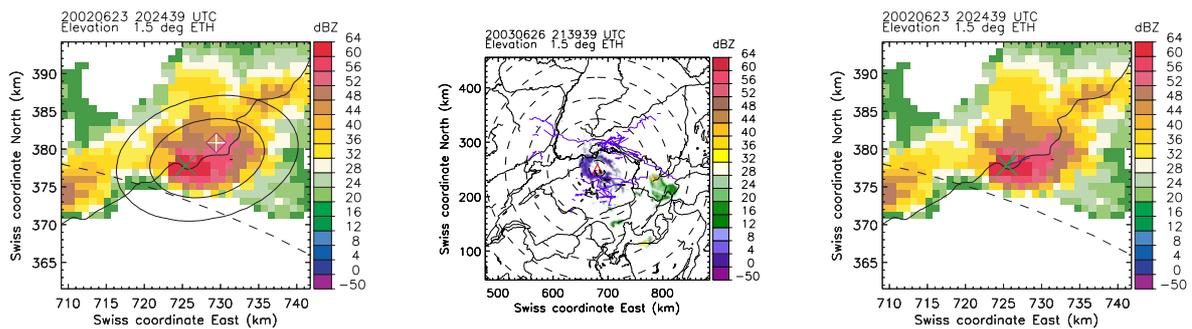


FRÜHERKENNUNG UND KURZFRISTVORHERSAGE VON SUPERZELLEN



*Diplomarbeit am
Institut für Atmosphäre und Klima der ETH Zürich*

Rahel Knöpfel

Betreuung
Dr. Willi Schmid und Dr. Marc Wüest

Diplomprofessor
Prof. Dr. Hans Richner

Oktober 2004

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Zusammenfassung | 7 |
| 1.1 | Zusammenfassung | 7 |
| 1.2 | Abstract | 8 |
| 2 | Einleitung | 3 |
| 2.1 | Motivation | 3 |
| 2.2 | Ziel der Arbeit | 5 |
| 3 | Theorie | 7 |
| 3.1 | Radargrundlagen | 7 |
| 3.2 | Definition der Superzelle | 10 |
| 3.3 | Dynamische Grundlagen | 10 |
| 3.3.1 | Erzeugung der Rotation | 11 |
| 3.3.2 | Teilung der Zelle | 12 |
| 3.3.3 | Verstärkung der rechtsziehenden Zelle | 14 |
| 3.3.4 | Intensivierung der Rotation | 15 |
| 3.4 | Synoptische Voraussetzungen | 16 |
| 3.4.1 | Gewittergrundlagen | 17 |
| 3.4.2 | Voraussetzungen für starke Gewitter | 17 |
| 3.4.3 | Voraussetzungen für Superzellen | 18 |
| 3.4.4 | Sondierungsparameter | 19 |
| 3.5 | Identifikationsmöglichkeiten von Superzellen | 21 |
| 4 | Methode | 23 |
| 4.1 | Vorgehen und Datengrundlagen | 23 |
| 4.2 | Definition der Kriterien | 25 |
| 4.2.1 | Einfache Kriterien | 25 |
| 4.2.2 | Ellipsenkriterien | 26 |
| 4.2.3 | Windkriterien | 28 |
| 4.2.4 | Zusammenfassung der Kriterien | 30 |
| 4.3 | Statistische Auswertung | 31 |
| 4.3.1 | Datenaufbereitung | 32 |
| 4.3.2 | Deskriptive Analyse | 32 |
| 4.3.3 | Test der einzelnen Kriterien | 34 |
| 4.3.4 | Regressionsmodelle | 35 |
| 4.3.5 | Test der Regressionsmodelle mit Skill Scores | 35 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | Resultate | 36 |
| 5.1 | Deskriptive Auswertung | 36 |
| 5.1.1 | Einfache Kriterien | 36 |
| 5.1.2 | Windkriterien | 38 |
| 5.1.3 | Ellipsenkriterien | 39 |
| 5.2 | Test der Kriterien | 40 |
| 5.2.1 | Einfache Kriterien | 40 |
| 5.2.2 | Windkriterien | 42 |
| 5.2.3 | Ellipsenkriterien | 42 |
| 5.2.4 | Boxplots und Klassifizierung der potentiellen Superzellen | 43 |
| 5.3 | Regressionsmodelle | 43 |
| 5.4 | Skill Scores | 46 |
| 6 | Diskussion | 49 |
| 6.1 | Synoptische Situation | 49 |
| 6.1.1 | Superzellentage | 50 |
| 6.1.2 | Vergleichstage | 51 |
| 6.2 | Diskussion der erhaltenen Resultate | 54 |
| 6.2.1 | Einfache Kriterien | 55 |
| 6.2.2 | Windkriterien | 55 |
| 6.2.3 | Ellipsenkriterien | 56 |
| 6.2.4 | Regressionsmodelle | 57 |
| 7 | Schlussfolgerungen und Ausblick | 73 |
| 7.1 | Schlussfolgerungen | 73 |
| 7.2 | Vorhersage von Superzellen | 74 |
| 7.3 | Ausblick | 75 |
| | Literaturverzeichnis | 76 |
| | Dank | 78 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Superzellen in der Schweiz | 3 |
| 2.2 | Gewitter vom 08.07.2004 | 4 |
| 2.3 | Dopplersignaturen | 5 |
| 3.1 | Miestreuung | 9 |
| 3.2 | Radarmessprobleme | 9 |
| 3.3 | Superzellenmodell | 11 |
| 3.4 | Zellteilung | 13 |
| 3.5 | Rightmover Hodograph | 14 |
| 3.6 | Verstärkung des Rightmovers | 15 |
| 3.7 | Hakenecho | 16 |
| 3.8 | 3D Tornadomodell | 17 |
| 3.9 | Spanish Plume | 18 |
| 3.10 | Beispiel Payerne-Sondierung | 20 |
| 3.11 | Beispiel Hodograph | 20 |
| 4.1 | Flussdiagramm des Tracking-Algorithmus | 24 |
| 4.2 | Beispiel einer Ellipsenanpassung | 28 |
| 4.3 | Definition SL, SR | 29 |
| 4.4 | Beispiel Windvektoren | 30 |
| 4.5 | Vergleich der Hagelzüge | 33 |
| 4.6 | Histogramm Hagelkriterium | 34 |
| 4.7 | Boxplot Hagelkriterium | 34 |
| 5.1 | Deskriptive Statistik einfache Kriterien | 37 |
| 5.2 | Deskriptive Statistik Windkriterien | 38 |
| 5.3 | Deskriptive Statistik Ellipsenkriterien | 40 |
| 5.4 | t-Tests einfache Kriterien | 41 |
| 5.5 | t-Tests Windkriterien | 42 |
| 5.6 | t-Tests Ellipsenkriterien | 43 |
| 5.7 | Boxplots | 44 |
| 5.8 | Zusammenfassung Regressionsmodelle | 46 |
| 5.9 | Kontingenzmatrix | 48 |
| 6.1 | Synoptische Wetterlage 24.06.2002 | 59 |
| 6.2 | Payerne-Sondierung 24.06.2002 | 60 |
| 6.3 | Synoptische Wetterlage 26.06.2003 | 61 |
| 6.4 | Payerne-Sondierung 26.06.2003 | 62 |
| 6.5 | Synoptische Wetterlage 21.06.2002 | 63 |

