H_{0^\circ\text{C}})$ verändert. Da bei dieser Betrachtung für die Hagelvorhersage das gesamte Untersuchungsgebiet zur Verfügung steht, aber nur in bebauten Bereichen Beobachtungen durch Gebäudeschäden vorlagen, wird in Abschnitt 5.3.2 die Auswertung nur noch über bebauten Gebieten durchgeführt.

Änderung der Schwellenwerte des Waldvogel-Kriteriums

Beim Waldvogel-Kriterium (Gleichung 4.10) werden sowohl die Schwellenwerte für die Höhe des Echotops als auch der vertikale Abstand zur 0°C -Grenze systematisch variiert. Durch die Änderungen verbessern sich die Werte der Gütemaße über einen weiten Bereich jeweils bei allen vier Tagen erheblich. Das ist beispielhaft für den HSS in Abbildung 5.12 dargestellt. Während bei der Differenzhöhe $\Delta H_{45\text{ dBZ}}$ der HSS mit größerem Abstand kontinuierlich zunimmt, bis die obere Grenze erreicht wird, weisen die Ergebnisse für $\Delta H_{50\text{ dBZ}}$ und $\Delta H_{55\text{ dBZ}}$ außer am 24.6.2005 deutlich höhere Werte auf. Für die Differenz $\Delta H_{50\text{ dBZ}}$ liegt das Maximum zwischen 3.500 m

Tabelle 5.1: Statistische Auswertung des Hagelkriteriums nach Waldvogel über dem gesamten baden-württembergischen Radargebiet mit ($H_{45\text{ dBZ}} - H_{0^\circ\text{C}}$) von 1,4 km und einer Kantenlänge des Auswertungsquadrats von 10 km.

	20.06.2002	16.07.2003	24.06.2005	29.07.2005
HSS	0,48	0,49	0,16	0,68
TSS	0,65	0,83	0,74	0,82
ETS	0,31	0,32	0,09	0,51
POD	0,99	0,99	1,0	0,99
FAR	0,52	0,61	0,88	0,37
CSI	0,48	0,39	0,12	0,62
BIAS	2,04	2,56	8,50	1,57

Tabelle 5.2: Wie 5.1, aber für das Mason Kriterium.

	20.06.2002	16.07.2003	24.06.2005	29.07.2005
HSS	0,64	0,59	0,19	0,80
TSS	0,82	0,91	0,87	0,87
ETS	0,47	0,42	0,11	0,67
POD	0,98	0,95	0,99	0,89
FAR	0,43	0,56	0,88	0,25
CSI	0,57	0,43	0,12	0,69
BIAS	1,72	2,14	8,19	1,86

Tabelle 5.3: Wie 5.1, aber für das Auer Kriterium.

	20.06.2002	16.07.2003	24.06.2005	29.07.2005
HSS	0,52	0,48	0,19	0,68
TSS	0,69	0,87	0,86	0,83
ETS	0,35	0,32	0,10	0,51
POD	0,99	0,99	1,0	0,97
FAR	0,49	0,64	0,88	0,39
CSI	0,51	0,36	0,12	0,60
BIAS	1,94	2,75	8,29	1,59

und 5.500 m und erreicht Werte bis 0,82. Das Maximum der Differenz $\Delta H_{55\text{ dBZ}}$ liegt für den 20.06.2002 und den 16.07.2003 bei etwa 3.000 m. Am 29.07.2005 wird das Maximum schon bei gleicher Höhe von $H_{0^\circ\text{C}}$ und $H_{55\text{ dBZ}}$ erreicht, bleibt aber bis etwa 2.900 m relativ konstant und fällt dann stark ab. Hier erreicht der HSS – den 24.6.2005 ausgenommen – Werte zwischen 0,75 und 0,82. Aber auch hier sind die Werte des 24.06.2005, wegen der oben genannten Gründe, deutlich schlechter. Das Ergebnis zeigt, dass die 45 dBZ Reflektivität und somit kleine Hagelkörner bei Gewittern mit Hagelbildung oft bis zur maximal messbaren Höhen der Reflektivität reichen. Diese können beim Absinken weiter an Größe zunehmen. Die 50 dBZ Reflektivität deutet dar-

Tabelle 5.4: Wie 5.1, aber für den HDA.

	20.06.2002	16.07.2003	24.06.2005	29.07.2005
HSS	0,75	0,65	0,28	0,77
TSS	0,80	0,91	0,69	0,86
ETS	0,60	0,48	0,16	0,63
POD	0,82	0,94	0,70	0,89
FAR	0,29	0,49	0,83	0,29
CSI	0,62	0,50	0,16	0,65
BIAS	1,14	1,82	4,01	1,25

Tabelle 5.5: Wie 5.1, aber für die POSH.

	20.06.2002	16.07.2003	24.06.2005	29.07.2005
HSS	0,77	0,65	0,34	0,78
TSS	0,84	0,92	0,79	0,85
ETS	0,62	0,48	0,20	0,63
POD	0,86	0,95	0,79	0,87
FAR	0,29	0,49	0,79	0,28
CSI	0,64	0,50	0,20	0,65
BIAS	1,20	1,86	3,70	1,21

auf hin, dass starke Aufwinde herrschen müssen um den Hagel in solche Höhen transportieren zu können. Da hier nur die Reflektivität oberhalb der 0°C -Grenze gemessen wird, lässt die 55 dBZ Reflektivität auf großen Hagel schließen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Reflektivität unterhalb der 0°C -Grenze durch den Wasserfilm auf dem Hagelkorn noch deutlich ansteigt. Da die Gütemaße für die Tage 20.06.2002, 16.07.2003 und 29.07.2005 sich in der Höhe der Werte kaum unterscheiden, wird für die bessere Darstellung aus diesen Tagen der Mittelwert von HSS, TSS, FAR, POD sowie CSI gebildet. Die Darstellungen der einzelnen Tage sind im Anhang (Abbildung A.3) zu finden. Der HSS und CSI zeigen dabei einen sehr ähnlichen Verlauf an, der durch den Mittelwert (Abbildung 5.13) verstärkt wird. Beide Gütemaße haben bei $\Delta H_{50\text{dBZ}} \sim 4.500\text{ m}$ und $\Delta H_{55\text{dBZ}} \sim 3.000\text{ m}$ ein deutliches Maximum und fallen bei höheren Differenzen stark ab. Bei der Differenz von $\Delta H_{45\text{dBZ}}$ zeigt sich das Maximum bei der maximal möglichen Differenz. Dies deutet darauf hin, dass bei starken hagelbildenden Gewitterzellen die Reflektivität von 45 dBZ das Echotop bzw. die maximale Höhe der Messung erreicht. Die POD hat in allen drei Fällen das Maximum bei der kleinsten Differenz und fällt dann zuerst leicht und bei größerer Differenz stärker ab. Dies liegt vor allem an ihrer Berechnung. Da zu Beginn die vorhergesagte Fläche für Hagelschlag größer ist, werden weniger Fälle nicht prognostiziert und trotzdem beobachtet. Auch der TSS, der mit der POD zusammenhängt, zeigt bei $\Delta H_{55\text{dBZ}}$ einen ähnlichen Verlauf. Bei der Differenz $\Delta H_{50\text{dBZ}}$ zeigt sich aber ein Maximum bei etwa 3.800 m und in Höhe von 5.000 m bei der Differenz von $\Delta H_{45\text{dBZ}}$. Dies hängt mit der zusätzlichen Berücksichtigung der Kontingenzwerte b und d zusammen. Bei Betrachtung von $\Delta H_{55\text{dBZ}}$ ist die

positive Vorhersage und eine negative Beobachtung durch die hohe Grenze des Kriterium geringer als bei den Fällen ΔH_{45dBZ} und ΔH_{50dBZ} . Die FAR nimmt dagegen bei allen drei Fällen mit der Differenzhöhe ab und zeigt kein lokales Minimum. Dabei kann bei ΔH_{55dBZ} der beste Wert erzielt werden. Er liegt aber nicht bei gleicher Differenzhöhe wie die anderen Maxima. Für die Differenz ΔH_{45dBZ} liegt die FAR dagegen in Höhe der anderen Maxima mit einem Wert von 0,3.

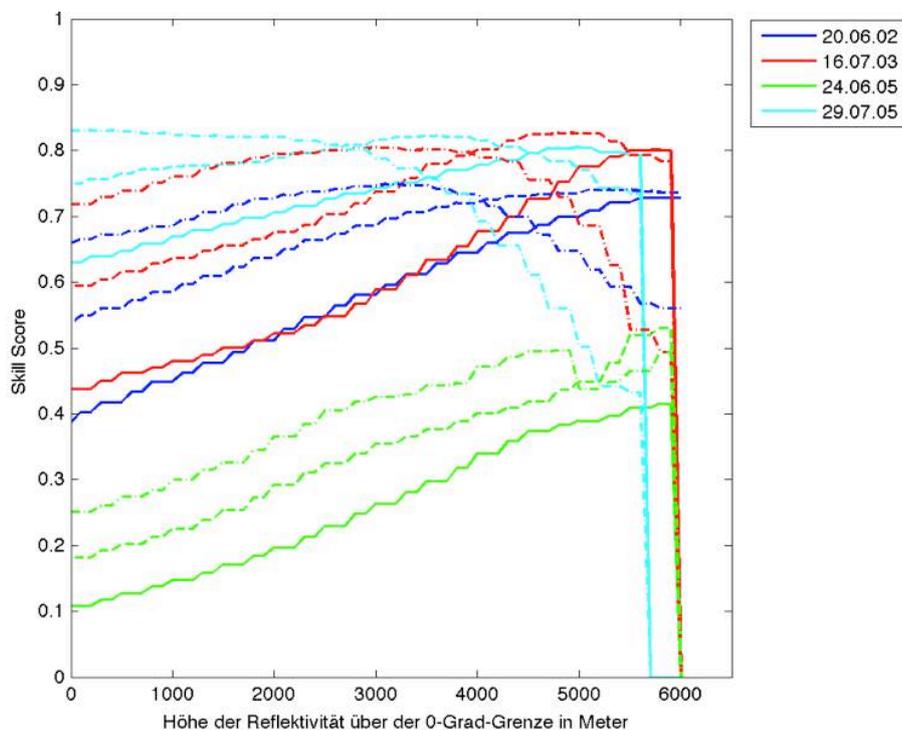
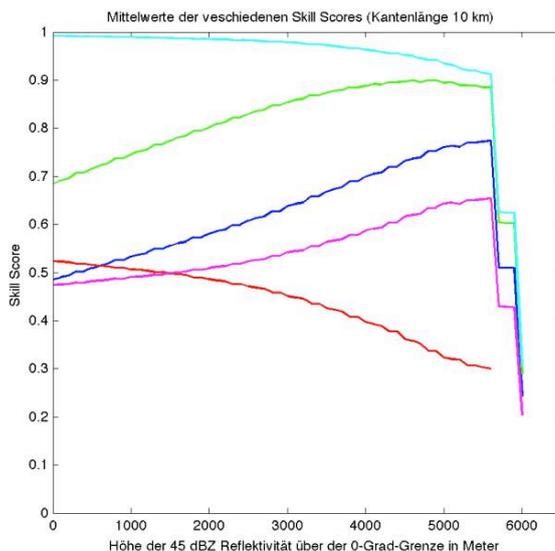


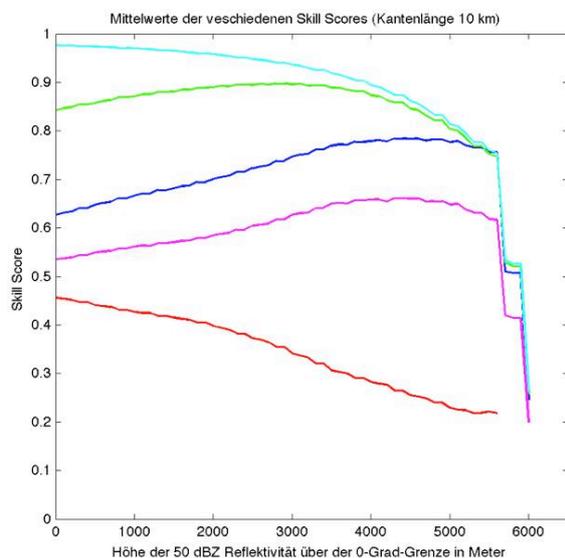
Abb. 5.12: Darstellung des HSS für das modifizierte Kriterium nach Waldvogel mit veränderter Differenz zwischen ($H_{45dBZ} - H_{0^\circ C}$) (durchgezogen), ($H_{50dBZ} - H_{0^\circ C}$) (gestrichelt) und ($H_{55dBZ} - H_{0^\circ C}$) (punktgestrichelt) für die vier Beispieltage, der schwarze Strich markiert das ursprüngliche Waldvogelkriterium. Die Berechnung erfolgte für das gesamte Untersuchungsgebiet.

5.3.2 Auswertung der Hagelkriterien nur über bebaute Flächen

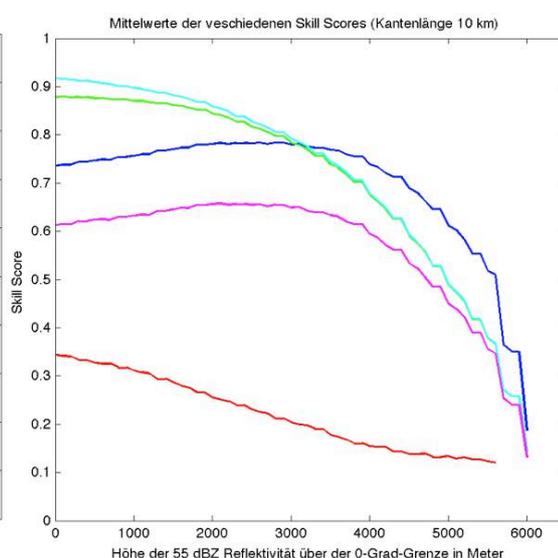
Die folgenden Auswertungen beziehen sich ausschließlich auf bebaute Flächen des Untersuchungsgebiets mit einer Kantenlänge des Auswertungsquadrats von 10 km. Die Methode der Auswertung wurde bereits in Kapitel 4.4 beschrieben. Beim Vergleich der Werte der Tabellen 5.6 bis 5.10 mit den Werten der Auswertung ohne Berücksichtigung der Bebauung (Tabellen 5.1 bis 5.5) zeigen sich bei allen fünf Hagelkriterien erhebliche Verbesserungen der Gütekriterien. Deutlich wird dies insbesondere bei der FAR und dem frequency Bias für die Kriterien nach Waldvogel, Auer und Mason. Die besten Werte gesamt betrachtet werden jedoch noch immer mit der POSH und dem HDA erzielt. Hier werden zwar teilweise bei den Skill Scores schlechtere Werte erreicht, u. a. am 20.06.2002, aber es werden auch deutliche Verbesserungen an anderen Tagen



(a) 45 dBZ



(b) 50 dBZ



(c) 55 dBZ

Abb. 5.13: Mittelwert der Skill Scores HSS (blau), TSS (grün), FAR (rot), POD (cyan) und CSI (magenta) der Tage 20.06.2002, 16.07.2003 und 29.07.2005 für das modifizierte Waldvogel-Kriterium mit den Schwellenwerten der Echotop-Höhe von 45 dBZ (a), 50 dBZ (b) und 55 dBZ (c). Dabei wurde die Auswertung über dem gesamten Untersuchungsgebiet durchgeführt.

erzielt. So kann mit dem frequency Bias eine zu geringe Vorhersage an den Tagen 20.06.2002 und 29.07.2005 festgestellt werden.

Am 16.07.2003 ist die Verbesserung bei den Kriterien nach Waldvogel, Mason sowie mit dem HDA und der POSH sehr deutlich. Bei diesem Fall tritt auch eine Gewitterzelle über dem Nord-schwarzwald – einem dünnbesiedelten Gebiet – auf, die jedoch nur wenige Schäden verzeichnet. Durch die Filterung kann hier eine hohe Anzahl der Vorhersagen, aber nicht beobachteten Fälle

Tabelle 5.6: Statistische Auswertung des Hagelkriteriums nach Waldvogel über bebauten Gebieten mit $\Delta H_{45dBZ} \geq 1,4$ km und einer Kantenlänge des Auswertungsquadrats von 10 km.

	20.06.2002	16.07.2003	24.06.2005	29.07.2005
HSS	0,59	0,65	0,18	0,79
TSS	0,67	0,89	0,69	0,87
ETS	0,42	0,49	0,10	0,65
POD	0,97	0,99	1,0	0,97
FAR	0,37	0,46	0,86	0,24
CSI	0,62	0,54	0,14	0,74
BIAS	1,56	1,82	6,93	1,28

aussortiert werden.

Auch am 24.06.2005 erzielen alle Kriterien außer dem nach Auer eine Verbesserung der Qualitätsmaße. Es kann aber aufgrund der genannten hohen Anzahl der Schäden von einem anderen Hagelschadentag keine vergleichbaren Werte der Gütemaße wie an den anderen Tagen erreicht werden.

Bei der Modifizierung des Waldvogel-Kriteriums wie im vorigen Abschnitt beschrieben zeigt sich ebenfalls eine erhebliche Verbesserung der Hageldetektion (Abbildungen 5.14 und 5.15). So zeigen die Mittelwertberechnung der Qualitätsmaße über die Tage 20.06.2002, 16.07.2003 und 29.07.2005 in der gleichen Differenzgröße ihre Maxima wie in der Auswertung ohne Berücksichtigung der Bebauung mit besseren Werten bis 0,85. Die einzelnen Werte der berechneten Gütemaße sind auch hier wieder im Anhang (Abbildung A.4) abgebildet.

Es ergibt sich zusammenfassend, dass die Berechnung der verschiedenen Hagel-Kriterien ausschließlich über bebauten Gebieten zu einer erheblichen Verbesserung der Hageldetektion führt. Durch diese Methode werden unbebaute Gebiete vernachlässigt, die nicht mit der hier angewandten Methode ausgewertet werden können. Der Unterschied zeigt sich am deutlichsten, wenn es sich um Gebiete mit großen unbebauten Flächen handelt wie am 16.07.2003. Besonders der HDA und die POSH erzielen hier sehr gute Werte. Die Abbildung 5.16 zeigt zur Verdeutlichung die bebauten Flächen von Baden-Württemberg in violett und die Daten des HDA in hellblau vom 16.07.2003. Hier ist gut zu erkennen, dass die Daten des HDA hauptsächlich über unbebauten Gebieten liegen.

Wie auch schon bei der Auswertung über dem gesamten Untersuchungsgebiet erreicht das Kriterium nach Waldvogel auch eine zusätzliche Verbesserung, wenn die verwendete Reflektivität auf 50 dBZ bzw. 55 dBZ verändert wird. Hinzu kommt eine zusätzliche Verbesserung, wenn die Differenz zwischen der Höhe der Reflektivität und der 0° C -Grenze verändert wird. Dabei ergeben sich die besten Werte der Gütemaße bei $\Delta H_{55dBZ} > 2.000$ m, bei $\Delta H_{50dBZ} > 3.000$ m und bei ΔH_{45dBZ} ab einer Differenz von 4.500 m. Diese Varianten des Waldvogelkriteriums werden im nächsten Kapitel für die Auswertung des langjährigen Zeitraums verwendet, um deren Güte systematisch zu untersuchen.

Tabelle 5.7: Wie Tabelle 5.6, aber für Mason Kriterium.

	20.06.2002	16.07.2003	24.06.2005	29.07.2005
HSS	0,67	0,87	0,28	0,82
TSS	0,62	0,92	0,81	0,84
ETS	0,51	0,76	0,17	0,70
POD	0,99	0,95	0,99	0,92
FAR	0,17	0,17	0,80	0,54
CSI	0,82	0,80	0,20	0,79
BIAS	1,20	1,14	4,85	1,08

Tabelle 5.8: Wie Tabelle 5.6, aber für Auer Kriterium

	20.06.2002	16.07.2003	24.06.2005	29.07.2005
HSS	0,58	0,40	0,02	0,69
TSS	0,55	0,63	0,31	0,73
ETS	0,41	0,25	0,01	0,52
POD	0,98	0,73	0,39	0,92
FAR	0,24	0,68	0,99	0,28
CSI	0,75	0,29	0,01	0,68
BIAS	1,29	2,27	39,94	1,28

Tabelle 5.9: Wie Tabelle 5.6, aber für den HDA

	20.06.2002	16.07.2003	24.06.2005	29.07.2005
HSS	0,66	0,75	0,39	0,81
TSS	0,61	0,85	0,8	0,81
ETS	0,49	0,61	0,24	0,69
POD	0,62	0,87	0,80	0,83
FAR	0,26	0,31	0,74	0,17
CSI	0,51	0,62	0,24	0,71
BIAS	0,84	1,26	3,10	0,99

Tabelle 5.10: Wie Tabelle 5.6, aber für die POSH

	20.06.2002	16.07.2003	24.06.2005	29.07.2005
HSS	0,69	0,77	0,39	0,78
TSS	0,68	0,89	0,78	0,76
ETS	0,53	0,63	0,24	0,64
POD	0,70	0,90	0,78	0,77
FAR	0,28	0,31	0,74	0,17
CSI	0,55	0,64	0,24	0,66
BIAS	0,97	1,31	3,0	0,93

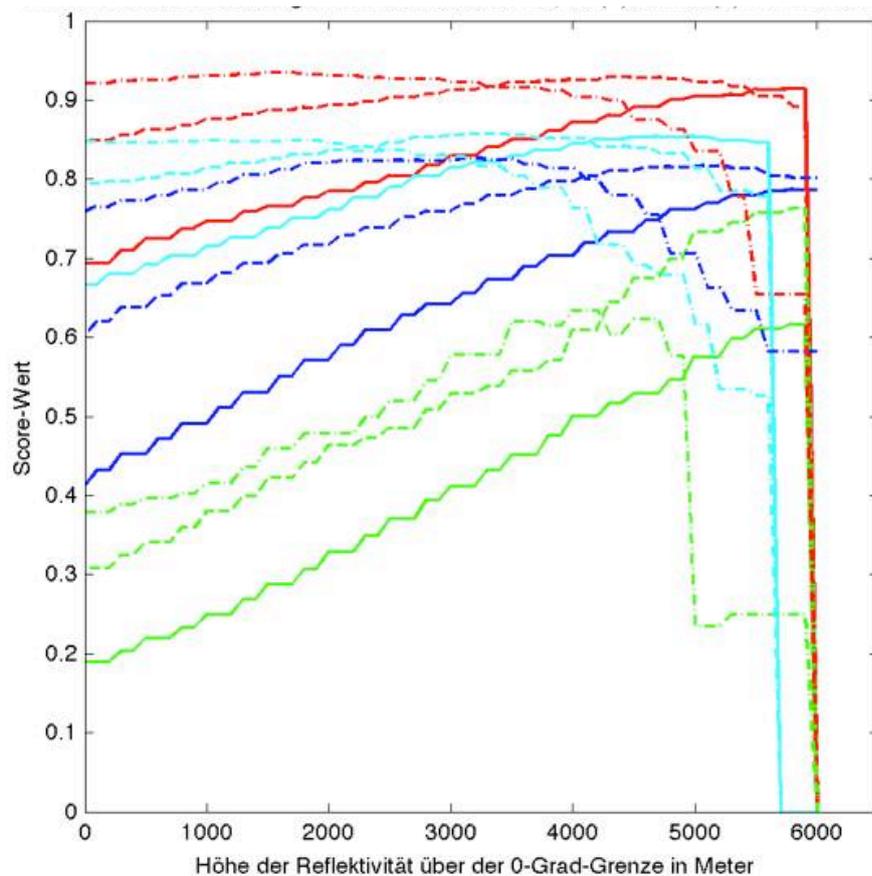
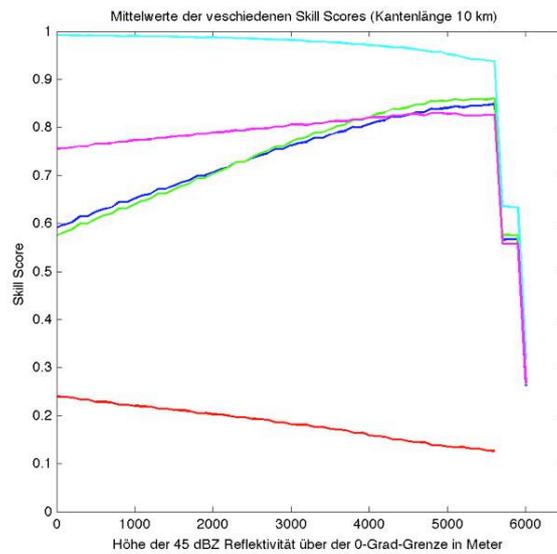
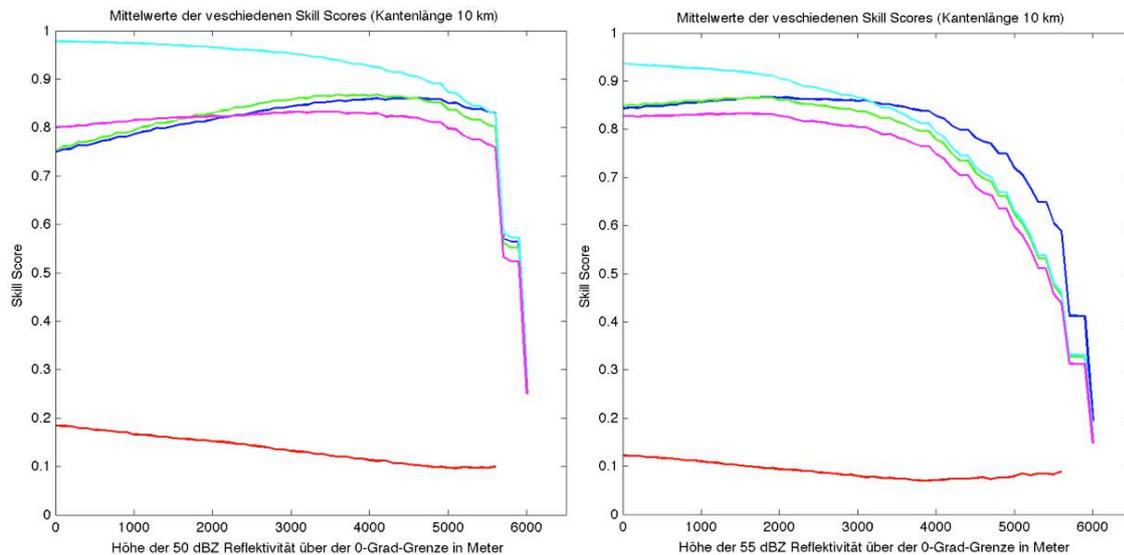


Abb. 5.14: Wie Abbildung 5.12, aber bei Berücksichtigung der bebauten Flächen aus den CORINE Daten (Kapitel 3.2).

Die Auswertungen der Fallbeispiele mit den verschiedenen Hageldetektionsverfahren zeigen verschiedene Eigenschaften der Kriterien auf. So muss beim Auerkriterium für sehr kalten Wolkenoberflächentemperaturen im Low-Level CAPPI eine hohe Reflektivität erreicht werden. Bei der Einzelfalluntersuchung hat sich zudem gezeigt, dass das Auer-Kriterium im Vergleich der anderen Kriterien trotz Dämpfung den Hagel noch teilweise detektieren kann. Die Variationen des Waldvogel-Kriteriums detektieren den Hagel deutlich besser als das ursprüngliche Kriterium. Zum einen wird durch die größere Differenz ΔH_{45dBZ} von einem starken Gewitter mit höherer vertikaler Windgeschwindigkeit ausgegangen, die große Eisteilchen in große Höhen transportiert oder in der Schwebel hält. Dies ist eine Voraussetzung für das Wachstum von Hagel. Zum anderen kann bei einer sehr hohen Reflektivität > 55 dBZ nicht nur von vielen, sondern auch großen Partikeln ausgegangen werden. Beim Mason-Kriterium muss die 55 dBZ Reflektivität nicht in einer bestimmten Höhe oder vertikalen Ausdehnung auftreten, dadurch kann das Hagelkriterium auch durch schmelzende Eispartikel in niedrigen Höhen ausgelöst werden (Helles Band). Das Mason-Kriterium lässt sich aber recht gut als Hinweis auf großen Hagel verwenden, wenn dazu die vertikale Erstreckung mitberücksichtigt wird, also Auftreten der Reflektivität über mindestens zwei Höhenstufen. Die Detektionsverfahren HDA und POSH erzielten bei der Fallstudie die besten Werte. Der HDA verwendet als einziges ein Kriterium für hochreichende Konvektion mit



(a) 45 dBZ und 10 km Kantenlänge



(b) 50 dBZ und 10 km Kantenlänge

(c) 55 dBZ und 10 km Kantenlänge

Abb. 5.15: Wie Abbildung 5.13, aber bei Berücksichtigung der bebauten Flächen aus den CORINE Daten (Kapitel 3.2)

der Mindesthöhe des Echotops. Durch dieses Verfahren können entstehende Zellen und Bright Band Effekte bei stratiformen Niederschlag ausgeschlossen werden. Der HDA hat dazu bei der Einzelfallstudie den Hagelschlag am besten wiedergegeben. Die POSH verwendet zum einen den Reflektivitätswert und zum anderen die Temperatur in der jeweiligen Höhe. Dabei wird auch hier wieder der Rückschluss der Reflektivität auf Hagel genutzt. Dabei steigt die Wahrscheinlichkeit bei höherem Reflektivitätswert und gleichzeitig niedrigerer Temperatur.

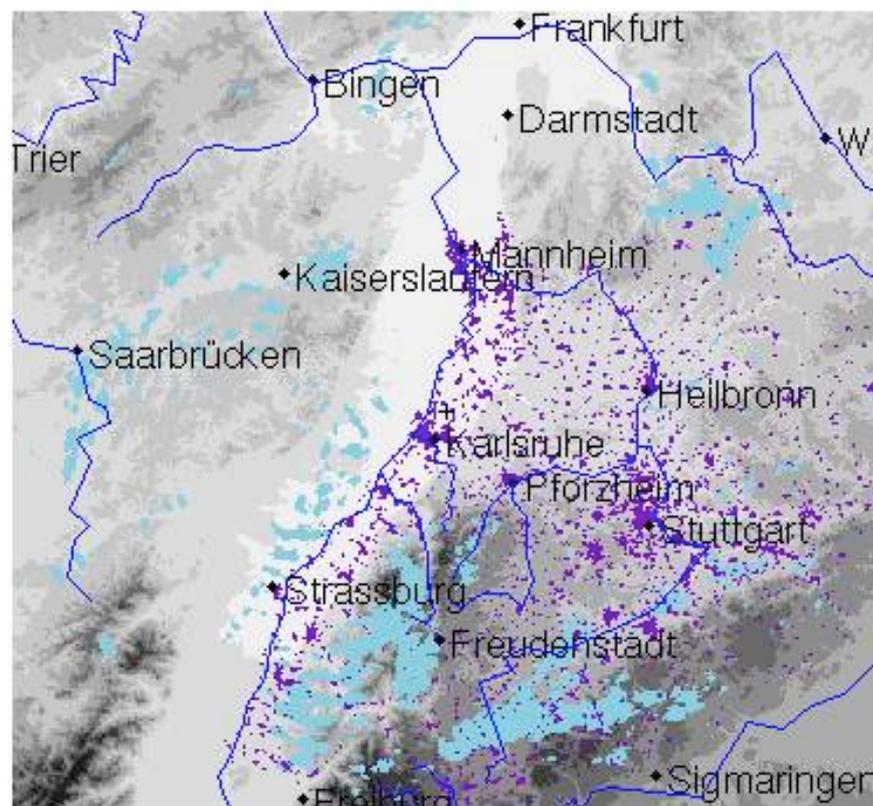


Abb. 5.16: Darstellung der Daten des HDA und der bebauten Fläche von Baden-Württemberg für den 16.07.2003.

5.3.3 Probleme bei der Auswertung

Da Gebäudeschäden erst ab einem Hageldurchmesser von etwa 2 cm auftreten, kann es in einigen Gebieten auch zu Hagel gekommen sein, ohne dass dies in dieser Arbeit berücksichtigt werden konnte. Gerade bei Hagel mit Korngrößen um 2 cm kommt es durch die geringe Anzahl an Hagel-schäden zu Problemen bei der Auswertung. Daneben gibt es auch Fehlerquellen in den Daten zur Berechnung der Hagelkriterien. Zum einen können Dämpfungseffekte teilweise das Detektieren des Hagels verhindern, die bei einer partiellen Dämpfung nicht ausgeglichen werden kann. Zum anderen werden hier in dieser Arbeit für die Höhen der 0° C und -20° C -Grenze die Radiosonden-aufstiege in Stuttgart und die Wolkenoberflächentemperatur an einem Punkt südlich von Esslingen verwendet. Dabei wird angenommen, dass diese Höhen und Temperaturen sich auf das gesamte Untersuchungsgebiet übertragen lassen. Da hier keine anderen Daten zur Verfügung standen, musste auf diese Methode zurückgegriffen werden. Ein weiteres Problem stellt die Auffächerung des Radarstrahls mit zunehmender Entfernung zum Radargerät dar, denn mit größerer Entfernung werden die Radarreflektivitäten für ein wesentlich größeres Volumenelement gemessen, als in direkter Umgebung zum Radar. Da die Reflektivität auf einheitliche Volumenelemente interpoliert wird, kann eine hohe oder auch eine niedrige Reflektivität in größerer Entfernung zum Radar eine höhere Gewichtung bekommen. Zudem entfernt sich der Radarstrahl aufgrund der Elevationswin-

kel mit zunehmenden Abstand vom Radargerät vom Boden und bereitet vor allem Schwierigkeiten bei der Verwendung der Radarmessung im unteren Bereich, wie beim Auer-Kriterium.

6. Langjährige Statistik

In diesem Kapitel folgt nun die langjährige statistische Auswertung im Zeitraum von 1997 bis 2011. Dabei werden zunächst die verschiedenen Hagelkriterien berechnet und ausgewertet. Danach wird im zweiten Teil die vertikale Erstreckung verschiedener Reflektivitäten nach Monaten und der Anzahl des Auftretens analysiert.

6.1 Auswertung der Hageldetektionsverfahren über 15 Jahre

Die Abbildung 6.1 zeigt einen Überblick über die Anzahl der Hagelschadentage nach den SV Versicherungsdaten pro fünfstelligen Postleitzahlgebieten von 1997 bis 2011. Die einzelnen Monate sind noch zusätzlich in den Abbildungen 6.2a bis f aufgetragen. Ein Tag zählt dann als Hagelschadentag, wenn mindestens 10 Schäden in einem Postleitzahlgebiet aufgetreten sind. Gut zu erkennen ist dabei in allen Abbildungen die geringe Anzahl der Ereignisse im Bereich des Nord-Schwarzwalds, im Enztal und der Hohenloher Ebene. Die häufigsten Hagelschadentage sind dabei im Großraum Stuttgart und im Neckertal bis Freudenstadt zu finden. Eine auffällig hohe Anzahl an Hagelschadentagen weist zudem das Postleitzahlgebiet von Rottenburg am Neckar östlich von Freudenstadt auf. Hier werden im gesamten Zeitraum über 100 Hagelschadentage gezählt und auch in der Betrachtung der einzelnen Monate hat dieses Gebiet jeweils die meisten Hagelschadentage.