| | | |
|------|---|----|
| 6.6 | Payerne-Sondierung 21.06.2002 | 64 |
| 6.7 | Synoptische Wetterlage 31.05.2003 | 65 |
| 6.8 | Payerne-Sondierung 31.05.2003 | 66 |
| 6.9 | Synoptische Wetterlage 22.07.2003 | 67 |
| 6.10 | Payerne-Sondierung 22.07.2003 | 68 |
| 6.11 | Synoptische Wetterlage 12.08.2004 | 69 |
| 6.12 | Payerne-Sondierung 12.08.2004 | 70 |
| 6.13 | Gewitterzelle mit Windvektoren | 71 |
| 6.14 | Gewitterzelle mit Ellipse | 72 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Parameter des ETH-Radars | 10 |
| 4.1 | Zusammenfassung der Kriterien | 31 |
| 4.2 | Definition der Regressionsmodelle | 35 |
| 5.1 | Umklassierung potentielle Superzellen | 45 |
| 5.2 | Skill Scores | 47 |

Kapitel 1

Zusammenfassung

1.1 Zusammenfassung

Superzellen sind langlebige Gewitter, die auch in der Schweiz jedes Jahr durch Sturm, Hagel und Hochwasser grosse Schäden verursachen. In den USA werden zur automatischen Früherkennung verschiedene Dopplerkriterien benutzt. In dieser Arbeit sollten alternative Möglichkeiten zur Identifikation von Superzellen definiert und getestet werden, welche nicht auf der Dopplergeschwindigkeit beruhen. Als Datengrundlage standen die Daten des ETH-Radars zur Verfügung.

Mit einem Tracking-Algorithmus wurden an sechs ausgewählten Tagen des Zeitraumes 2002-2004 insgesamt 73 Gewitterzellen identifiziert. Anhand von 23 verschiedenen Kriterien wurde dann versucht, diese Gewitter in die drei Klassen *keine Superzellen*, *potentielle Superzellen*, und *Superzellen* einzuteilen. Wie die statistische Analyse gezeigt hat, eignen sich die einfacheren Kriterien, welche auf der Lebensdauer und der Radarreflektivität beruhen, am besten zur Identifikation von Superzellen. Bei den theoretisch gut begründeten Parametern, welche auch die Sturmbewegung und den Umgebungswind einbeziehen, bestehen noch methodische Schwierigkeiten. Die Anpassung einer Ellipse an die Form der Gewitterzellen funktioniert für isolierte Gewitter recht gut. Bei Teilungs- und Verschmelzungsereignissen wurden jedoch grosse Schwankungen in der Orientierung der Ellipse beobachtet. Mit verschiedenen Regressionsverfahren konnte schliesslich ein Regressionsmodell zur Klassierung der Gewitter in die drei erwähnten Gruppen gefunden werden (adjusted $R^2 = 0.523$). Als unabhängige Variablen dienen die 40 dBZ-Fläche, die Lebensdauer und die Nord-Süd Komponente der Sturmbewegung.

Bei einer Umklassierung der *potentiellen Superzellen* in eine der beiden anderen Gruppen müssen diese unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit der einzelnen Kriterien eher der Klasse *keine Superzellen* zugewiesen werden.

Das hier erarbeitete Verfahren kann eingesetzt werden, um mehrere Gewitterzellen gleichzeitig zu erfassen. Durch kleinere Anpassungen des Algorithmus können die erwähnten Kriterien fortlaufend berechnet werden. Für eine fortlaufende Klassierung der aktuellen Gewitter ist das erwähnte Regressionsmodell nicht geeignet, da die Lebensdauer erst nach dem Zerfall eines Gewitters definiert ist. Es kann aber eine alternative Regressionsgleichung (adjusted $R^2 = 0.321$) ohne Lebensdauer mit den vier erklärenden Variablen 40 dBZ-Fläche, Standardabweichung der 40 dBZ-Fläche, mittlere Reflektivität und Schwankung der Orientierung der Ellipse verwendet werden.

1.2 Abstract

Supercells are long-lived thunderstorms, which are responsible for large damage due to heavy wind, hail and floods, also in Switzerland. In the USA different Doppler criteria are used for the automatic early recognition. In this work alternative criteria for the identification are defined and tested, which are not based on the Doppler speed. The data of the ETH radar were available for this study.

73 thunderstorm cells were identified with a tracking algorithm on six selected days of the period 2002-2004. On the basis of 23 different criteria it was tried to divide these thunderstorms into the three classes *no supercells*, *potential supercells* and *supercells*. As the statistical analysis showed, the simpler criteria, which are based on the lifetime and the reflectivity, are best suitable for the identification of supercells. With the theoretically well justified parameters, which include the storm movement and the environmental wind, methodical difficulties still exist. The adjustment of an ellipse to the shape of the thunderstorm cells works quite well for isolated thunderstorms. With split and merger events however, large fluctuations in the orientation of the ellipse were observed. With different procedures a regression model could finally be found for classifying the thunderstorms into the three mentioned groups (adjusted $R^2 = 0.523$). As arguments serve the 40 dBZ area, the lifetime and the north-south component of the storm movement. Reclassifying the *potential supercells* into one of the two other groups they do have to be assigned to the class no supercells, considering the reliability of the individual criteria. The procedure compiled here can be used to observe several thunderstorm cells at the same time. The mentioned criteria can be continuously computed by smaller adjustments of the algorithm. For a sequential classification of the current thunderstorms the mentioned regression model is not suitable, since the lifetime is defined only after the decay of a thunderstorm. However, an alternative regression equation (adjusted $R^2 = 0.321$) without the lifetime can be used consisting of the four explaining variables 40 dBZ area, standard deviation of the 40 dBZ area, mean of the reflectivity and fluctuation of the orientation of the ellipse.

Kapitel 2

Einleitung

2.1 Motivation

Supercellen sind langlebige Gewitter, welche zu besonders heftigen Wettererscheinungen wie Hagel, Sturmböen, Fallwinden, sintflutartigen Regenfällen und sogar Tornados führen können. Obwohl dieser Typ von Gewitter in der Schweiz nicht ganz so häufig wie im mittleren Westen der USA vorkommt, werden doch auch in der Schweiz jedes Jahr ein paar Supercellen beobachtet. In Abbildung 2.1 sind ein paar Supercellen für die Jahre 1600-2003 dargestellt.

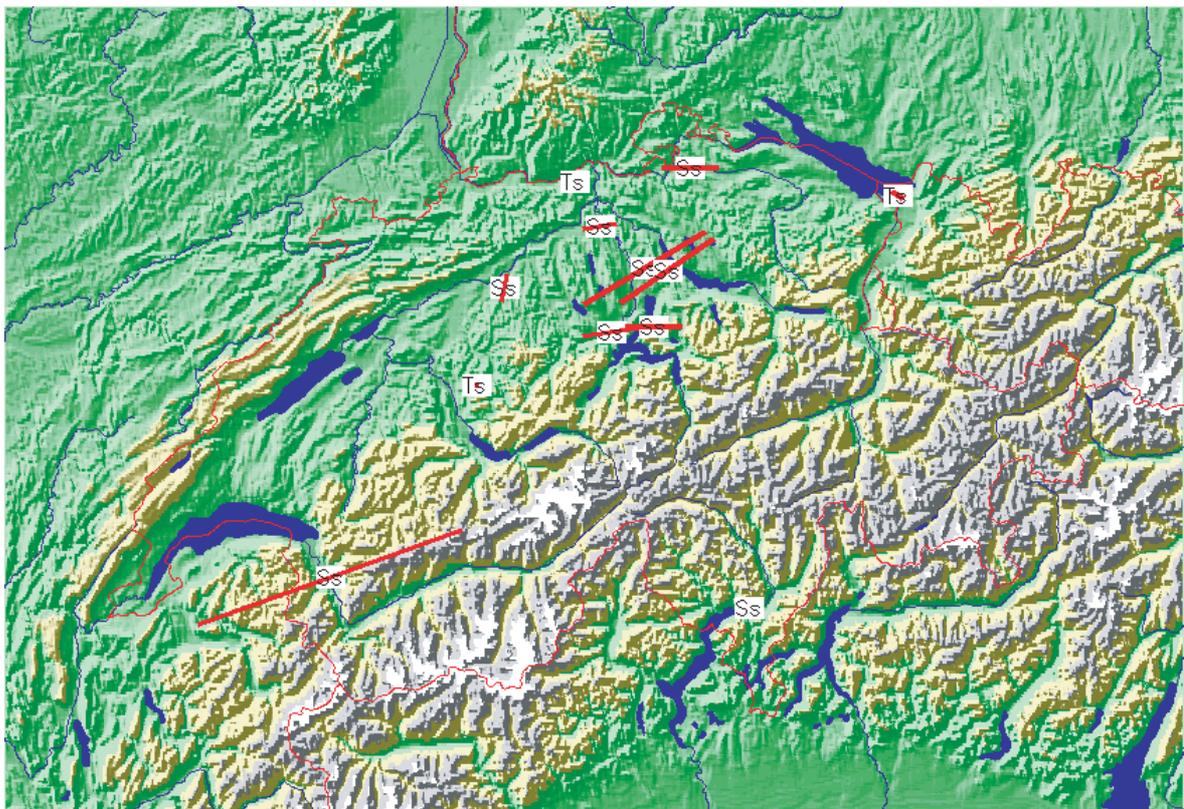


Abbildung 2.1: Karte einiger Supercellen in der Schweiz von 1600-2003: Die Abkürzungen haben folgende Bedeutung: Ts: Tornado einer Supercelle über Land, Ss: Supercelle mit Sturm. Entnommen von der TorDACH Homepage (TorDach, 2004)

Auch im Jahr 2004 konnten wieder einige Superzellen beobachtet werden. Die Abbildung 2.2 gibt einen Eindruck von einem Gewitter, das um etwa 17:00 Lokalzeit am 08.07.2004 über Kriens hinwegzog.



Abbildung 2.2: Gewitter vom 08.07.2004 um etwa 17:00 Lokalzeit bei Kriens. Entnommen aus der Diskussion desselben Tages im Schweizer Sturmforum (Schweizer Sturmforum, 2004)

In den USA werden verschiedene Kriterien, welche auf der mit einem Dopplerradar gemessenen radialen Windgeschwindigkeit beruhen, zur automatischen Identifikation von Superzellen verwendet. Der eindeutig messbare Bereich der Dopplergeschwindigkeit hängt unter anderem von der Wellenlänge des gesendeten Radarsignals ab. Das ETH-Radar benutzt eine Wellenlänge von 5.3 cm , was zu einem eindeutig messbaren Geschwindigkeitsbereich von $\pm 16\text{ m.s}^{-1}$ führt. In den rotierenden Aufwindzentren von Superzellen werden aber viel höhere Windgeschwindigkeiten gemessen. Diese können, wenn sie grösser als die maximal eindeutig messbare Geschwindigkeit sind, nicht mehr korrekt gemessen werden. In den Radarbildern werden diese hohen Geschwindigkeiten mit falschem Betrag und Vorzeichen dargestellt (Faltung). Mit aufwendigen Verfahren können die Fehler bei der Darstellung von zu hohen Windgeschwindigkeiten korrigiert werden. Die dazu verwendete Methode sucht im Radarbild unter anderem nach Diskontinuitäten, bei denen grosse Windgeschwindigkeiten mit entgegengesetzten Vorzeichen direkt nebeneinander liegen (Wüest, 2001). Ist in den Daten eine Superzelle mit einem stark rotierenden Aufwind (Mesozyklone) vorhanden, werden je nach Höhe, in welcher der Radarstrahl die Gewitterzelle durchquert, Konvergenz-, Rotations-, oder

Divergenzsignaturen beobachtet. Diese Signale enthalten natürlicherweise ähnliche Diskontinuitäten, wie sie auch bei der Faltung von zu hohen Windgeschwindigkeiten entstehen. In Abbildung 2.3 sind schematisch die Dopplersignale einer Divergenz- und einer Rotations-signatur dargestellt.