Beim Vergleich dieser Hagelschadentage mit den Werten der kategoriellen Größe a aus der Kontingenztabelle ergeben sich bei den verschiedenen Hagelkriterien ähnliche Muster. In Abbildung 6.3 sind die Werte beispielhaft für den HDA und das Mason-Kriterium pro Postleitzahlgebiet dargestellt. Für die Berechnung der kategoriellen Größen der Kontingenztabelle wird, wie schon bei den Einzelfällen, das Auswertungsquadrat mit einer Kantenlänge von 10 km verwendet. Hierbei muss beachtet werden, dass in Abbildung 6.3 alle korrekten Detektionen mittels Radardaten, die in den jeweiligen PLZ Gebieten erfolgten, erfasst und dargestellt sind. Die beiden Abbildungen sind deshalb in ihrer Angabe der Anzahl nicht direkt vergleichbar. Auch hier weist das Gebiet von Rottenburg am Neckar eine hohe Anzahl von Hagelschadentagen auf, ist aber nicht das Maximum. Dieses liegt bei beiden Kriterien am Neckar südlich von Stuttgart bei Nürtingen. Auffällig ist auch die fehlende Detektion in einigen Postleitzahlgebieten. Dies hängt damit zusammen, dass in nicht allen Gebieten ein Hagelschlag mittels Kriterien detektiert werden kann, obwohl ein Hagelschaden gemeldet wurde. Insgesamt lässt sich aber eine recht gute Übereinstimmung der Verteilung der Hagelschadentage und der Anzahl der kategoriellen Größe a erkennen.

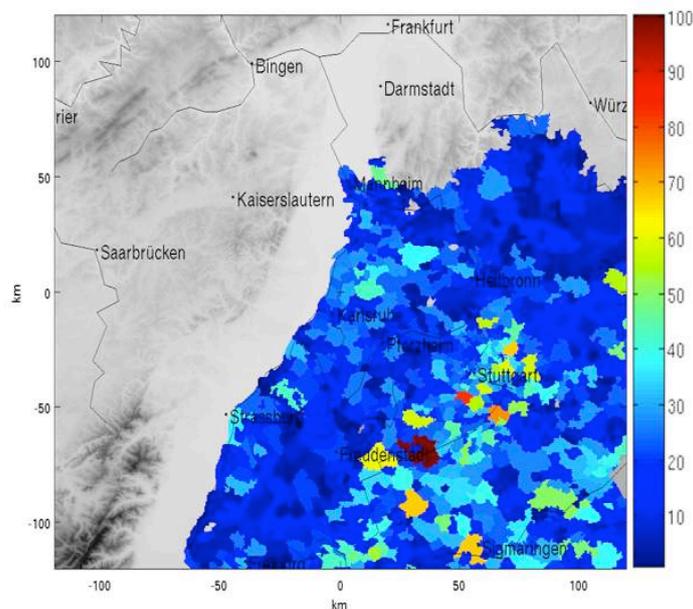
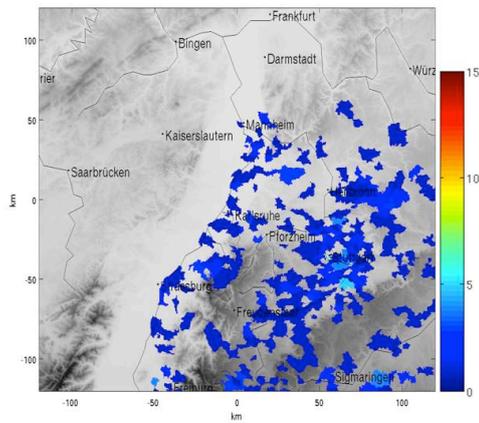


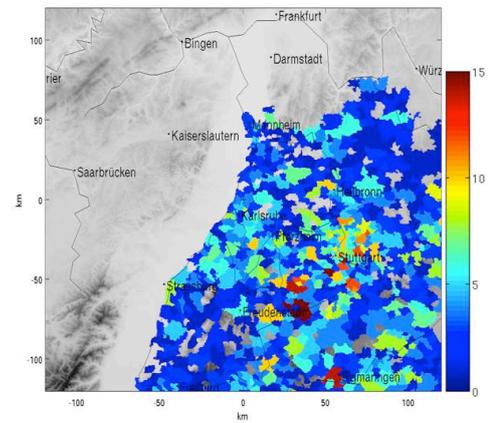
Abb. 6.1: Anzahl der Hagelschadentage pro fünfstelligen Postleitzahlgebieten von 1997 bis 2011 für die Monate April bis September.

Die Berechnung der Gütemaße erfolgt zunächst über dem gesamten Untersuchungsgebiet und im zweiten Schritt nur über bebautem Gebiet. Die Gebäudeschäden liegen in diesem Zeitraum als Anzahl pro Tag für fünfstelligen Postleitzahlgebiete vor. In Abbildung 6.4 und 6.5 ist exemplarische der HDA für die Gütemaße HSS, POD, FAR und frequency Bias für das gesamte Untersuchungsgebiet (Abbildung 6.4) sowie nur über bebauten Gebiet (Abbildung 6.5) berechnet und dargestellt. Abgebildet sind nur Werte größer als Null. Dabei zeigt sich, dass die Gütemaße über 15 Jahre nur punktuell so hoch sind wie in den Beispielfällen. Besonders in den Abbildungen 6.4a bis d können zudem auch regionale Unterschiede in der Höhe der Werte festgestellt werden. So sind beispielsweise im Großraum Stuttgart und an der nordwestlichen Seite der Schwäbischen Alb die Werte relativ hoch, dagegen in den Regionen Schwarzwald und Schwäbische Alb sehr niedrig.

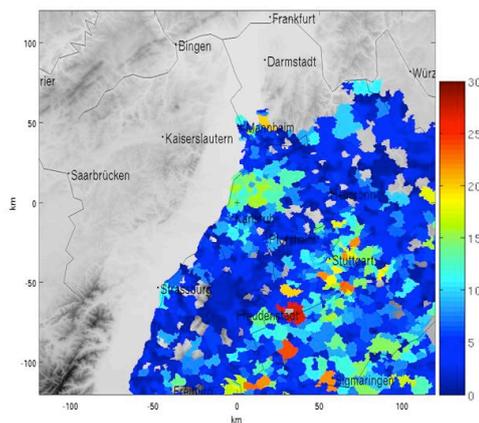
Beim Vergleich der berechneten Werte über bebauten Gebieten mit den Werten ohne Berücksichtigung der Bebauung zeigen sich die gleichen regionalen Unterschiede. Die Werte liegen zudem in ähnlichen Bereichen. Eine Verbesserung durch die Berechnung nur über bebauten Gebieten kann hier nicht verzeichnet werden. Insgesamt liegen die Werte jedoch im Großraum Stuttgart beim HSS zwischen 0,5 und 0,8 und für die FAR zwischen 0,6 bis 0,2. Dabei weist die FAR auf eine hohe Anzahl aus Radardaten abgeleiteten, aber nicht beobachteten Hagelereignissen (Kontingenztafel Kategorie b) gegenüber den korrekt abgeschätzten Ereignissen (Kontingenztafel Kategorie a) hin. Die hohen Werte der POD deuten zudem noch auf wenige Fälle mit nicht aus Radardaten abgeleiteten aber eingetretenen Hagelereignissen (Kontingenztafel Kategorie c) hin. Dies wird auch durch den Bias mit Werten > 1 bestätigt.



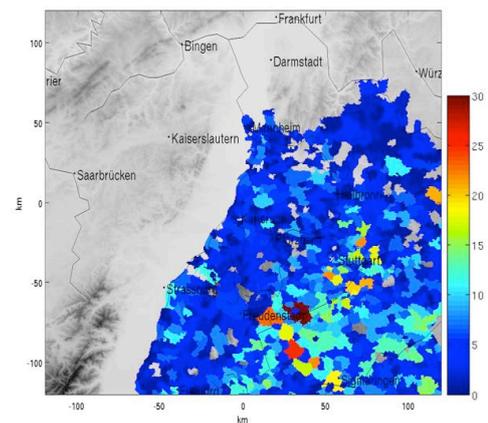
(a) April



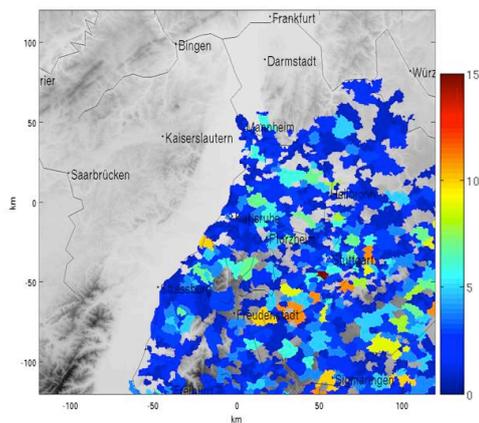
(b) Mai



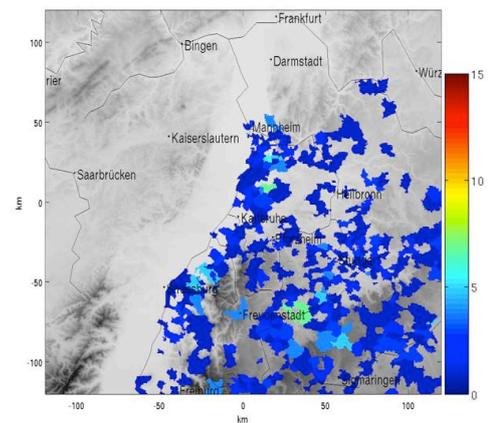
(c) Juni



(d) Juli

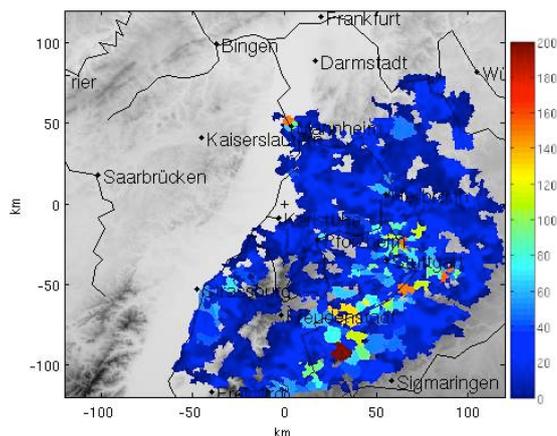


(e) August

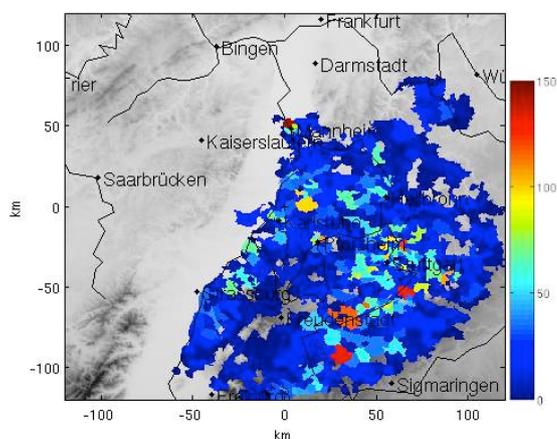


(f) September

Abb. 6.2: wie Abbildung 6.1 nur für die einzelnen Monate.



(a) HDA



(b) Mason Kriterium

Abb. 6.3: Darstellung der kategoriellen Größe a der Kontingenztabelle für die Hagelkriterien HDA und Mason-Kriterium pro Postleitzahlgebiet im Zeitraum 1997 bis 2011. Die Berechnung der kategoriellen Größe erfolgt dabei nur über bebautem Gebiet.

Die Abbildung 6.6 zeigt das Hageldetektionsverfahren POSH sowie die nach Mason, Auer und das modifizierte Waldvogel-Kriterium. Dargestellt ist hier jeweils der HSS über bebautem Gebiet mit Werten $HSS > 0$. Beim Waldvogel-Kriterium wird auf die Ergebnisse der Fallstudie in Kapitel 5.3 für $\Delta H_{45dBZ} > 4.500$ m, $\Delta H_{50dBZ} > 3.000$ m und $\Delta H_{55dBZ} > 2.000$ m zurückgegriffen und hier angewendet. Dabei zeigt sich, dass das POSH Verfahren und die Verfahren nach Waldvogel weniger Gebiete detektieren als die Verfahren nach Mason und Auer. Alle zeigen allerdings eine ähnliche regionale Struktur in der Höhe der Werte. Die Gebiete Großraum Stuttgart und Neckertal werden außer vom Waldvogelkriterium $\Delta H_{45dBZ} > 4.500$ m vergleichsweise gut erfasst. Jedoch detektieren diese Hagelkriterien im Gegensatz zum HDA Hagelgewitter im Rheintal, Kraichgau und Hohenloher Ebene deutlich schlechter. Um zu überprüfen, ob die Verteilung der HSS-Werte auch in der Häufigkeit des Auftretens der Schwellenwerte begründet liegt, wird in Abschnitt 6.2

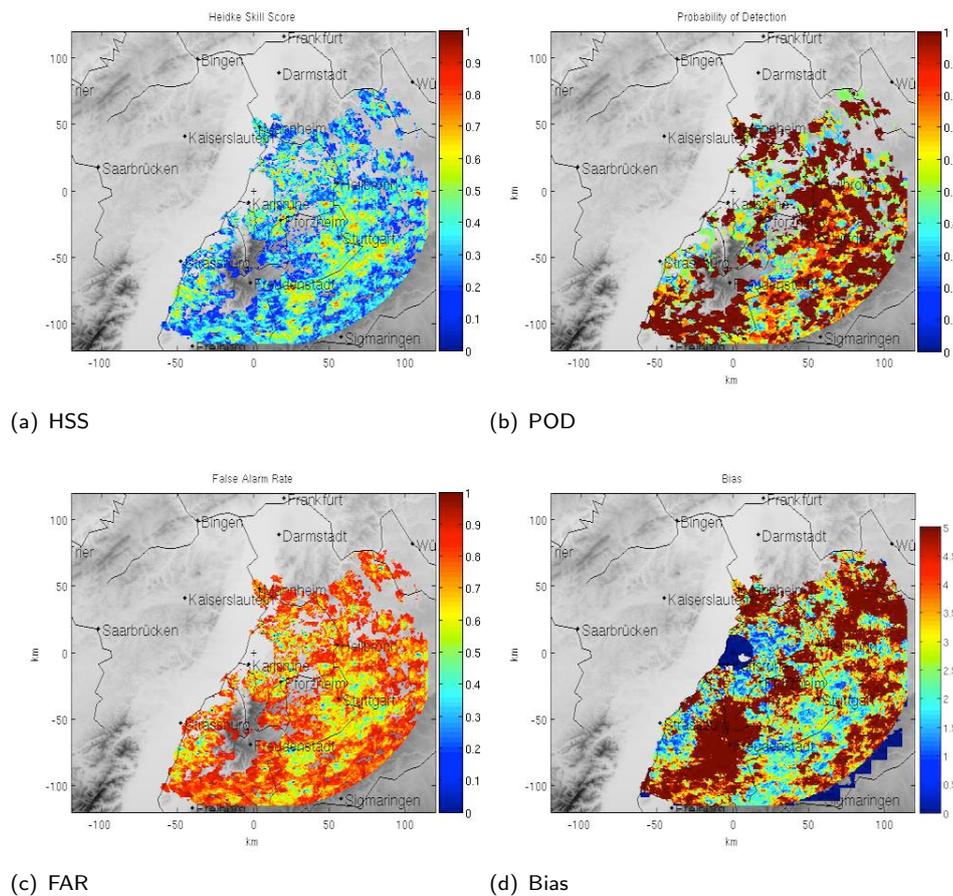


Abb. 6.4: Darstellung der Gütemaße HSS, POD, FAR und Bias des HDA über 15 Jahre berechnet an jedem Punkt über dem gesamten Untersuchungsgebiet.

die vertikale Ausdehnung der 45, 50 und 55 dBZ Reflektivitäten untersucht.