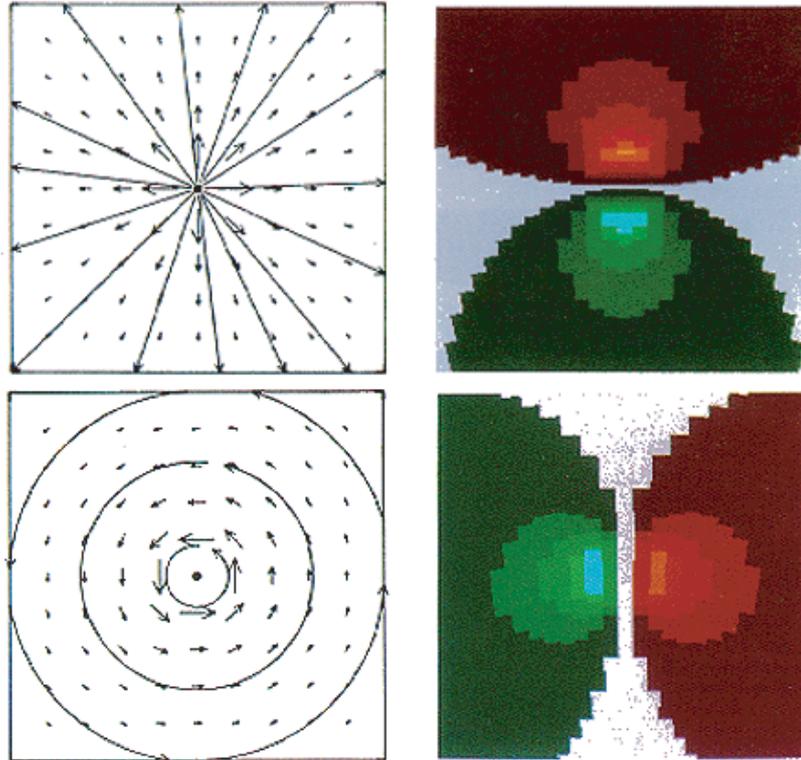


Abbildung 2.3: Dopplersignaturen: oben sind das Windfeld und das Dopplergeschwindigkeitsbild einer divergenten Strömung dargestellt, darunter wird das Windfeld und das Dopplergeschwindigkeitsbild einer rotierenden Strömung gezeigt. Auf den Standort des Radars zulaufende Bewegungen sind in grün dargestellt, rot kennzeichnet Bewegungen vom Radar weg. Entnommen aus einem Internetkurs zur Radarmeteorologie von der University of Illinois (University of Illinois, 2004)

Aus diesen Gründen und weil in der Schweiz nicht alle operationell eingesetzten Radare die Dopplergeschwindigkeit messen können, sollen in dieser Arbeit andere Kriterien gefunden werden, mit denen Superzellen frühzeitig identifiziert werden können.

2.2 Ziel der Arbeit

Aus den im Motivationsteil dieser Arbeit erwähnten Gründen ist es in der Schweiz zur Zeit nicht möglich, die in den USA gebräuchlichen Dopplerkriterien zur automatischen Erkennung von Superzellen anzuwenden. Hier sollen deshalb andere, auf der Radarreflektivität basierende Möglichkeiten zur Identifikation von Superzellen gefunden und getestet werden. Die Prognose der Bewegung von einmal als Superzelle erkannten Gewittern soll nur kurz diskutiert werden. Anwendung und Tests der verschiedenen Vorhersageverfahren liegen nicht im Rahmen dieser Arbeit.

In einem theoretischen Teil sollen die wichtigsten Radargrundlagen sowie die Definition und

Dynamik von Superzellen dargestellt werden. Ebenfalls in diesem Kapitel werden anhand einer Literaturanalyse die synoptischen Voraussetzungen zur Entstehung von Superzellen sowie verschiedene Identifikationsmöglichkeiten erläutert. Aufbauend auf diesen theoretischen Grundlagen wird dann das Vorgehen in dieser Arbeit beschrieben und die zu testenden Kriterien werden definiert. Danach sollen die wichtigsten Resultate zusammengestellt und anschliessend kritisch diskutiert werden. Im letzten Kapitel schliesslich sollen neben einer Darstellung der Schlussfolgerungen auch das Thema der Vorhersage und ein paar Ideen zur Anwendung der erarbeiteten Resultate kurz angesprochen werden.

Kapitel 3

Theorie

In diesem Kapitel wird zuerst ein Überblick über Radargrundlagen sowie eine kurze Definition einer Superzelle gegeben. Anschliessend sollen die dynamischen Eigenschaften sowie die meteorologischen Voraussetzungen, welche für die Entstehung von Superzellen wichtig sind, erläutert werden. Daraus folgen unterschiedliche Möglichkeiten, wie diese Gewitter anhand verschiedener Daten identifiziert werden können.

3.1 Radargrundlagen

Der hier dargestellte Überblick basiert auf dem Buch von Rinehart zur Radarmeteorologie und einem Vorlesungsskript (Wüest, 2003)(Rinehart, 1992).

In dieser Arbeit werden Messungen des institutseigenen gepulsten C-Band Dopplerradars am Höggerberg verwendet. Im Sommer dient das Radar vor allem dazu, interessante Gewitter zu beobachten während im Winter hauptsächlich Schneefälle studiert werden. Es sollen nun kurz ein paar für diese Arbeit wichtige Aspekte der Radarmessungen und Kennwerte des ETH-Radars dargestellt werden. Durch Aussenden von Mikrowellen und Messung der zurückgestreuten Signale können mit einem Radar Daten mit einer zeitlichen und räumlichen Auflösung von Minuten beziehungsweise 100 m bis 1 km erhoben werden.

Die maximal eindeutig messbare Distanz r_{max} , ist abhängig von der Pulsrepetitionsfrequenz PRF und der Phasengeschwindigkeit c der Radarwelle:

$$r_{max} = \frac{c}{2 \cdot PRF} \quad (3.1)$$

Beim in dieser Arbeit verwendeten C-Band Dopplerradar beträgt diese Reichweite 120 km . Wie detailliert man die Strukturen beispielsweise einer Gewitterzelle mit dem Radar erkennen kann, hängt von der Grösse des Pulsvolumens am Ort dieser Zelle ab. Das Pulsvolumen V ist abhängig von der Pulsdauer τ , dem Azimuth θ , der Elevation ϕ und dem Abstand r zum Radar:

$$V = \frac{\pi}{8} c \tau \theta \phi r^2 \quad (3.2)$$

Will man zur Identifikation von Mesozyklonen die radiale Geschwindigkeit eines Radarechos messen, wird ein Radar benötigt, das die Phasendifferenz $\Delta\varphi$ zwischen dem ausgesendeten und dem empfangenen Puls messen kann. Für die radiale Geschwindigkeit lässt sich folgende Beziehung herleiten, wobei λ die Wellenlänge des Pulses bezeichnet:

$$v = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi PRF \quad (3.3)$$

Da die maximal eindeutig messbare Phasenverschiebung auf 2π beschränkt ist, ist auch der Betrag der messbaren Geschwindigkeit nach oben begrenzt. Geschwindigkeiten, die grösser als dieser Wert v_{max} (auch Nyquistgeschwindigkeit genannt) sind, werden gefaltet und im Radarbild falsch dargestellt. Diese maximale Geschwindigkeit hängt von der Wellenlänge des gesendeten Signals und von der Pulsrepetitionsfrequenz ab.

$$v_{max} = PRF \frac{\lambda}{4} \quad (3.4)$$

Die maximal messbare Distanz und die grösste messbare Geschwindigkeit sind voneinander abhängig, man muss je nach Ziel der Messungen entscheiden, ob die Reichweite oder die maximal messbare Geschwindigkeit optimiert werden soll.

$$r_{max} \cdot v_{max} = \frac{c\lambda}{8} \quad (3.5)$$

Um die Art und Intensität des als Radarecho gemessenen Niederschlages abzuschätzen, wird die Radarreflektivität η betrachtet. Diese ist definiert als Summe aller in einem Pulsvolumen V enthaltenen Streuquerschnitte σ_i pro Volumen.

$$\eta = \frac{\sum_i \sigma_i}{V} \quad (3.6)$$

Dargestellt in Radarbildern wird meist eine logarithmierte Form in dBZ dieser Grösse :

$$dBZ = 10 \log_{10} \frac{\eta}{\eta_0} \quad (3.7)$$

Erreicht die Radarreflektivität Werte über $55 dBZ$, wird am entsprechenden Ort meistens Hagel beobachtet (Grasso and Hilgendorf, 2001).

Unter der Annahme, dass alle im Pulsvolumen enthaltenen Streukörper die einfallende Energie isotrop zurückstreuen und keine Absorption stattfindet, ist die am Empfänger gemessene mittlere Leistung \bar{P}_r :

$$\bar{P}_r = \frac{c}{1024\pi^2 \ln 2} (P_t \tau \lambda^2 g_0^2 \theta \phi) \left(\frac{\eta}{r^2} \right) \quad (3.8)$$

Dabei bezeichnet c wieder die Phasengeschwindigkeit des Radarsignals, P_t ist die gesendete Leistung, λ^2 ist eine vom Azimuth abhängige Konstante und g bezeichnet die Antennenfunktion (Abstrahlungscharakteristik der Antenne).

Regentropfen sind viel kleiner als die Wellenlänge des ausgesendeten Radarsignals ($D < \lambda$), sodass für die im Pulsvolumen enthaltenen Streuer der Rayleigh-Streuquerschnitt eingesetzt werden darf.

$$\sigma = \pi^5 |K|^2 \cdot \frac{D^6}{\lambda^4} \quad (3.9)$$

K enthält die dielektrischen Eigenschaften des streuenden Körpers, D bezeichnet dessen Durchmesser und λ ist in diesem Fall die Wellenlänge des Signals.

Die Radarreflektivität nimmt somit für Regentropfen mit der sechsten Potenz ihres Durchmessers zu. Für Wasser hat $|K^2|$ einen Wert von etwa 0.9, für Eis ist dieser Wert mit 0.176 etwa viermal kleiner (Wüest, 2003).

Erreichen die Streuer eine Grösse, die etwa der Wellenlänge des gesendeten Signals entspricht ($D \sim \lambda$), können die rückstreuenden Objekte (zum Beispiel Hagelkörner) nicht mehr als Dipolstrahler betrachtet werden. Man muss auch die höheren Momente einbeziehen und bekommt so eine komplizierte, oszillierende Abhängigkeit des Streuquerschnittes vom Durchmesser wie Abbildung 3.1 zeigt.

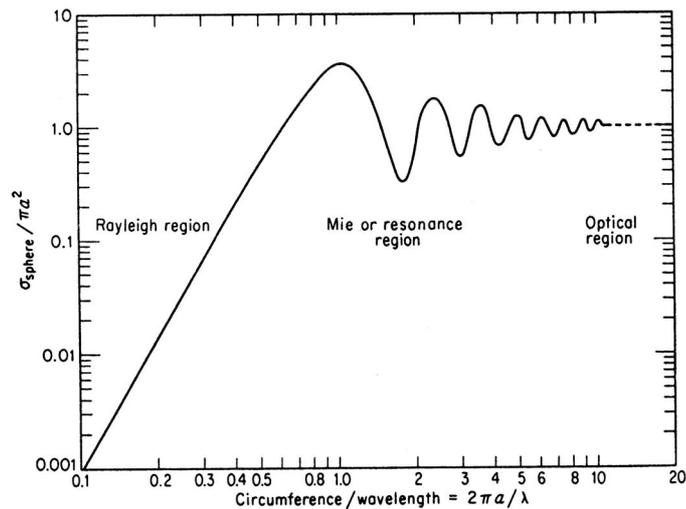


Abbildung 3.1: Doppelt logarithmische Darstellung des normierten Streuquerschnittes $\sigma_{Kugel}/\pi a^2$ gegen den Formparameter $x = \frac{\pi D}{\lambda}$. a bezeichnet den optischen Radius der streuenden Kugel (Rinehart, 1992).