Da bei der Berechnung der Qualitätsmaße über dem gesamten Untersuchungsgebiet mit einer Auflösung von $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ die Werte sehr heterogen verteilt sind, wird für eine bessere Übersicht der HSS für die verschiedenen Kriterien zusätzlich noch einmal in einer räumlichen Auflösung von $2,5\text{ km} \times 2,5\text{ km}$ (ohne Werte $\text{HSS} = 0$) dargestellt (Abbildung 6.7). Hierbei ergibt sich für alle Kriterien eine große Spannweite der Werte bis etwa 0,8. Wie bereits bei Abbildung 6.4 angesprochen, finden sich die höchsten Werte des HSS im Großraum Stuttgart und südöstlich von Freudenstadt im Tal zwischen Schwarzwald und Schwäbischer Alb. Dabei zeigt der HDA nur in Gebieten mit geringer Siedlungsdichte niedrige Werte. Bei den Kriterien nach Auer, Mason und bei der POSH lassen sich die Gebiete mit hohem Hagelrisiko gut erkennen. Dagegen sind die Werte in den Gebieten Oberrheingraben, Nord-Schwarzwald und Kraichgau sehr niedrig. Weiterhin sind hohe HSS-Werte des Auer-Kriteriums besonders in den Randlagen des Radars anzutreffen. Dies hängt vermutlich mit dem Low-Level-Cappi und der Aufweitung des Radarstrahls zusammen (vgl. Kapitel 5.3.3). Auch die Waldvogelkriterien $\Delta H_{50\text{dBZ}}$ und $\Delta H_{55\text{dBZ}}$ (Abbildung 6.7e und f) weisen nur regional begrenzt gute Werte auf, in anderen Gebieten liegt der Wert bei Null und ist deshalb nicht abgebildet. Für das Waldvogelkriterium in Abbildung 6.6d ergeben sich bei

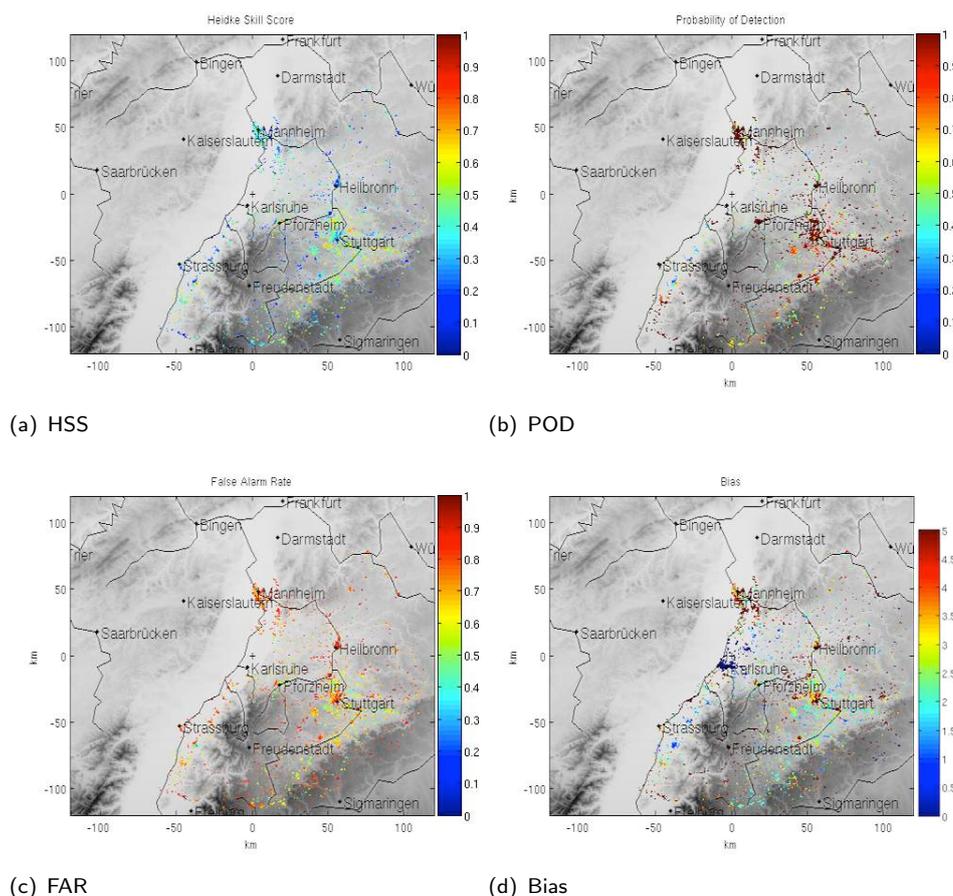
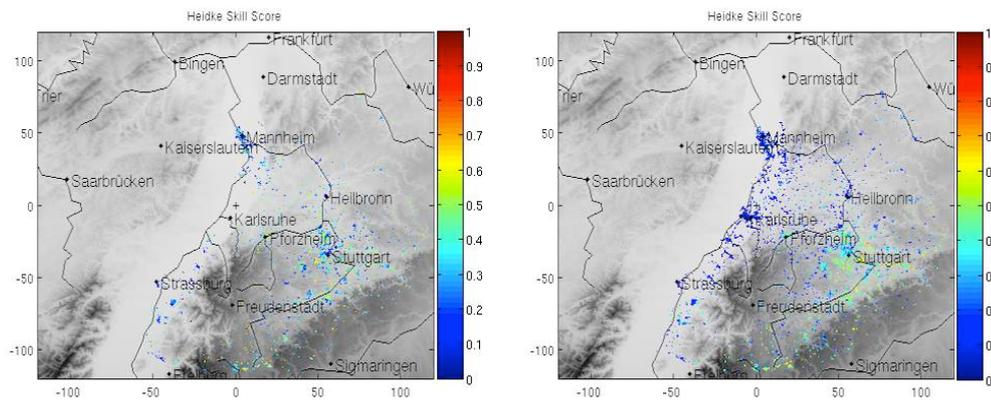


Abb. 6.5: Wie Abbildung 6.4 nur über bebauten Gebieten.

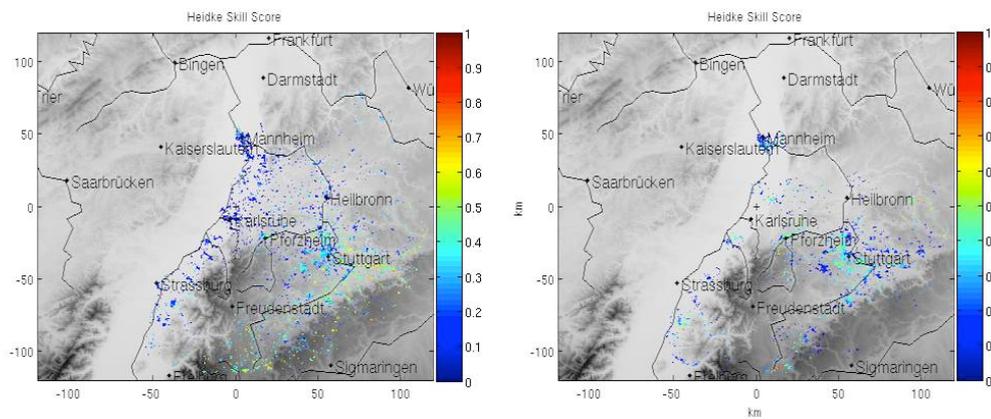
einem Großteil des Untersuchungsgebiets Werte geringer als 0,4 oder sogar 0, die daher in Abbildung 6.7 nicht dargestellt sind. Beim Vergleich zwischen den verschiedenen Kriterien weisen der HDA und das Mason-Kriterium zum größten Teil eine ähnliche Struktur in der Verteilung der HSS-Werte auf, wobei sie beim Mason-Kriterium niedriger sind. Auch die Werte der POSH sind ähnlich verteilt, jedoch deutlich heterogener trotz der geringeren räumlichen Auflösung.

Das Auer-Kriterium konnte nur für den Zeitraum 2002 bis 2011 berechnet werden und lässt sich daher nicht direkt mit den anderen Kriterien vergleichen. Deshalb erfolgt die Berechnung der anderen Kriterien zusätzlich noch einmal für diesen Zeitraum. Dabei ergeben sich zum Teil deutliche Unterschiede gegenüber dem Zeitraum 1997 bis 2011. So sind die Werte zum Teil im Zeitraum ab 2002 höher und andere Gebiete werden dort gar nicht erfasst. Beispielhaft ist dies für den HDA mit den Werten des HSS in Abbildung 6.8 für den Zeitraum 1997 bis 2011 in a) und 2002 bis 2011 b) dargestellt. Der schwarze Kreis markiert hier ein zuerst nicht detektiertes Gebiet, der graue Kreis bei Stuttgart ein Gebiet, dass für den kürzeren Zeitraum höhere Werte erzielt. Bei diesem Vergleich lässt sich der starke Einfluss eines einzelnen Hagelereignisses auf die Ergebnisse erkennen. Dabei können besonders starke Hagelereignisse die Werte der Gütemaße auch deutlich verbessern.



(a) POSH

(b) Mason Kriterium



(c) Auer Kriterium

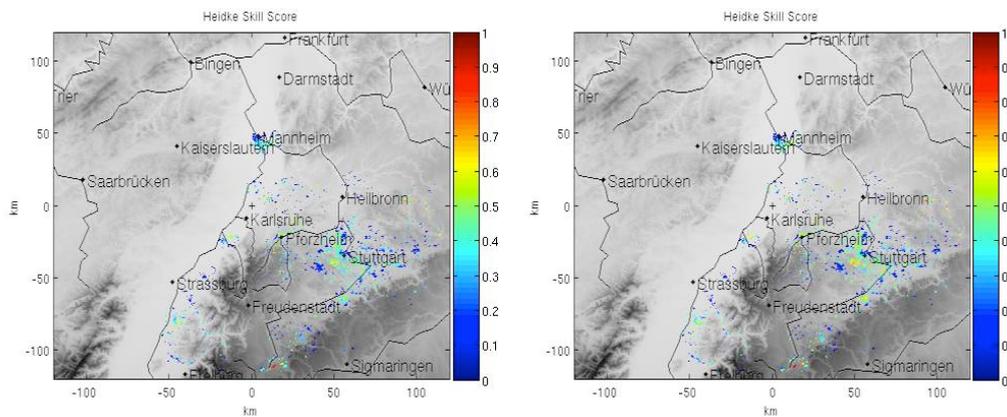
(d) Waldvogel Kriterium
mit $(H_{45} \text{ dBZ} - H_{0^\circ\text{C}}) > 4500 \text{ m}$ (e) Waldvogel Kriterium
mit $(H_{50} \text{ dBZ} - H_{0^\circ\text{C}}) > 3000 \text{ m}$ (f) Waldvogel Kriterium
mit $(H_{55} \text{ dBZ} - H_{0^\circ\text{C}}) > 2000 \text{ m}$

Abb. 6.6: Darstellung des HSS für die POSH, Mason-Kriterium, Auer-Kriterium und Varianten des Waldvogel-Kriteriums über den Zeitraum 1997 bis 2011, berechnet für jeden Punkt (Auflösung $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$).

Die Berechnung der Gütemaße zeigt, dass die verschiedenen Kriterien nicht in allen Regionen gleich gut Hagel detektieren. So werden im Großraum Stuttgart, im Neckertal und im Tal zwischen Schwarzwald und Schwäbischer Alb bei allen Kriterien gute Ergebnisse erzielt, im Rheintal dagegen teilweise deutlich schlechtere Werte. Dies kann mit der Anzahl und Stärke der Hagelgewitter erklärt werden. So treten in den Bereichen Großraum Stuttgart, Neckertal und dem Tal zwischen Schwarzwald und Schwäbischer Alb nach Puskeiler (2009) die meisten und stärksten Hagelgewitter auf (siehe auch Abbildung 3.3). Auch die Abbildung 6.1 zeigt diese Häufigkeitsverteilung der Hagelschadentage an. Dabei hat die Einzelfallstudie bereits ergeben, dass gerade bei sehr starken Hagelgewittern die Kriterien gut Hagel detektieren. In den Bereichen mit niedrigeren Werten der Gütemaße treten Hagelgewitter seltener und oft in geringerer Stärke auf. Gerade bei schwächeren Hagelgewittern kann Hagel bereits durch die Kriterien detektiert werden, aber noch kein Hagelschlag am Boden verursachen oder es fällt Hagel mit einer Größe < 2 cm, der keine Schäden an Gebäuden verursacht. In diesen Fällen kann die Hageldetektion nicht durch Gebäudeschäden verifiziert werden. Hinzu kommen noch Dämpfungseffekte, durch die vor allem schwächere Gewitter den jeweils vorgegebenen Schwellenwert nicht mehr erreichen. Solche Dämpfungseffekte kommen jedoch im gesamten Untersuchungsgebiet und fast bei allen Ereignissen vor. Auch im Bereich nordwestlich von Karlsruhe liegt eine leichte Erhöhung der Hagelschadentage im Vergleich zur Umgebung. Hier ist die Detektion und somit auch die Berechnung der Gütemaße in direkter Umgebung des Radars durch den Elevationswinkel vom Radar bei den meisten Kriterien nicht möglich. Der Vergleich der zwei Zeiträume, 1997 bis 2011 und 2002 bis 2011, ergibt zudem, dass über den kürzeren Zeitraum zum einen noch nicht alle Gebiete erfasst werden. Zum anderen zeigt es sehr deutlich, welchen Einfluss starke bzw. sehr schwache Ereignisse auf die Höhe der Gütemaße nehmen. So haben seltene starke Hagelereignisse im kürzeren Zeitraum einen höheren Einfluss auf die Statistik.

Werden die Kriterien einzeln betrachtet, zeigen sich beim HDA in allen Bereichen die besten Resultate. Am schlechtesten ist hier das Waldvogelkriterium mit $(H_{45\text{dBZ}} - H_{0^\circ\text{C}}) > 4.500$ m, trotz der bereits angehobenen Schwellenwerte. Die beiden an das Waldvogelkriterium angelehnten Kriterien (Abbildung 6.6 e und f) zeigen hier bessere Werte im Vergleich zu Abbildung 6.6d, sind aber deutlich schlechter als die Werte des HDA. Beim Vergleich zwischen den drei Varianten des Waldvogel-Kriteriums ergibt sich dabei das beste Ergebnis mit der Differenz $\Delta H_{55\text{dBZ}} > 2.000$ m. Vor dem Hintergrund, dass alle anderen Kriterien beim kürzeren Zeitraum bessere Gütemaße erzielen und das Auer-Kriterium gerade in der Einzelfallanalyse mit dem Waldvogel-Kriterium ($\Delta H_{45\text{dBZ}} \geq 1,4$ km) die schlechtesten Werte erreicht, ist auch das Auer-Kriterium für die Hageldetektion nicht geeignet. Die POSH hat in der Einzelfallbetrachtung zusammen mit dem HDA die besten Werte erlangt. Diese guten Ergebnisse können hier nicht bestätigt werden, da die Werte des HSS auch im Großraum Stuttgart und Neckertal oft nicht höher als 0,5 sind.

Werden die Gütemaße über das gesamte Untersuchungsgebiet und nicht pro Gitterpunkt berechnet ergeben sich die Ergebnisse in Abbildung A.5. Auch hier zeigt sich der gleiche Trend der Güte der verschiedenen Verfahren zur Detektion von Hagel. So erreicht beispielsweise der HDA (Abbildung 6.9) einen HSS von 0,36 über dem gesamten Gebiet. Werden zu Auswertung die Be-

bauung aus den CORINE Landnutzungsdaten verwendet, ergibt sich ein HSS von 0,40. Die Werte der POD liegen bei 0,69 für das gesamte Gebiet bzw. 0,74 nur über bebauten Gebiet. Die FAR ist über das gesamte Gebiet mit Verwendung der Bebauungsdaten 0,64 und ohne 0,69. Diese Werte sind recht gut, wird dabei die Auswertungsmethode berücksichtigt. Gerade in ländlichen Gebieten sind die Postleitzahlgebiete recht groß und gleichzeitig die Bebauungsdichte niedrig. Sind in einer Ortschaft Gebäude durch Hagel beschädigt worden, so wird nach den Schadendaten auch für die anderen Ortschaften Hagelschlag im Postleitzahlgebiet angenommen, aber nicht unbedingt durch eines der Hagelkriterien detektiert. Daraus können falsche Werte für die Kontingenztabelle resultieren, die sich besonders auf die Berechnung der Gütemaße für das gesamte Untersuchungsgebiet auswirken. Hinzu kommt, dass in Gebieten direkt im Lee des Schwarzwalds, die durch Abschattungseffekte des Nord-Schwarzwalds behindert sind, eine Detektion von Hagel erschwert wird. Wird zusätzlich zu diesen beiden Punkten noch beachtet, dass die Einzelfallanalyse eine teilweise falsche Datumszuweisung aufzeigt, kann dies im gesamten Untersuchungsgebiet zu Fehlern in der Berechnung der Gütemaße führen, falls diese in einem anderen Postleitzahlgebiet liegen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei der langjährigen Auswertung der HDA sich als bestes Hageldetektionsverfahren herausgestellt hat. Dabei zeigen sich regionale Unterschiede in der Qualität, die im nächsten Abschnitt über die räumliche Variabilität der Differenz der vertikalen Struktur untersucht werden. Über den langen Zeitraum ergibt dabei der Vergleich der Berechnung mit und ohne Berücksichtigung der Bebauung einen geringeren Unterschied als bei der Einzelfallanalyse. Der Grund hierfür ist die Beschränkung der Schadendaten auf Postleitzahlgebiete. So kann gerade im ländlichen Raum ein Postleitzahlgebiet mehrere getrennte Ortschaften umfassen. Auch dürfen die Randgebiete des Radarbereichs nicht zur Auswertung hinzugenommen werden, da gerade in diesen Bereichen der Radarstrahl zu stark aufgeweitet ist, um verlässliche Aussagen über die gemessene Reflektivität und die daraus berechneten Hageldetektionen zu treffen. Hinzu kommen die Abschattungseffekte des Nord-Schwarzwalds, die eine Detektion von Hagel erschweren. Auch die falsche zeitliche Zuordnung der Entstehung der Schäden kann die Auswertungsergebnisse verschlechtern, indem Postleitzahlgebiete ausgewertet werden, in denen in Wirklichkeit kein Hagelschlag aufgetreten ist.

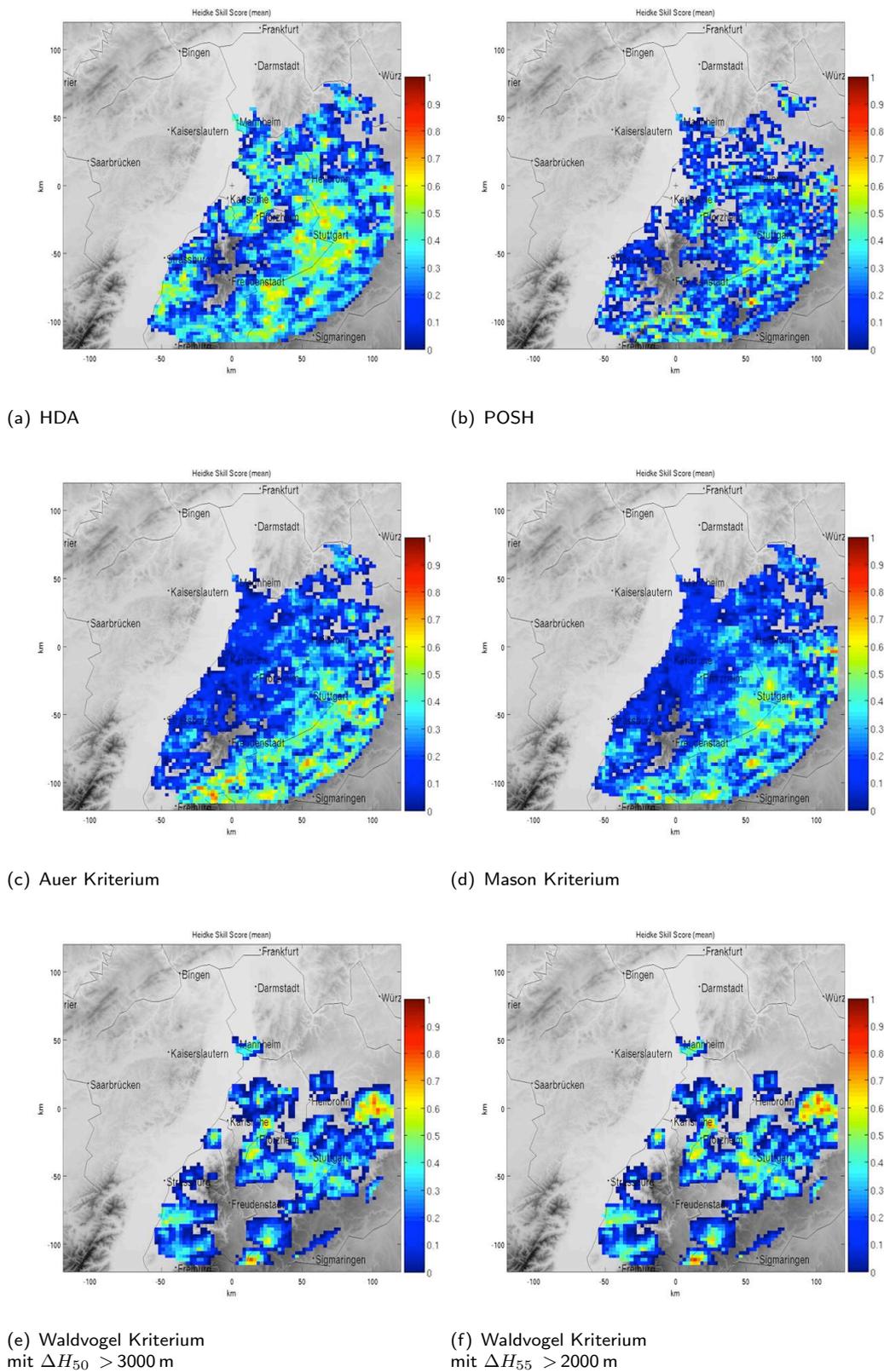
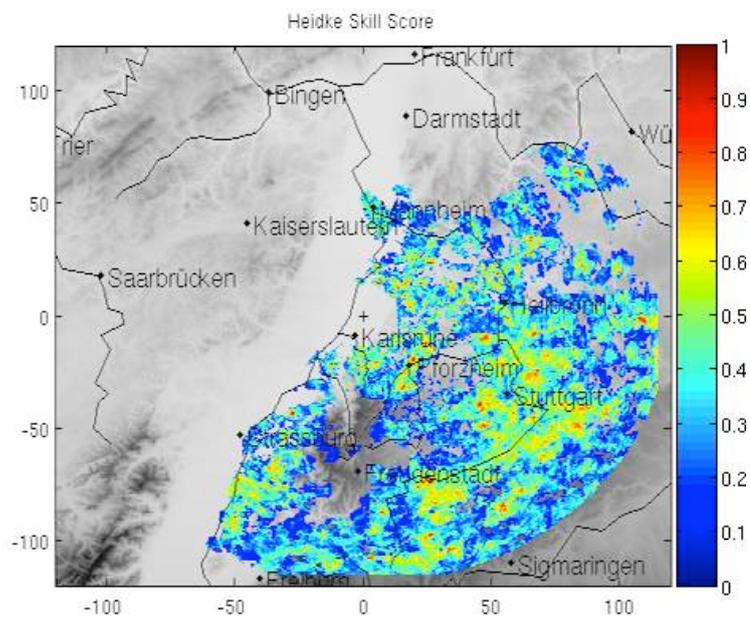
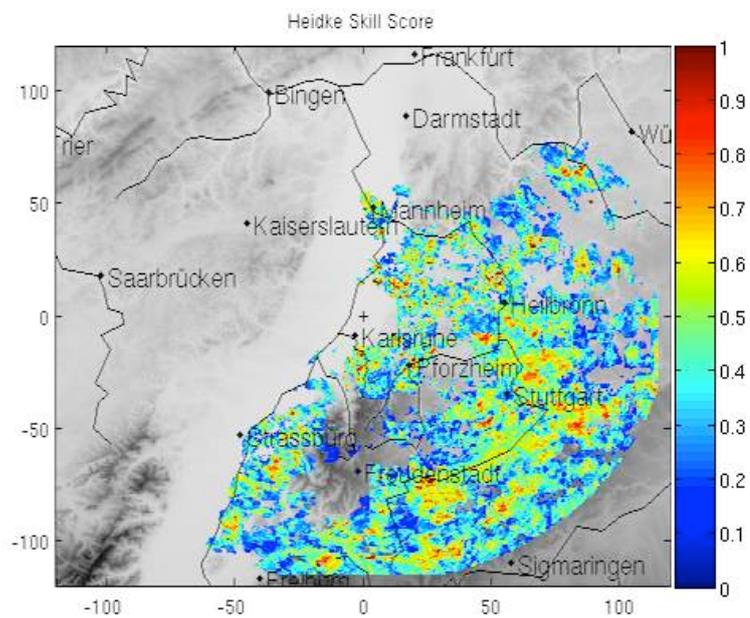


Abb. 6.7: Darstellung des HSS für HDA, POSH, Mason-Kriterium, Auer-Kriterium und Varianten des Waldvogel-Kriteriums über den Zeitraum 1997 bis 2011, berechnet für jeden Punkt (Auflösung $2,5 \text{ km} \times 2,5 \text{ km}$)



(a) 1997 bis 2011



(b) 2002 bis 2011

Abb. 6.8: Darstellung des HSS für den HDA im Zeitraum 1997 bis 2011 (a) und 2002 bis 2011 (b) für das gesamte Untersuchungsgebiet.

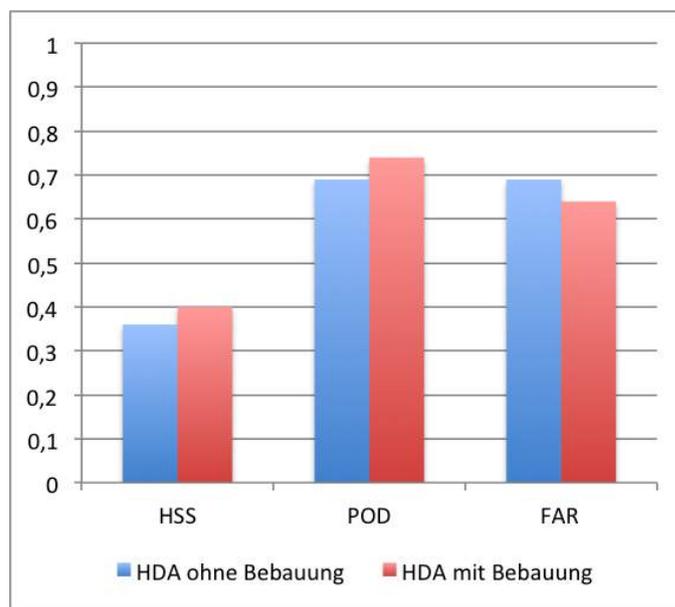


Abb. 6.9: Darstellung der Gütemaße des HDA für 15 Jahre über dem gesamten Untersuchungsgebiet.

6.2 Auswertung der vertikalen Erstreckung konvektiver Ereignisse

Räumliche Verteilung im Untersuchungsgebiet

Abschließend wird noch die vertikale Erstreckung der Reflektivitäten 45, 50 und 55 dBZ untersucht. Die Abbildung 6.10 zeigt dazu die räumliche Verteilung der maximal erreichten Höhe der

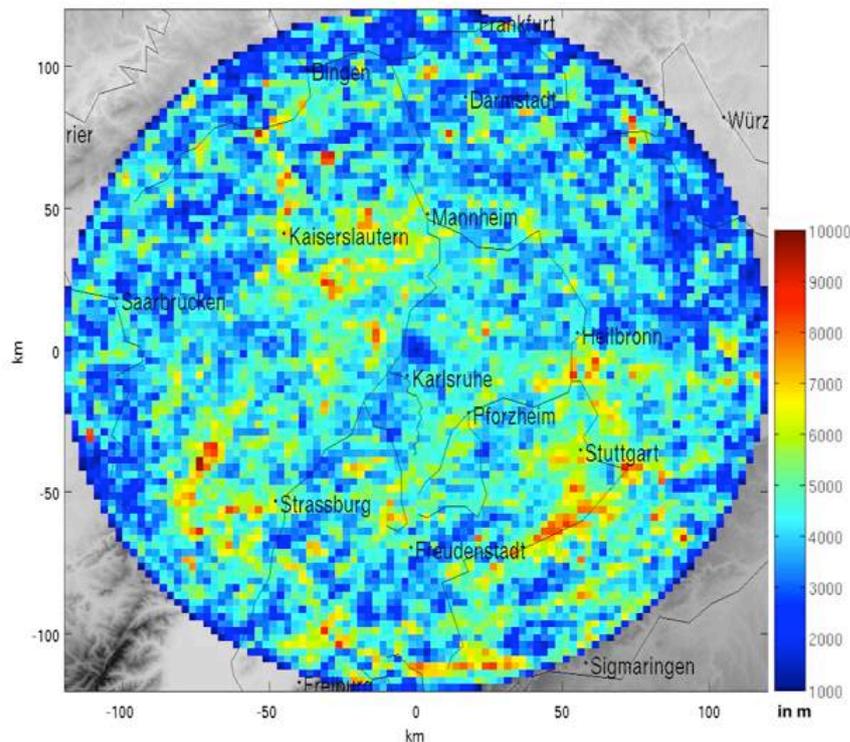
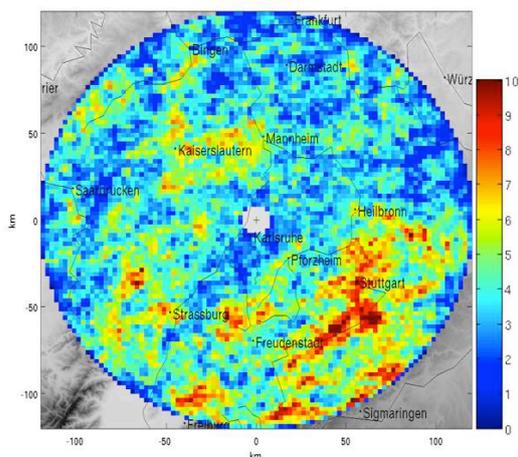
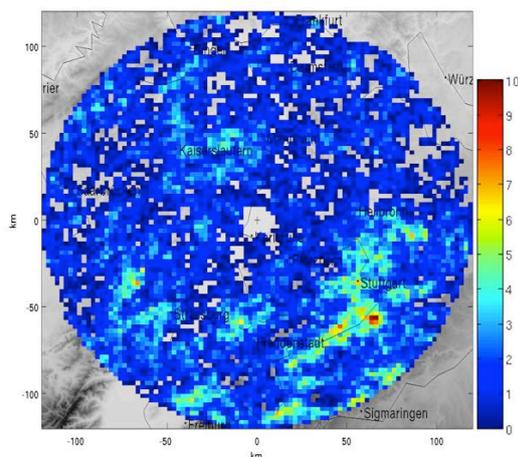


Abb. 6.10: Darstellung der maximal gemessenen Höhe der 55 dBZ Reflektivität mit der räumlichen Auflösung von 2,5 km×2,5 km über 15 Jahre.

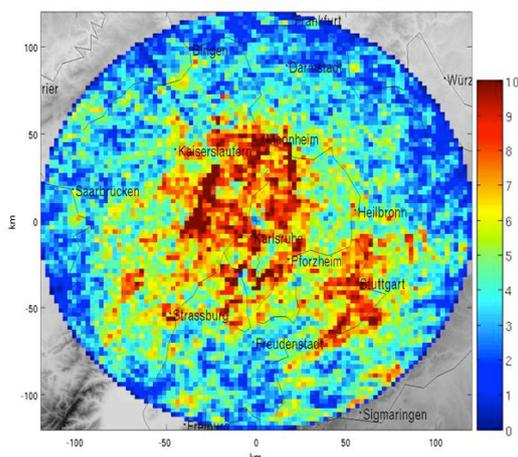
55 dBZ Reflektivität zwischen 1997 und 2011 in den Monaten April bis September. Nach Mason ist dieser Wert der Reflektivität mit Hagel verbunden. Dabei werden Höhen von 1.000 bis 8.000 m erreicht. Die Maxima treten vor allem im Bereich des Neckertals an der Nordkante der schwäbischen Alb auf. Hierbei muss beachtet werden, dass diese Höhe durch ein einziges Ereignis erreicht werden kann. Daher ist in Abbildung 6.11 zusätzlich die Anzahl der Vertikalerstreckungen der 45, 50 und 55 dBZ Reflektivitäten ab einer bestimmten Mindesthöhe dargestellt. Auch hier lässt sich eine ähnliche räumliche Struktur wie die der Anzahl der Hagelschadentage erkennen. Außerdem wird die Vermutung, dass die 45 dBZ Reflektivität häufig die Höhe von 5.000 m (Abbildung 6.11a) überschreitet, und damit den Schwellenwert des Waldvogelkriteriums erreicht, bestätigt. Dadurch wird zu häufig Hagelschlag detektiert, aber nicht durch Gebäudeschäden bestätigt. Dies zeigen beispielsweise die niedrigen HSS-Werte des Waldvogel-Kriterium in Abbildung 6.6d. Die verti-



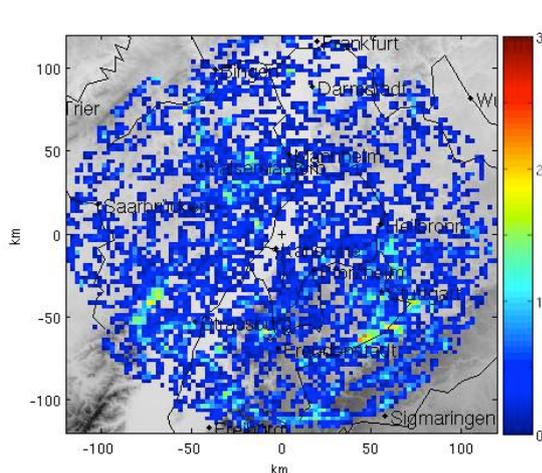
(a)



(b)



(c)



(d)

Abb. 6.11: Anzahl der Tage mit einer vertikalen Ausdehnung von 45 dBZ über 5.000 m (a), 50 dBZ über 5.000 m (b), 55 dBZ über 250 m (c) und 55 dBZ über 5.000 m (d) mit einer Auflösung von $2,5 \text{ km} \times 2,5 \text{ km}$.

kale Erstreckung von 50 dBZ über 5.000 m (Abbildung 6.11b) ist ein Bestandteil des HDA. Der Vergleich dieser Abbildung mit der Darstellung der Anzahl der kategoriellen Größe a (Abbildung 6.12 a) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Das belegt, dass der HDA fast immer erfüllt ist, sobald die 50 dBZ Reflektivität die Höhe von 5.000 m erreicht. Der Vergleich der Abbildung 6.11 mit Abbildung 6.7 ergibt, dass beim HDA auch in den Bereichen mit einer niedrigen Anzahl der Vertikalerstreckungen die HSS-Werte gut sind. Aber auch hier ist zu erkennen, dass die geringe Bebauungsdichte im ländlichen Raum die Auswertung beeinträchtigt. So ist zwar eine hohe Anzahl an Vertikalerstreckungen östlich von Straßburg zu erkennen, jedoch sind hier die Werte für den HSS nicht $> 0,1$. Die Abbildung 6.11c ist ähnlich dem Mason-Kriterium mit dem Unterschied,

dass hier eine vertikale Erstreckung der 55 dBZ Reflektivität von 250 m vorliegen muss. Hier ist vor allem die Anzahl bei Karlsruhe und bei Pforzheim sehr hoch. Der Vergleich mit der Anzahl der kategoriellen Größe a in Abbildung 6.12 zeigt gerade in diesen Gebieten keine Übereinstimmung. Man kann daraus ableiten, dass die 55 dBZ wesentlich häufiger gemessen werden als Hagelschlag am Boden auftritt. Dies wird auch durch die niedrigen HSS-Wert in den Abbildungen 6.6b und 6.7d in diesen Gebieten belegt. In Abbildung 6.11d ist die Anzahl der Vertikalerstreckung von 55 dBZ über eine Mindesthöhe von 5000 m dargestellt. Dies ist in etwa vergleichbar mit dem veränderten Waldvogel-Kriterium $\Delta H_{55} \geq 2000$ m. Hier zeigt sich, dass in vielen Gebieten dieser Schwellenwert nicht überschritten wird und somit die Flächen ohne HSS-Werte in Abbildung 6.7 erklärt werden. Da die Gewitter schon recht stark sein müssen um hier detektiert zu werden, kann diese Variation des Waldvogel-Kriteriums nicht für schwache Gewitter verwendet werden.