Die Darstellung in Abbildung 3.2 zeigt, welche grundsätzlichen Schwierigkeiten bei der Interpretation von Radardaten auftreten können.

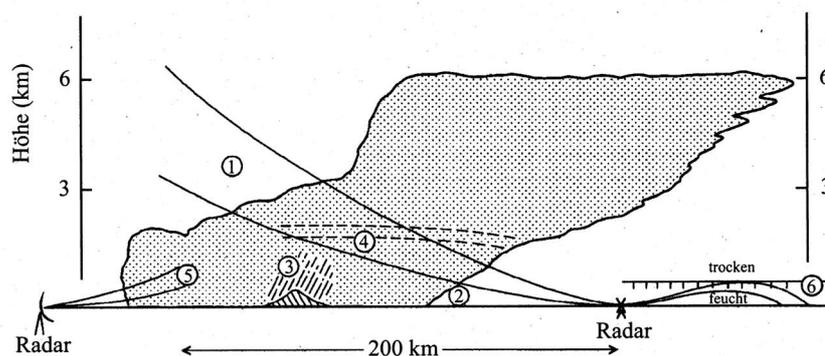


Abbildung 3.2: Probleme bei der Interpretation von Radardaten: 1. Überschüssender Radarstrahl, 2. Verdunstung von Niederschlag, 3. Orographische Zunahme des Niederschlages, 4. Abschattung durch Objekte hoher Reflektivität, 5. Nieselregen, 6. Anomale Ausbreitung des Radarstrahls (Wüest, 2003)

Abschliessend sind in Tabelle 3.1 die wichtigsten Eigenschaften des ETH-Dopplerradars zusammengefasst:

Tabelle 3.1: Zusammenfassung der Parameter des ETH-Radars (Wüest, 2003) (Schmid et al., 1997)

| | |
|-----------------------|----------------------|
| Frequenz | 5.66 GHz |
| Wellenlänge | 5.3 cm |
| Maximale Leistung | 250 kW |
| Pulslänge | $0.5 \mu\text{s}$ |
| PRF | 1200 Hz |
| v_{max} | 16 ms^{-1} |
| Strahlbreite | 1.6° |
| Polarisation | linear horizontal |
| r_{max} | 120 km |
| Antennendurchmesser | 2.5 m |
| Schweizerkoordinate X | 680.930 km |
| Schweizerkoordinate Y | 251.340 km |

3.2 Definition der Superzelle

Gewitter können in die drei Klassen der kurzlebigen, etwa 45 min existierenden Einzelzellen, aus mehreren Einzelzellen zusammengesetzten Multizellen und die aus einer einzigen grossen und langlebigen Zelle bestehenden Superzellengewitter eingeteilt werden. Moller schlägt eine Klassifizierung nach dem Organisationsgrad der Konvektion in einem Gewitter vor (Moller et al., 1994). Bei schwachen Winden und kleiner Windscherung entstehen vor allem pulsartige Einzelzellen oder unorganisierte Multizellen. Mit zunehmender Instabilität der Atmosphäre und grösserer Windscherung wird die Konvektion besser organisiert und es entstehen organisierte Multizellen oder Superzellen, deren Fortbewegung bestimmten Gesetzmässigkeiten folgt.

In Animationen von Radarbildern fallen Superzellen durch ihre Langlebigkeit und ihre abweichende Bewegung im Vergleich zu anderen Niederschlagsechos auf. Sie haben eine horizontale Ausdehnung von bis zu 30 km und erreichen oder durchstossen die Höhe der Tropopause. Die Strömung in einer Superzelle befindet sich auf dem Höhepunkt ihres Lebenszyklus in einem Stationärzustand. Der rotierende Aufwind ist deutlich von der Abwindzirkulation getrennt, sodass sich die beiden Strömungen eher gegenseitig verstärken als zerstören. Das in Abbildung 3.3 dargestellte Modell einer Superzelle im Stationärzustand zeigt die Windströmungen relativ zur Zelle betrachtet.

Superzellen sind oft mit verheerenden Wettererscheinungen wie Hagel, sintflutartige Regenfällen, Sturmböen und Tornados verbunden. Auch in der Schweiz werden jeden Sommer einige starke Hagelgewitter und seltener sogar Tornados beobachtet (Houze et al., 1993) (Schmid et al., 1999).

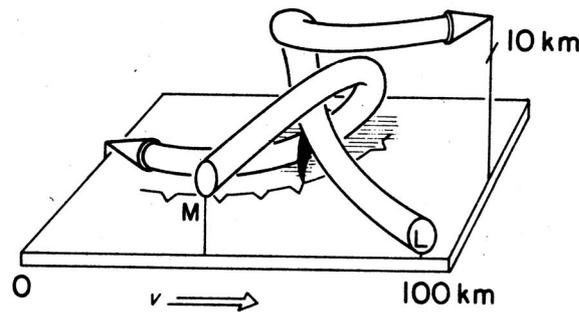


Abbildung 3.3: Superzellenmodell einer rechtsziehenden Zelle nach Browning. Von Süden strömt feuchte, warme Luft in den Aufwindbereich. Durch freiwerdende latente Wärme bleibt dieser Aufwind erhalten. Nördlich des Aufwindes im Gebiet mit der grössten Niederschlagsintensität entsteht durch Abkühlung eine trockene und kalte Abwindströmung. Auf- und Abwind sind durch die Böenfront voneinander getrennt. Diese schiebt sich unter die einströmende feuchtwarme Luft und verstärkt durch Hebung den Aufwind (Klemp, 1987).