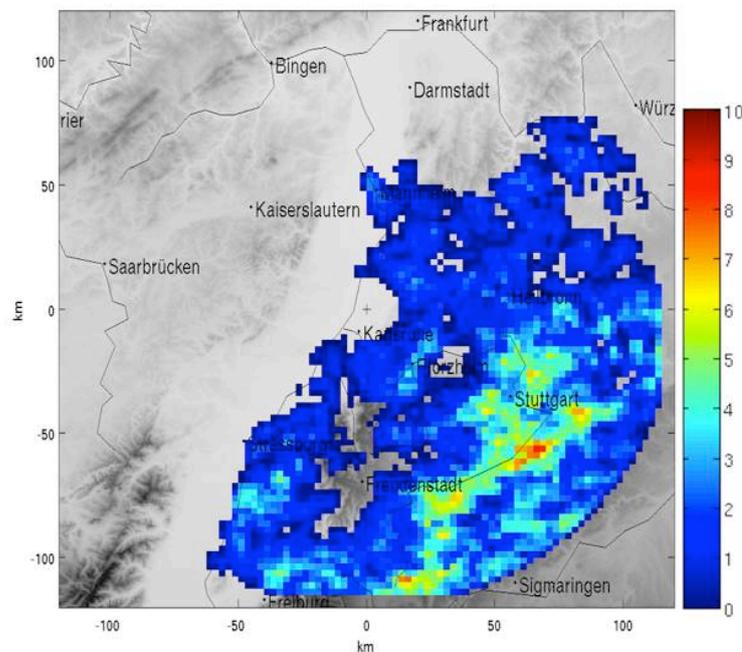
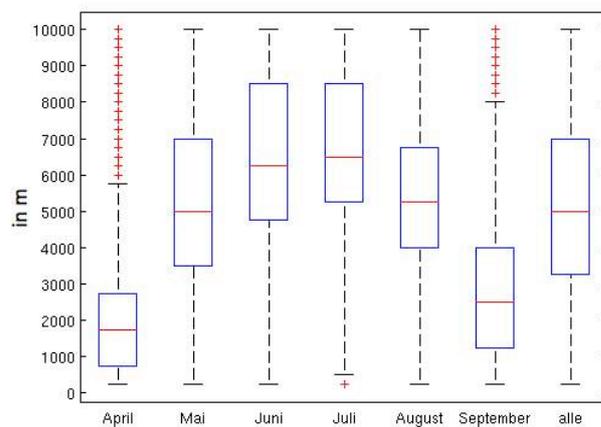


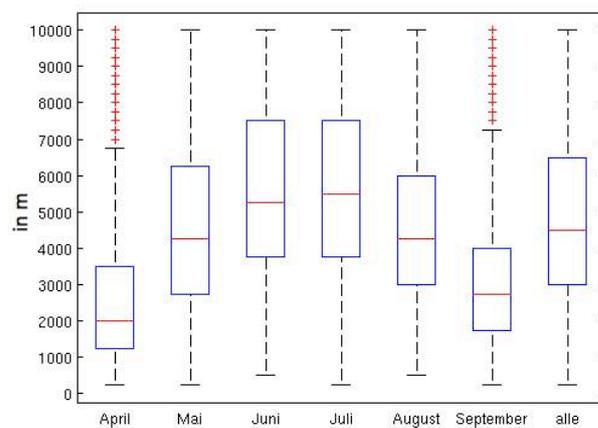
Abb. 6.12: Darstellung der kategoriellen Größe a der Kontingenztabelle für den HDA mit einer räumlichen Auflösung von $2,5 \text{ km} \times 2,5 \text{ km}$ im Zeitraum 1997 bis 2011.

Betrachtung des Jahresgangs

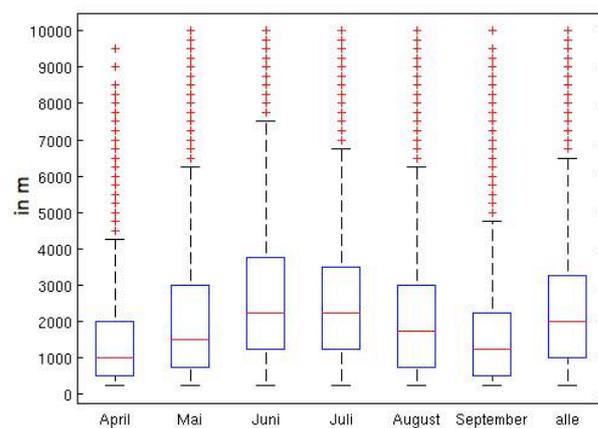
Neben der räumlichen Betrachtung der vertikalen Ausdehnung bestimmter Reflektivitäten ist in Abbildung 6.13 der zeitliche Verlauf der vertikalen Erstreckung mittels Boxplots dargestellt. Hierdurch kann zum einen ein möglicher Jahresgang deutlich hervorgehoben werden. Zum anderen ist es dadurch möglich zu überprüfen, ob gerade in den Übergangsmonaten April und September die verschiedenen Hagelkriterien überhaupt erfüllt werden können. Für die Boxplots stehen dabei die maximal gemessene Vertikalerstreckung der Reflektivitäten 45, 50 und 55 dBZ an je-



(a) 45 dBZ



(b) 50 dBZ



(c) 55 dBZ

Abb. 6.13: Auswertung der maximalen Vertikalerstreckung der Reflektivitäten von 45 dBZ, 50 dBZ und 55 dBZ im Zeitraum von 1997 bis 2011 über dem gesamten Radargebiet mittels Boxplots. Nähere Erläuterungen siehe Text.

dem Gitterpunkt für jeden Monat zur Verfügung. Die Box entspricht dem Bereich, in dem 50% der Daten liegen, die am unteren Rand durch das 25%-Perzentil und am oberen Rand durch das 75%-Perzentil begrenzt sind. Der rote Strich in der Box gibt den Wert des Median wieder. Die beiden horizontalen schwarzen Striche, auch Whisker genannt, stellen alle Werte dar, die innerhalb der 1,5-fachen des Interquartilsabstands liegen. Werte außerhalb dieses Bereichs werden als Ausreißer angezeigt (rote Kreuze).

Die kleinste hier vertikale Erstreckung liegt hier bei 250 m. Es zeigt sich für alle drei Reflektivitätsstufen ein deutlich ausgeprägter Jahresgang mit einem Maximum im Juli, wobei der 50% Bereich der mittleren Daten für die 55 dBZ Reflektivität im Juni eine größere Spannweite besitzt als im Juli. Der stärkste Anstieg ist dabei im Übergang vom April zum Mai zu verzeichnen, ein weitere nicht ganz so prägnanter Übergang liegt zudem vom August zum September vor. Dies liegt daran, dass erst zum Ende des Aprils die Einstrahlung stark genug ist, um hochreichende Konvektion mit Hagelbildung auszulösen. Analog dazu nimmt die Einstrahlung im September stark ab, so dass ab Mitte September nur noch selten Hagelgewitter auftreten. Auffällig ist zudem die Schiefe der Verteilung, also die Lage des Median zum mittleren 50%-Perzentil. Diese Rechtsschiefe deutet an, dass mehr Werte der Vertikalerstreckung in den unteren Höhen zu finden sind. Dabei ist die Schiefe des Medians bei allen drei Reflektivitäten ähnlich. Bei der Auswertung der 50 dBZ Reflektivität ergibt sich für die Monate mit den häufigsten Hagelereignissen, Juni und Juli, ein Median von über 5.000 m. Neben dem jahreszeitlichen Verlauf zeigt sich auch, dass in den Monaten Mai bis August bei den Reflektivitäten von 45 und 50 dBZ vertikale Erstreckungen von 10.000 m durchaus vorkommen und nicht mehr als Ausreißer betrachtet werden. Selbst bei der Reflektivität von 55 dBZ treten vertikale Ausdehnungen von 10.000 m auf. Die Boxplots über die gesamten Monate April bis September zeigt für die 45 dBZ einen Median in Höhe von 5.000 m und das 75%-Perzentil bei 7.000 m. Die Werte der 50 dBZ sind etwas geringer und liegen für den Median bei 4.500 m und für das 75%-Perzentil bei 6.500 m. Deutlich geringer sind hier die Werte der 55 dBZ Reflektivität. Für den Meridian ergibt sich hier eine Höhe von 2.000 m und das 75%-Perzentil liegt bei etwa 3.200 m.

Die Untersuchung der vertikalen Ausdehnung der Reflektivitäten 45, 50 und 55 dBZ (Abbildung 6.11) zeigen eine ähnliche räumliche Verteilung wie die Anzahl der Hagelschadentage. Besonders im Neckertal treten vermehrt hohe Reflektivitäten über eine große vertikale Erstreckung auf. Die jahreszeitliche Auswertung (Abbildung 6.13) ergibt nicht nur einen Jahresgang mit einem Maximum im Juli, sondern zeigt auch deutlich, dass auch die 50 und 55 dBZ Reflektivitäten eine vertikale Erstreckung von 10.000 m erreichen können.

7. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden verschiedene Detektionsverfahren für Hagel auf Radardaten angewendet und untersucht, inwieweit diese tatsächlich Rückschlüsse auf Hagelschlag am Boden zulassen. Zudem wurde die vertikale Ausdehnung verschiedener Reflektivitätsstufen auf ihre räumliche und jahreszeitliche Verteilung hin ausgewertet. Die Radardaten, die zur Auswertung in dieser Arbeit verwendet wurden, liegen als dreidimensionale Radardaten in Form von Rohradardaten der Radarreflektivität vom IMK-Radar im Zeitraum von 1997 bis 2011 vor. Die Abdeckung des IMK-Radar umfasst ein Gebiet mit einem Radius von 120 km um das Radar am KIT Campus Nord. Für die Berechnungen der verschiedenen Kriterien standen neben den Radardaten auch Schadendaten von Gebäuden der SV Sparkassenversicherung zur Verfügung. Die Schadendaten lagen sowohl georeferenziert und hausgenau für Einzelfallanalyse als auch für 5-stellige Postleitzahlgebiete für eine langjährige Statistik von 1997 bis 2011 vor. Durch die Pflichtversicherung und die Monopolstellung der Gebäudeversicherung bis 1994 liegen diese Daten in guter räumlicher Abdeckung vor. Zudem wurden für die Berechnung der Hagelkriterien die Höhen der 0°C und -20°C -Grenzen aus Radiosondenaufstiegen von Stuttgart für den Zeitraum 1997 bis 2011 berechnet und die Wolkenoberflächentemperatur aus Satellitendaten vom NOAA NCEP-NCAR ¹ von 2002 bis 2011 verwendet.

Auf die Radardaten wurden die Kriterien nach Mason (1971), Waldvogel et al. (1979), Holleman et al. (2000), Auer (1994), der Hail Detection Algorithm (HDA) nach Smart und Alberty (1985) und das Verfahren Probability of Severe Hail (POSH) nach Witt et al. (1998) angewendet und qualitativ und quantitativ ausgewertet. Die Kriterien verwenden dabei verschiedene Schwellenwerte. So fällt nach Mason ab einer Reflektivität von 55 dBZ Hagel. Bei Waldvogel ist eine Differenz zwischen 0°C -Grenze und 45 dBZ Reflektivität von mindestens 1,4 km und nach Holleman von 1,76 km nötig, damit Hagelschlag auftritt. Auer dagegen kombiniert die gemessene Reflektivität im Low-Level CAPPI mit der Wolkenoberflächentemperatur mit einem empirisch gemessenen Schwellenwert. Der HDA detektiert Hagel bei einer Reflektivität von 50 dBZ über 5 km und einer Höhe des Echotops (15 dBZ) von mindestens 8 km. Bei der POSH werden die hagelkinetische Energie mit einer Wichtungsfunktion der Höhe der 0 und -20°C -Grenze verknüpft. Dabei ergibt sich eine Hagelwahrscheinlichkeit in %.

Die Auswertung der verschiedenen Hagelkriterien erfolgte zunächst für einzelne Fallbeispiele, um

¹NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, NCEP: National Centers for Environmental Prediction, NCAR: National Center for Atmospheric Research

die Güte und die räumlichen Unterschiede der Kriterien zu evaluieren. Die Tage waren durch verschiedene Gewittersysteme und verschieden starke Hagelereignisse charakterisiert. Für die Auswertung der Fallbeispiele liegen die Gebäudeschadendaten georeferenziert vor und dienen bei der Kontingenztabelle, die für die quantitative Auswertung verwendet wurde, als beobachteter Hagelerschlag. Dabei musste, um als positives Ereignis gezählt zu werden, in einem Raster von 10 km Kantenlänge ein Gebäudeschaden auftreten und korrekt aus Radardaten abgeschätzt werden. Die Auswertung der einzelnen Kriterien hat dabei große Unterschiede ergeben. Zum einen je nach Stärke des Hagelgewitters und zum anderen im Vergleich zu den anderen Kriterien. Die statistische Auswertung der Einzelfallstudien hat dabei den HDA und die POSH als beste Detektionsverfahren ermittelt. Der HDA verwendet als einziges Kriterium für hochreichende Konvektion die Mindesthöhe des Echotops. Durch dieses Verfahren können entstehende Zellen und Helle Band Effekte bei stratiformen Niederschlag ausgeschlossen werden. Die POSH verwendet zum einen die Reflektivitätswerte 45 und 55 dBZ, zum anderen die Temperaturen 0 und -20°C in der jeweiligen Höhe. Dabei wird auch hier wieder der Rückschluss der Reflektivität auf Hagel genutzt: Hagelerschlag ist dabei umso wahrscheinlicher, je höher der Reflektivitätswert und gleichzeitig niedriger die Temperatur. Das Mason-Kriterium zeigt gerade bei sehr starken Hagelereignissen ohne Dämpfungseffekte durch vorgelagerte Zellen oder Wasserfilm auf dem Radom gute Ergebnisse. Bei schwachen Hagelgewittern oder starken Dämpfungseffekten wird der Schwellenwert dagegen oft nicht überschritten. Da die 55 dBZ Reflektivität nicht in einer bestimmten Höhe oder vertikalen Ausdehnung auftreten muss, kann das Hagelkriterium auch durch schmelzenden kleinen Hagel oder Graupel unterhalb der 0°C -Grenze erfüllt werden (Helles Band). Diese schmelzen teilweise oder vollständig auf dem Weg zum Boden und verursachen dabei keine Schäden an Gebäuden. Auch das Auer-Kriterium ist bei schwachen Hagelereignissen mit wenigen Gebäudeschäden zur Detektion nicht geeignet. Hier wird häufig die nötige hohe Reflektivität im Low-Level CAPPI nicht erreicht. Das schlechteste Kriterium war dabei das Waldvogel-Kriterium. Es hat den Hagelerschlag deutlich zu oft vorhergesagt. Aus dem Grund wurde es in seiner Differenz zur 0°C -Höhe und in Höhe der Reflektivität verändert. Dabei haben sich als beste Variationen die Differenzen $\Delta H_{45\text{dBZ}} > 4.500\text{ m}$, $\Delta H_{50\text{dBZ}} > 3.000\text{ m}$ und $\Delta H_{55\text{dBZ}} > 2.000\text{ m}$ herausgestellt. Für einen Einzelfall wurde der Einfluss der Dämpfung als auch der Einfluss der bodennahen Verdriftung von Hagel durch Wind auf die Ergebnisse untersucht. Dabei hat die Dämpfung durch vorgelagerte Gewitter oder Schauer teilweise einen deutlichen Einfluss auf die Detektion von Hagel mittels HDA und nach Waldvogel, während sie für die Kriterien nach Auer und den POSH eher unbedeutend ist. Bei der Untersuchung der Verdriftung konnte kein Einfluss durch den Wind in Höhen bis 200 m festgestellt werden. Der Impuls dafür muss daher in höheren Höhen gegeben werden. Eine zusätzliche Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Hagelkriterien und Schäden über einen Zeitraum von 3 bis 5 Tagen zeigte eine häufig falsche zeitliche Zuordnung der Schadenmeldungen. Dies ist gerade bei mehreren Gewittern aufeinander folgender Tage der Fall. Eine weitere Auswertung der Einzelfallbeispiele erfolgte nur über bebauten Gebieten nach den CORINE Landnutzungsdaten. Dabei wurden die berechneten Hagelkriterien nur über bebauten Gebieten ausgewertet. Dadurch konnte bei allen Kriterien eine Verbesserung der statistischen Werte erzielt werden.