3.3 Dynamische Grundlagen

In diesem Abschnitt sollen die dynamischen Grundlagen der Erzeugung von Rotation in einer Superzelle, die Teilung des Gewitters in eine links- und eine rechtsziehende Zelle, die anschließende Verstärkung der rechtsziehenden Zelle sowie die zur Bildung von Tornados notwendige Intensivierung der Rotation dargestellt werden. Diese Diskussion folgt hauptsächlich der Darstellung der Dynamik von Superzellen im Buch zur dynamischen Meteorologie von Holton (Holton, 1992) und einem Artikel über dynamische Grundlagen von Tornadogewittern von Klemp (Klemp, 1987). Möglichkeiten zur Vorhersage der Zugbahn von Superzellen werden in einem späteren Kapitel diskutiert.

3.3.1 Erzeugung der Rotation

Um zu verstehen, wie die Rotation in einer Superzelle erzeugt wird und weshalb es meistens zu einer Verstärkung der rechtsziehenden, zyklonal rotierenden Zelle kommt, kann man die Dichteschichtung der Atmosphäre vernachlässigen und die Boussinesq Approximation für Bewegungs- und Kontinuitätsgleichung verwenden:

$$\frac{DU}{Dt} = \frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla)U = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + bk \quad (3.10)$$

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (3.11)$$

Der Auftriebsterm b enthält die Wirkung von Temperatur und Wasserdampf sowie den Reibungseinfluss von flüssigem Wasser. U bezeichnet die dreidimensionale Windgeschwindigkeit, ρ_0 ist die konstante Grundzustandsdichte, p bezeichnet die Abweichung des Druckes vom horizontalen Mittel und k ist der vertikale Einheitsvektor. ∇ ist der Nabla-Operator $(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$. Die Corioliskraft spielt wie mit einer Skalenanalyse gezeigt werden kann, keine Rolle.

Durch Umformung von (3.10) und Anwendung von $\nabla \times$ (3.10) bekommt man die dreidimensionale Vorticitygleichung

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nabla \times (U \times \omega) + \nabla \times (bk) \quad (3.12)$$

mit der Vertikalkomponente

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = k \cdot \nabla \times (U \times \omega) \quad (3.13)$$

ω bezeichnet den dreidimensionalen Vorticityvektor, ξ ist dessen Vertikalkomponente. Geht man von einer einzigen konvektiven Zelle eingebettet in eine nur von der vertikalen Komponente abhängigen Westwindströmung aus und zerlegt den Wind und die Vorticity in Grundzustand und Abweichung vom Grundzustand

$$\omega = j \frac{d\bar{u}}{dz} + \omega'(x, y, z, t) \quad (3.14)$$

$$U = i\bar{u} + U'(x, y, z, t) \quad (3.15)$$

findet man die linearisierte Vorticitygleichung:

$$\frac{\partial \xi'}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \xi'}{\partial x} + \frac{\partial \omega'}{\partial y} \frac{d\bar{u}}{dz} \quad (3.16)$$

\bar{u} ist der mittlere Wind, ω' und ξ' bezeichnen die Abweichung der dreidimensionalen beziehungsweise vertikalen Vorticity vom Grundzustand.

Im ersten Term ist die Advektion von Vorticity durch die westliche Grundzustandsströmung enthalten; der zweite Term beschreibt die Erzeugung von vertikaler Vorticity aus der im Windprofil des Grundzustandes enthaltenen horizontalen Schervorticity (Tilting Effekt). Nördlich des ursprünglichen Aufwindzentrums entsteht deshalb ein antizyklonaler Wirbel und südlich davon ein zyklonal rotierender Wirbel. Wie im Artikel von Klemp beschrieben, wird bei starken Aufwinden die vertikale Vorticity durch den Stretching Effekt noch zusätzlich verstärkt. In manchen Situationen, wenn beispielsweise Fronten vorhanden sind, spielt auch die Barokline Erzeugung von Vorticity eine Rolle (Solenoidal Effekt). An der ursprünglichen Position des Aufwindes kann es durch Kondensation von Niederschlag zur Entstehung einer starken Abwindströmung kommen. Dieser Prozess kann eine Trennung der beiden gegensinnig rotierenden Zellen beeinflussen, ist aber nicht notwendig dafür, wie Simulationsrechnungen zeigen (Klemp and Wilhelmson, 1978).

3.3.2 Teilung der Zelle

Zwei Faktoren sind dafür verantwortlich, dass eine langlebige Zelle entstehen kann. Die Einströmung aus Osten sorgt dafür, dass die kalten Abwinde dem Aufwind nicht die Zufuhr von feuchtwarmer Luft abschneiden können. Ausserdem entstehen nördlich und südlich des ursprünglichen Aufwindes neue dynamisch induzierte Aufwindzentren. Um zu verstehen, wie in den beiden gegensinnig rotierenden Zellen neue Aufwinde entstehen, betrachtet man am Besten die Abweichung des Druckfeldes von seinem hydrostatischen Grundzustand. Eine Gleichung für diesen Druck resultiert aus der Anwendung von ∇ auf die Bewegungsgleichung (3.10):

$$\nabla^2 \left(\frac{p}{\rho_0} \right) = -\nabla^2 \left(\frac{U \cdot U}{2} \right) + \nabla \cdot (U \times \omega) + \frac{\partial b}{\partial z} \quad (3.17)$$

Die ersten beiden Terme auf der rechten Seite bezeichnen dynamische Druckkräfte. Der dritte Term beinhaltet den Einfluss des Auftriebes, der aber wie numerische Simulationen zeigen,

meist vom Auftriebsterm in der Bewegungsgleichung kompensiert wird. Durch Transformation der dynamischen Druckterme in Zylinderkoordinaten (r, λ, z) mit dem Ursprung im Zentrum der rotierenden Zelle führen nach einigen Umformungen zum zyklotropen Gleichgewicht:

$$\rho_0^{-1} \partial p_{dyn} / dr = v_\lambda^2 / r \quad (3.18)$$

p_{dyn} bezeichnet den dynamischen Anteil des Druckes, v_λ ist die azimuthale Geschwindigkeit.

In den beiden gegensinnig rotierenden Zellen entsteht also durch die Zentrifugalkraft ein Druckminimum, was die Entstehung der neuen Aufwinde erklärt. Auch Klemp findet 1987 durch die Zerlegung des Druckes, dass die starke Rotation in den beiden rotierenden Zellen den Druck senkt und somit neue Aufwinde induziert.

$$\pi_{dyn} \sim -\xi^2 \quad (3.19)$$

In Abbildung 3.4 wird die Entstehung der Rotation und die Teilung der Zelle nochmals verdeutlicht.