Bei der langjährigen statistischen Untersuchung der Hagelkriterien über 15 Jahre haben sich deutliche Unterschiede bei den berechneten Qualitätsmaßen ergeben. Bei dieser Auswertung lagen die Gebäude nicht mehr georeferenziert wie für die Einzelfallbeispiele vor, sondern für fünfstelligen Postleitzahlgebiete. Insgesamt konnten bei allen Kriterien nicht die gleichen guten Werte der Gütemaße wie in der Einzelfallanalyse erreicht werden. Jedoch hebt sich der HDA deutlich von den anderen Kriterien ab. So erzielt der HDA in fast allen Gebieten einen HSS von 0,5 bis 0,6, in einigen Bereichen sogar Werte bis 0,8. Die Kriterien POSH, Auer, Mason und die Varianten des Waldvogel-Kriteriums zeigen dagegen Werte um 0,5 für den HSS über Stuttgart und dem Neckertal, jedoch nur Werte im Bereich 0 bis 0,2 im Rheintal, Kraichgau und Schwarzwald. Die schlechtesten Werte ergeben sich dabei für das modifizierte Waldvogelkriterium mit der Differenz $\Delta H_{45dBZ} > 4.500$ m. Auch die Verwendung der CORINE Landnutzungsdaten hat hier kaum Verbesserung bei den Ergebnissen ergeben. Hierbei wird aber als Grund die grobe Auflösung der Postleitzahlgebiete angenommen.

Neben der Untersuchung der verschiedenen Hagelkriterien wurde auch die vertikale Erstreckung hoher Reflektivitäten von 45, 50 und 55 dBZ berechnet und auf ihre räumliche und jahreszeitliche Verteilung hin untersucht. Bei der maximal aufgetretenen Höhe der 55 dBZ Reflektivität zeigten sich erhöhte Werte vor allem im Bereich des Neckartals. Auch die Anzahl der aufgetretenen Ereignisse mit einer vorgegebenen Mindesterstreckung der Reflektivitäten 45, 50 und 55 dBZ spiegeln die räumliche Verteilung der Hagelschadentage über den Zeitraum von 15 Jahren wider. Die vertikale Erstreckung der 50 dBZ Reflektivität von mindestens 5.000 m stellte dabei eine gute Analogie mit der Anzahl der positiven Beobachtungen des HDA dar. Die vertikale Erstreckung der 55 dBZ Reflektivität von mindestens 250 m ist ähnlich dem Mason-Kriterium. Verglichen mit der Anzahl der positiven Vorhersagen beim Mason-Kriterium war die Anzahl der Tage mit den vertikalen Ausdehnungen der 55 dBZ Reflektivität in einigen Gebieten viel höher. Damit wurde gezeigt, dass das Mason-Kriterium häufig zu oft Hagelschlag detektiert. Die Auswertung der Höhe der 55 dBZ Reflektivität über 5.000 m (entspricht dem Waldvogelkriterium $\Delta H_{55} \geq 2.000$ m) ergab, dass diese nur sehr selten erreicht wird. Das Waldvogelkriterium $\Delta H_{55} \geq 2.000$ m detektiert also nur sehr starke Gewitter mit hoher vertikaler Windgeschwindigkeit, die das Transportieren und Halten der Hagelkörner in diese Höhen (> 5 km) ermöglicht.

Die jahreszeitliche Auswertung ergab nicht nur einen Jahresgang mit einem Maximum im Juli bei allen drei Reflektivitätsklassen, sondern bestätigt, dass auch die 50 und 55 dBZ Reflektivitäten eine vertikale Erstreckung von 10.000 m erreichen können. Zudem wurde die Annahme bestätigt, dass die Reflektivität von 45 dBZ häufig in Höhen über 5.000 m zu finden ist. Der Median liegt dabei im Mai bis August zwischen 5.000 m und 6.500 m. Damit wurde das Waldvogelkriterium ($\Delta H_{45} \geq 1,4$ km), das in etwa in dieser Höhe den Schwellenwert erreicht, zu oft erfüllt.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit haben gezeigt, dass die Detektion von Hagel mittels Radar prinzipiell möglich ist. Da hier jedoch zur Verifikation Gebäudeschäden verwendet wurden, die ab einer Hagelkorngröße von etwa 2 cm auftreten, konnten die Kriterien auf kleinen Hagel nicht untersucht werden. Als besonders geeignet hat sich dabei der HDA herausgestellt. Dieser hat zudem den Vorteil, dass die Berechnung des Schwellenwertes nur über Radardaten erfolgt.

Da bei der Auswertung über die Schadendaten nach fünfstelligen Postleitzahlgebieten teilwei-

se deutlich schlechtere Werte berechnet wurden, sollte eine Untersuchung mit georeferenzierten Schadendaten über einen langen Zeitraum angestrebt werden. Somit könnten die Ergebnisse der Fallstudien gegebenenfalls bestätigt und Fehler durch die ungenaue Ortsangabe eines Postleitzahlgebiets vermieden werden.

Literaturverzeichnis

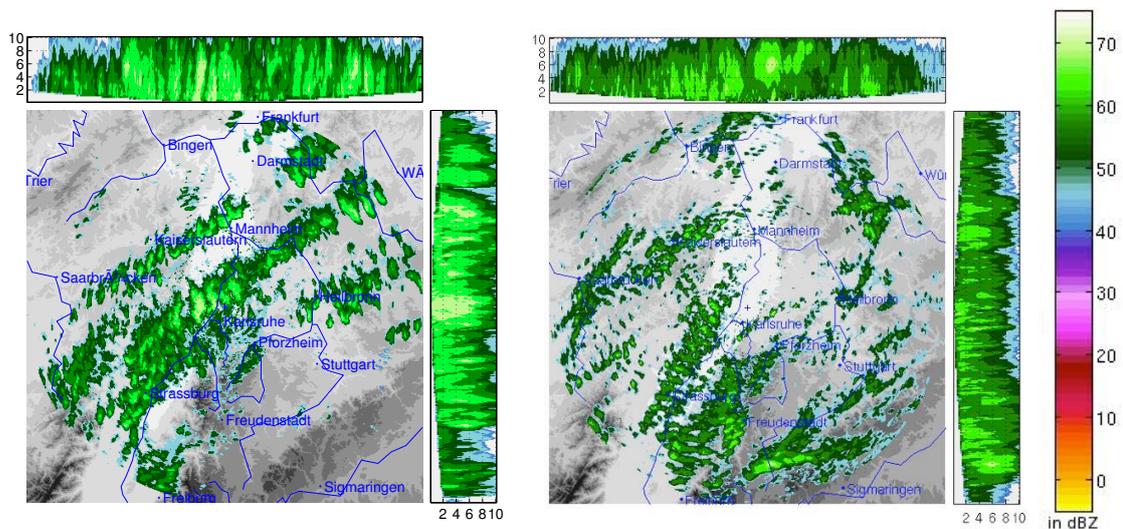
- Auer, A., 1994: Hail recognition through the combined use of radar reflectivity and cloud-top temperatures. *Mon. Weather Rev.*, **122** (9), 2218–2221.
- Blahak, U., 2004: Analyse des Extinktionseffektes bei Niederschlagsmessungen mit einem C-Band Radar anhand von Simulation und Messung. Dissertation, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Bluestein, H. und C. Parks, 1983: A synoptic and photographic climatology of low-precipitation severe thunderstorms in the southern plains. *Mon. Weather Rev.*, **111** (10), 2034–2046.
- Brombach, J., 2012: Modifikation der Strömung über Mittelgebirgen und die Auswirkungen auf das Auftreten hochreichender Konvektion. Diplomarbeit, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Browning, K. und G. Foote, 1976: Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **102** (433), 499–533.
- Cao, Z., 2008: Severe hail frequency over Ontario, Canada: recent trend and variability. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L14 803.
- Damian, T., 2011: Blitzdichte im Zusammenhang mit Hagelereignissen in Deutschland und Baden-Württemberg. Seminararbeit, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Dessens, J., C. Berthet, und J. Sanchez, 2007: A point hailfall classification based on hailpad measurements: The ANELFA scale. *Atmos. Res.*, **83** (2-4), 132–139.
- DWD, 2012: KONRAD – Warnansätze. <http://www.dwd.de/konrad>, Internetseite; Stand: 03-2012.
- Etling, D., 2008: *Theoretische Meteorologie: Eine Einführung*. 3. ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Fujita, T., 1973: Tornadoes around the world. *Weatherwise*, **26** (2), 56–83.
- Grenier, J., P. Admirat, und S. Zair, 1983: Hailstone growth trajectories in the dynamic evolution of a moderate hailstorm. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, **22** (6), 1008–1021.

- Handwerker, J., 2002: Cell tracking with trace3d—a new algorithm. *Atmospheric Research*, **61** (1), 15–34.
- Hohl, R., H. Schiesser, und D. Aller, 2002: Hailfall: the relationship between radar-derived hail kinetic energy and hail damage to buildings. *Atmos. Res.*, **63** (3-4), 177–207.
- Holleman, I. und KNMI., 2001: *Hail detection using single-polarization radar*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- Holleman, I., H. Wessels, J. Onvlee, und S. Barlag, 2000: Development of a hail-detection-product. *Phys. Chem. Earth B, hydrology oceans and atmosphere*, **25**, 1293–1297.
- Höller, H. und P. Meischner, 1993: Untersuchung von mikro-und makrophysikalischen Strukturen und Prozessen in Hagelwolken im Hinblick auf deren Beeinflussbarkeit. *Forschungsber./Dt. Forschungsanst. für Luft-u. Raumfahrt (DLR)*.
- Holton, J. R., 2004: *Dynamic Meteorology*, Vol. 88. 4. ed., Elsevier, Amsterdam.
- Houze, R. A., 1993: *Cloud Dynamics*, Vol. 53. Academic Press, San Diego [u.a.].
- Jaeneke, M., 2012: Radar-Verständnis: Grundlagen, DWD-Netzwerk, Produkte. www.wetterzentrale.de/cgi-bin/webbbs/wzconfig1.pl?noframes;read=78, Internetseite; Stand 02-2012.
- Johns, R. und C. Doswell III, 1992: Severe local storms forecasting. *Weather Forecast.*, **7**, 588–612.
- Kessinger, E. A. B., C. J. und J. W. Smith, 1995: A comparison of the nexrad and nssl hail detection algorithm. *27th conference on Radar Meteorology*, **AMS**, 603–605.
- Kraus, H., 2004: *Die Atmosphäre der Erde : eine Einführung in die Meteorologie*. 3. ed., Springer, Berlin.
- Kugel, P., 2010: Analyse der räumlichen und zeitlichen Entwicklung von Hagelgewittern. Seminararbeit, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Kunz, M., C. Hauck, und C. Kottmeier, 2007: Meteorologische Naturgefahren. Skript zur Vorlesung, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Kunz, M. und S. Mohr, 2009: Trends in Hailstorm frequency and atmospheric characteristics in southwest. *5th European Conference on Severe Storms (ECSS)*.
- Kunz, M. und M. Puskeiler, 2010a: Hail hazard assessment: A new approach. *EGU General Assembly 2010, held 2-7 May, 2010 in Vienna, Austria*, p. 2902, **12**, 2902.
- Kunz, M. und M. Puskeiler, 2010b: High-resolution assessment of the hail hazard over complex terrain from radar and insurance data. *Met. Zeitschrift*, **19** (5), 427–439.

- Kunz, M., J. Sander, und C. Kottmeier, 2009: Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. *Int. J. Climatology*, **29** (15), 2283–2297.
- Kurz, M., 1990: Synoptische Meteorologie-Leitfäden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst. *Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes*.
- Lang, P., 2002: KONRAD. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, **14** (4), 212–212.
- Leary, C. und R. Houze, 1979: The structure and evolution of convection in a tropical cloud cluster. *J. Atm. Sci.*, **36** (3), 437–457.
- Lesins, G. und R. List, 1986: Sponginess and drop shedding of gyrating hailstones in a pressure-controlled icing wind tunnel. *Journal of Atmospheric Sciences*, **43**, 2813–2825.
- Löffler-Mang, M., M. Kunz, und W. Schmid, 1999: On the performance of a low-cost K-band Doppler radar for quantitative rain measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **16** (3), 379–387.
- Ludlam, F., 1950: The composition of coagulation-elements in cumulonimbus. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **76** (327), 52–58.
- Ludlam, F., 1958: The hail problem. *Nubila*, **1**, 12–96.
- Maddox, R., 1980: Mesoscale convective complexes. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **61** (11), 1374–1387.
- Marshall, J. und W. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *J. Atm. Sci.*, **5**, 165–166.
- Mason, B., 1971: *The physics of clouds*. Oxford Univ Pr, Oxford.
- Matson, R. und A. Huggins, 1980: The direct measurement of the sizes, shapes and kinematics of falling hailstones. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 1107–1125.
- Morris, R., 1986: The Spanish plume – testing the forecaster’s nerve. *Meteorol. Mag*, **115**, 349–357.
- Pichler, H., 1997: *Dynamik in der Atmosphäre*, Vol. 3. Spektrum-Hochschultaschenbuch.
- Pruppacher, H. und J. Klett, 1997: *Microphysics of clouds and precipitation*, Vol. 284. Springer, 88–88 S.
- Puskeiler, M., 2009: Analyse der Hagelgefährdung durch Kombination von Radardaten und Schadendaten für Südwestdeutschland. Diplomarbeit, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Queney, P., 1948: The problem of air flow over mountains: A summery of theoretical studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **29**, 16 – 26.

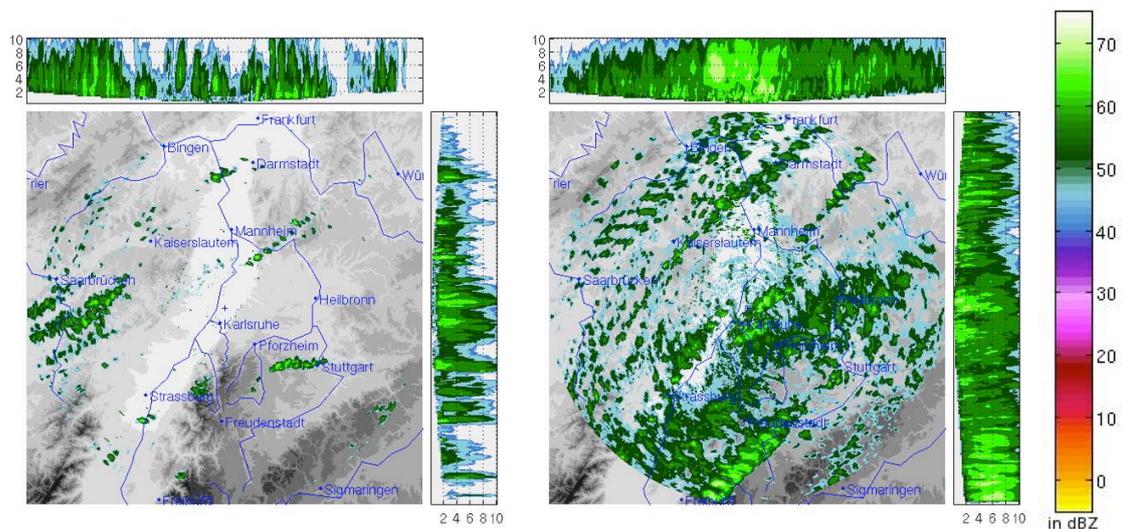
- Rauber, R., J. Walsh, und D. Charlevoix, 2008: *Severe and Hazardous Weather: An Introduction to High Impact Meteorology*. Kendall/Hunt Pub. Co., 645 S.
- Rogers, R., 1979: *A Short Course in Cloud Physics*. Pergamon Press, **1**.
- Sauvageot, H., 1992: *Radar meteorology*. Artech House Publishers.
- Schiesser, H. und W. Schmid, 2005: Monitoring von starken Hagelstürmen in der Schweiz. *meteoradar*.
- Schuma, T., 1938: The theory of hailstone formation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **64 (273)**, 3–21.
- Schuster, S., R. Blong, und K. McAneney, 2006: Relationship between radar-derived hail kinetic energy and damage to insured buildings for severe hailstorms in Eastern Australia. *Atmos. Res.*, **81 (3)**, 215–235.
- Skolnik, M. et al., 1990: *Radar handbook*, Vol. 2. McGraw-Hill New York.
- Smart, J. und R. Alberty, 1985: The NEXRAD hail algorithm applied to Colorado thunderstorms. *Preprints, 14th Conf. on Severe Local Storms, Indianapolis, IN, Amer. Meteor. Soc.*, 244–247.
- Smith, P. L., 2004: The Hail Problem. Vortragstext an der l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària, Lleida, Spanien.
- Stucki, M. und T. Egli, 2007: Elementarschutzregister Hagel, Untersuchungen zur Hagelgefahr und zum Widerstand der Gebäudehülle. *Präventionsstiftung der kantonalen Gebäudeversicherung, Bern*.
- Waldvogel, A., B. Federer, und P. Grimm, 1979: Criteria for the detection of hail cells. *J. Appl. Meteorol.*, **18**, 1521–1525.
- Weisman, M. und J. Klemp, 1986: Characteristics of isolated convective storms. *Mesoscale Meteorology Forecast.*, **15**, 331–358.
- Wilks, D., 1995: *Statistical methods in the atmospheric sciences*, Vol. 100. Academic press, San Diego.
- Witt, A., M. Eilts, G. Stumpf, J. Johnson, E. Mitchell, und K. Thomas, 1998: An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D. *Weather Forecast.*, **13 (2)**, 286–303.
- WMO, 1956: *International Cloud Atlas*, Vol. 1. World Meteorological Organisation.

A. Anhang



(a) 20.06.2002

(b) 16.07.2003



(d) 24.06.2005

(e) 29.07.2005

Abb. A.1: Maxcappi-Plot ab einer Reflektivität von 40 dBZ für die Fallbeispiele für jeweils den gesamten Tag.

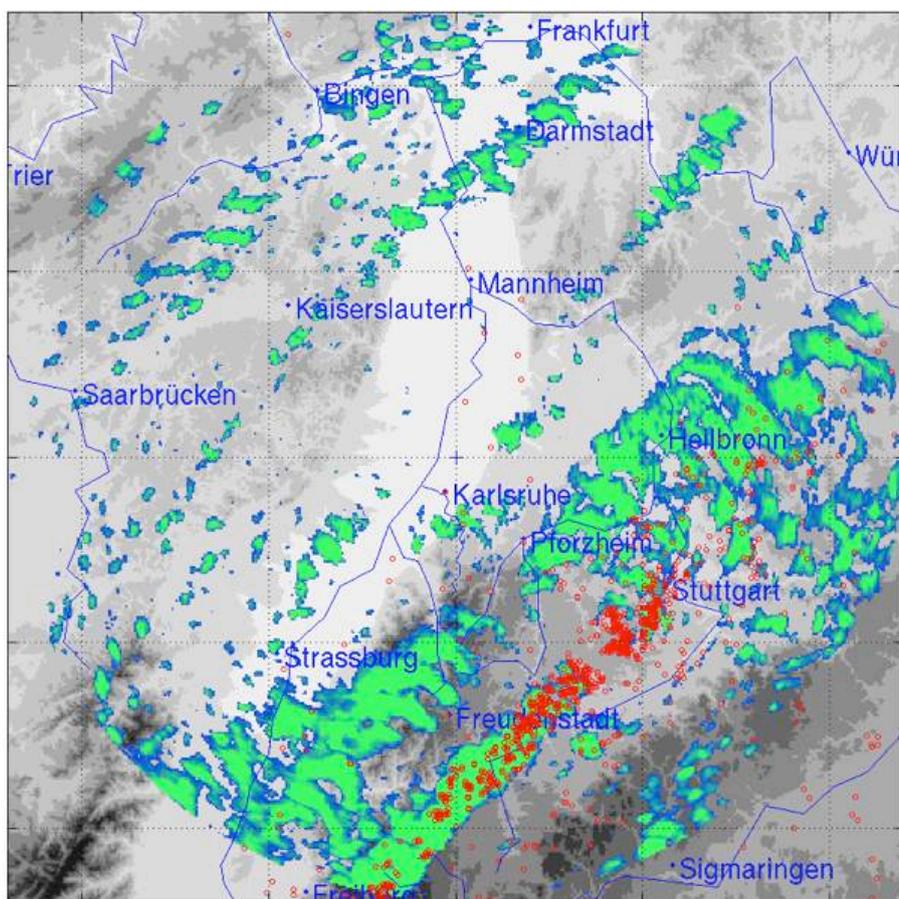


Abb. A.2: Darstellung der Daten des POSH ab einer Hagelwahrscheinlichkeit von 20% (blau) bis 100% (grün). Die roten Punkte stellen die durch Hagel beschädigten Gebäuden dar.

Tabelle A.1: Dargestellt sind die gemessenen Winddaten am 20.06.2002 im Zeitraum von 15:00 bis 16:30 Uhr MEZ. Folgende Winddaten sind hier aufgetragen: mittlere Windgeschwindigkeit über 10 Minuten in den Höhen von 40 m, 100 m und 200 m ($v_m(40)$, $v_m(100)$, $v_m(200)$), sowie in diesen Höhen gemessene maximale Windgeschwindigkeit ($v_{max}(40)$, $v_{max}(100)$, $v_{max}(200)$) und die Windrichtung gemittelt über 10 Minuten in 40 m, 100 m und 200 m ($w_d(40)$, $w_d(100)$, $w_d(200)$).

Uhrzeit in MEZ	$v_m(40)$	$v_m(100)$	$v_m(200)$	$v_{max}(40)$	$v_{max}(100)$	$v_{max}(200)$	$w_d(40)$	$w_d(100)$	$w_d(200)$
15:00	5,93	9,38	13,96	12,70	15,36	17,07	301,89	296,45	281,92
15:10	2,05	5,63	11,16	4,52	8,52	14,20	223,56	255,87	256,42
15:20	0,80	4,07	10,93	1,72	6,96	12,12	107,16	257,28	264,02
15:30	3,42	3,03	8,03	6,50	7,59	10,77	129,96	201,00	250,32
15:40	3,75	7,80	7,43	6,30	9,37	9,63	152,81	176,78	216,51
15:50	3,46	6,42	7,33	5,07	9,01	8,54	169,53	192,30	228,91
16:00	3,26	5,90	6,45	4,97	7,45	7,24	167,43	197,99	242,34
16:10	3,02	6,35	6,32	4,33	7,81	7,01	176,85	209,12	240,38
16:20	2,96	6,64	6,60	4,34	7,18	7,29	194,39	207,23	241,54
16:30	2,97	5,22	6,97	4,19	6,14	7,68	204,79	213,38	247,26

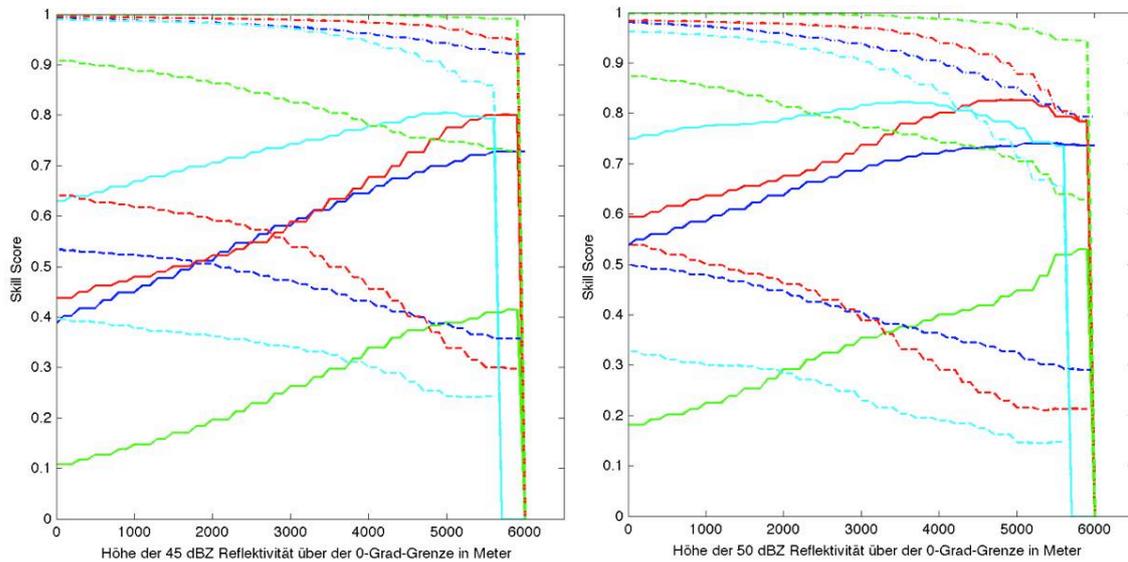
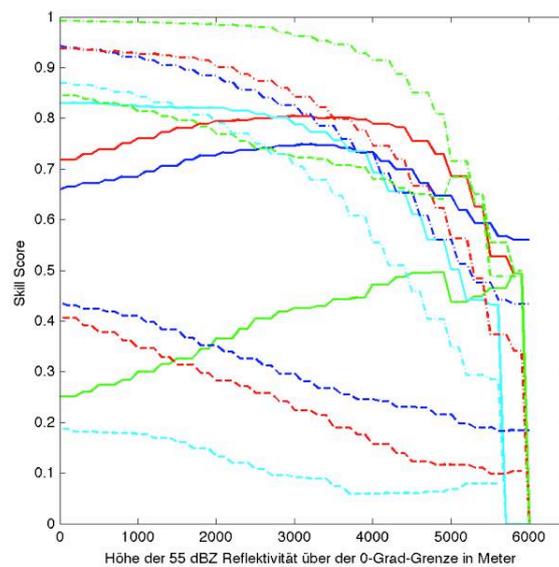
(a) $(H_{45 \text{ dBZ}} - H_{0^\circ \text{C}})$ (b) $(H_{50 \text{ dBZ}} - H_{0^\circ \text{C}})$ (c) $(H_{55 \text{ dBZ}} - H_{0^\circ \text{C}})$

Abb. A.3: Die Graphen stellen den HSS (durchgezogene Linie), den POD (Punkt-gestichelte Linie) und die FAR (gestrichelte Linie) in Bezug zu Höhe der Reflektivitäten von 45 dBZ, 50 dBZ und 55 dBZ über der Höhe der 0°C -Grenze für die Tage 20.06.2002 (blau), 16.07.2003 (rot), 24.06.2005 (grün) und 29.07.2005 (cyan) dar. Dabei wird dann eine positive Vorhersage gewertet, wenn in einem Quadrat um den Schadenpunkt das Kriterium erfüllt ist. Die Kantenlänge des Quadrats ist in diesem Fall 10 km (vgl. Abb.4.5). Die Auswertung findet über gesamten Gebiet statt.

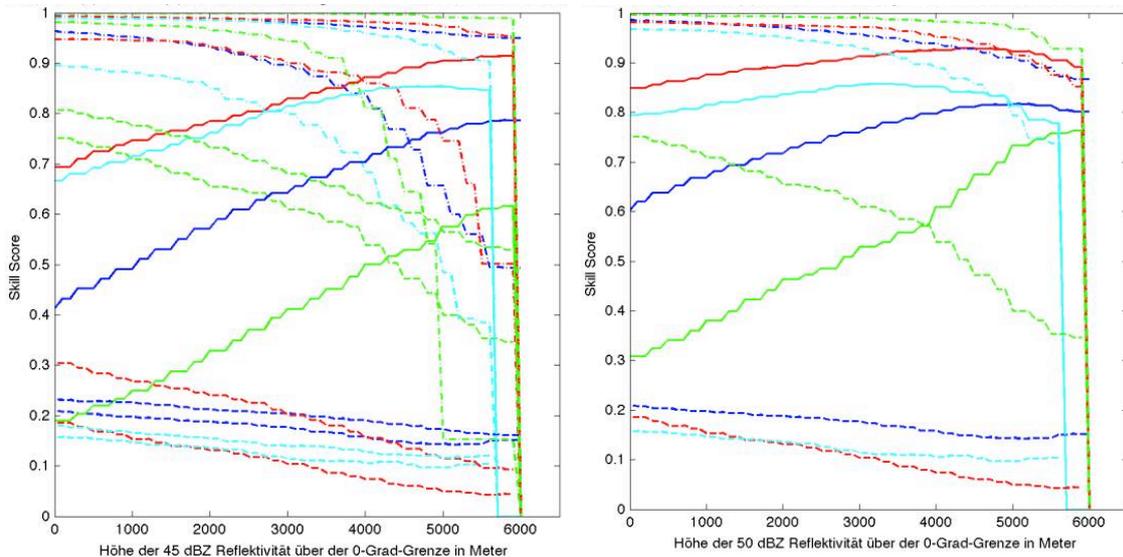
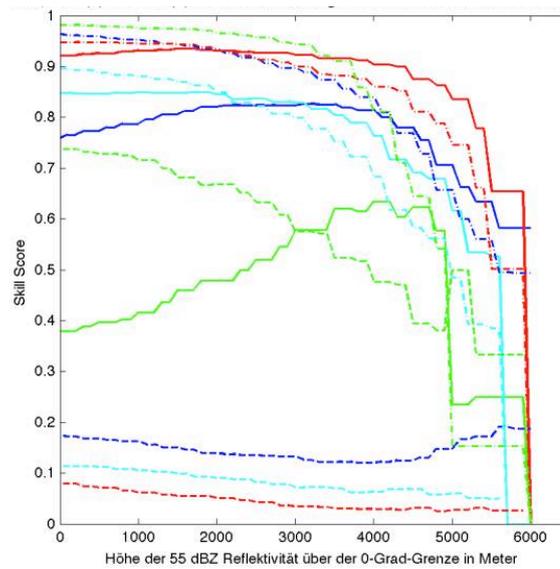
(a) ($H_{45 \text{ dBZ}} - H_{0^\circ \text{C}}$)(b) ($H_{50 \text{ dBZ}} - H_{0^\circ \text{C}}$)(c) ($H_{55 \text{ dBZ}} - H_{0^\circ \text{C}}$)

Abb. A.4: Die Graphen stellen den HSS (durchgezogene Linie), den POD (Punkt-gestichelte Linie) und die FAR (gestrichelte Linie) in Bezug zu Höhe der Reflektivitäten von 45 dBZ, 50 dBZ und 55 dBZ über der Höhe der 0°C -Grenze für die Tage 20.06.2002 (blau), 16.07.2003 (rot), 24.06.2005 (grün) und 29.07.2005 (cyan) dar. Dabei wird dann eine positive Vorhersage gewertet, wenn in einem Quadrat um den Schadenpunkt das Kriterium erfüllt ist. Die Kantenlänge des Quadrats ist in diesem Fall 10 km (vgl. Abb.4.5). Die Auswertung findet nur über bebautem Gebiet statt.

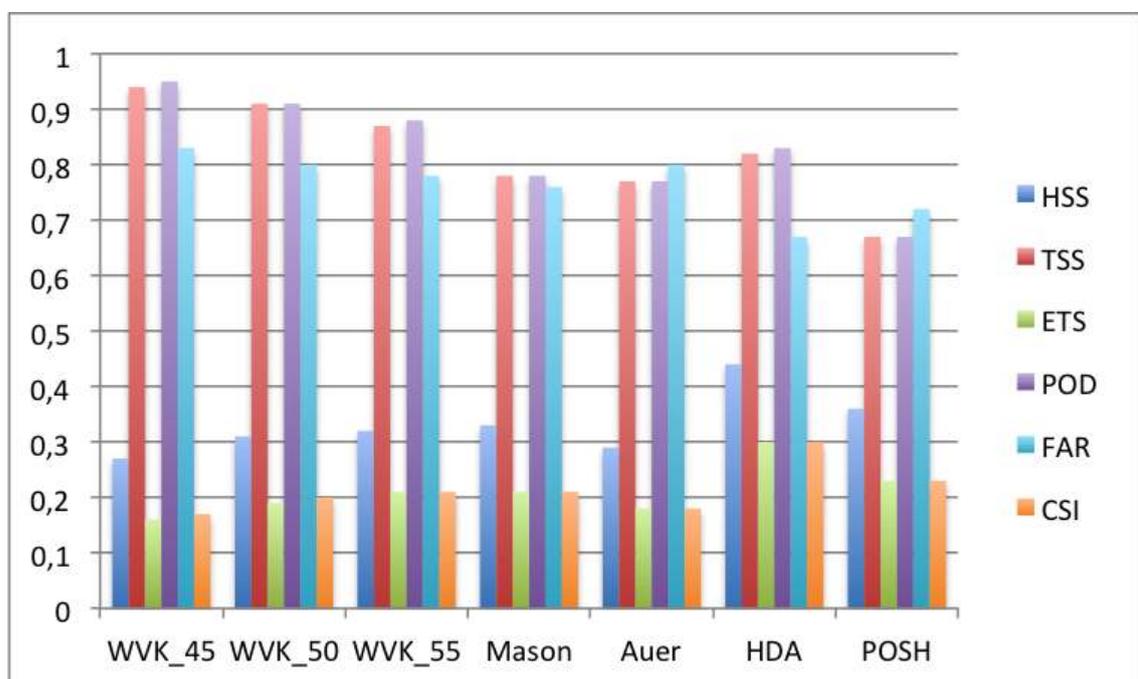


Abb. A.5: Darstellung der verschiedenen Gütemaße für 15 Jahre über dem bebauten Untersuchungsgebiet nach den CORINE Landnutzungsdaten.

Danksagungen

Zunächst möchte ich mich bei Prof. Dr. Klaus Dieter Beheng für die Übernahme des Referats und die Ermöglichung dieser Arbeit sowie für das vorherige aufmerksame und kritische Lesen bedanken.

Ein besonderer Dank geht an PD Dr. Michael Kunz für die Betreuung und Übernahme des Koreferats sowie das ausführliche Korrekturlesen vor Abschluss der Arbeit. Danke auch für seine guten Ideen, Anregungen, Diskussionen und das stets offene Ohr sowie die Möglichkeit eigene Ideen umzusetzen.

Ein weiterer Dank geht an Marc Puskeiler, der immer hilfsbereit und geduldig meine Fragen beantwortet hat. Zudem möchte ich Jan Handwerker danken, für die Bereitstellung diverser MATLAB-Programme und der Radardaten, sowie für das schnelle und stete Beantworten meiner Fragen.

Nicht zuletzt möchte ich auch den anderen Mitglieder der Arbeitsgruppe „Atmosphärischen Risiken“ Susanna Mohr, Manuel Schmidtberger, Bernhard Mühr, Joris Brombach, Sandra Freudenstein und Martin Busch für die anregenden Diskussionen während der Besprechungen und der guten Arbeitsatmosphäre danken.

Für die vielen kurzweiligen Tage danke ich meinen weiteren Mitstreitern Andrea Richter, Annette Förster, Julian Quinting und Gerrit Wörner im Diplomanden-Raum. Auch gilt mein Dank all denen, die mich während des Studiums begleitet, beim Lösen von Problemen geholfen und einfach die Studiumszeit abwechslungsreich gestaltet haben.

Schließlich möchte ich mich bei meinen Eltern, meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung beim Studium bedanken.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbst verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Ich bin damit einverstanden, dass diese Arbeit in Bibliotheken eingestellt wird und vervielfältigt werden darf.

Karlsruhe, den 30. April 2012

Petra Kugel