Die gegensinnig rotierenden Zellen beginnen, sich auseinander zu bewegen. Die Einstromungsrichtung relativ zu den Zellen ändert sich, so dass jetzt ein Anteil an horizontaler Vorticity vorhanden ist, der parallel zur Einströmungsrichtung liegt. Diese Vorticitykomponente kann die Rotation im Aufwind besonders gut verstärken und sorgt dafür, dass sich der Aufwind mit der Rotation in Phase befindet (in einer sich teilenden Zelle befinden sich die Rotationszentren links und rechts neben dem ursprünglichen Aufwindzentrum). Dies ist durch Betrachtung der rechtsziehenden Gewitterzelle in Abbildung 3.4 erklärbar. Sie bewegt sich mit einer Geschwindigkeit c_y senkrecht zur Windscherungsrichtung nach Süden. Die integrierte lineare Vorticitygleichung zeigt dann, dass der Aufwind w und die Vorticity ξ in Phase sind (Klemp, 1987):

$$\xi = \frac{dU}{dz} \frac{w}{(-c_y)} \quad (3.20)$$

3.3.3 Verstärkung der rechtsziehenden Zelle

Für die Verstärkung der rechtsziehenden zyklonal rotierenden Zelle ist vor allem eine mit der Höhe antizyklonal drehende Windscherung entscheidend. Abbildung 3.5 zeigt einen entsprechenden gemittelten Hodographen.

Ist die Richtung des Windscherungsvektors $\bar{S} = \partial \bar{V} / \partial z$ konstant, wird keine der durch die oben diskutierten Prozesse entstandenen Zellen bevorzugt. Bei antizyklonaler Winddrehung hingegen wird die rechtsziehende, bei zyklonaler Winddrehung die linksziehende Superzelle verstärkt.

Geht man von einer antizyklonalen Winddrehung aus, ist der lineare Beitrag der Windscherung zur dynamischen Druckkraft durch folgende Beziehung gegeben:

$$\nabla \cdot (U' \times \bar{\omega}) \approx -\nabla \cdot (w' \bar{s}) \quad (3.21)$$

Durch einsetzen in Gleichung 3.17 bekommt man eine Formel für das Vorzeichen dieses Effektes:

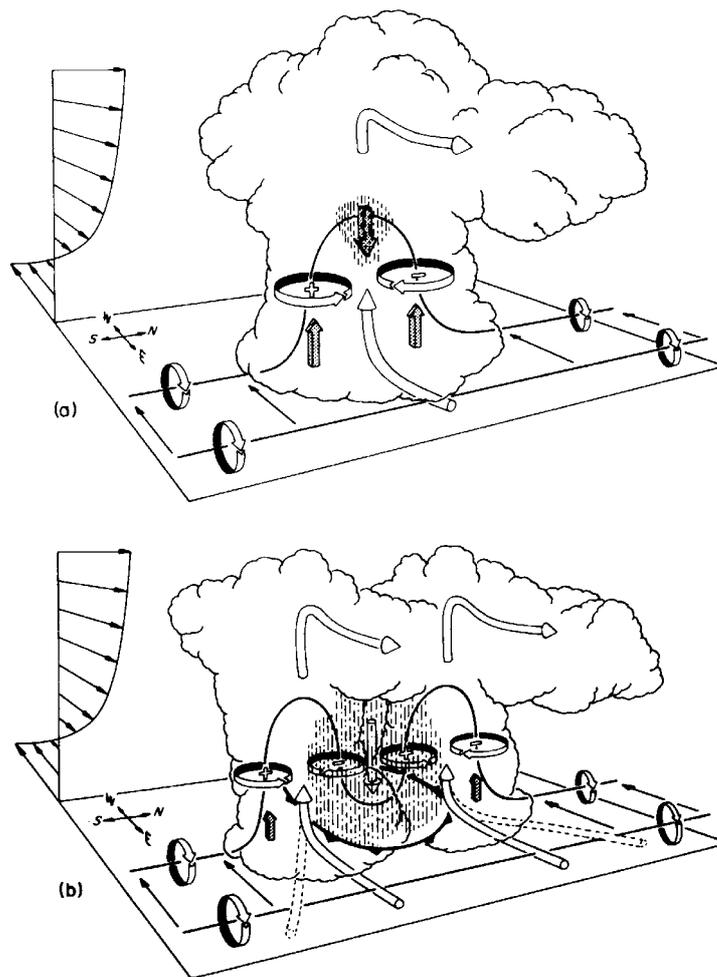


Abbildung 3.4: a) Entstehung der Rotation in einer Superzelle b) Teilung in eine rechts- und eine linksziehende Zelle (Klemp, 1987)

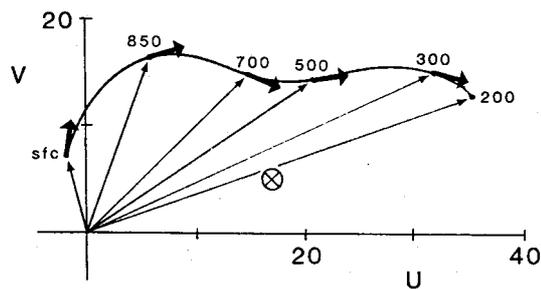


Abbildung 3.5: Zusammengesetzter Hodograph für 62 Tornadogewitter (Klemp, 1987)

$$\nabla^2 p_{dyn} \sim -\frac{\partial}{\partial x}(w' S_x) - \frac{\partial}{\partial y}(w' S_y) \quad (3.22)$$

S_x und S_y bezeichnen die Horizontalkomponenten des Windschervungsvektors.

Durch Betrachtung eines Aufwindes in einem homogenen, reibungsfreien Fluid findet Klemp 1987 die Beziehung:

$$\pi \sim S \cdot \nabla_h w \quad (3.23)$$

In jeder Höhe entsteht ein Druckgradient über die Aufwindzone in Richtung des Windschervungsvektors. Die Bedeutung dieses durch die Windschering induzierten Druckfeldes wird in der Darstellung von Abbildung 3.6 verdeutlicht.

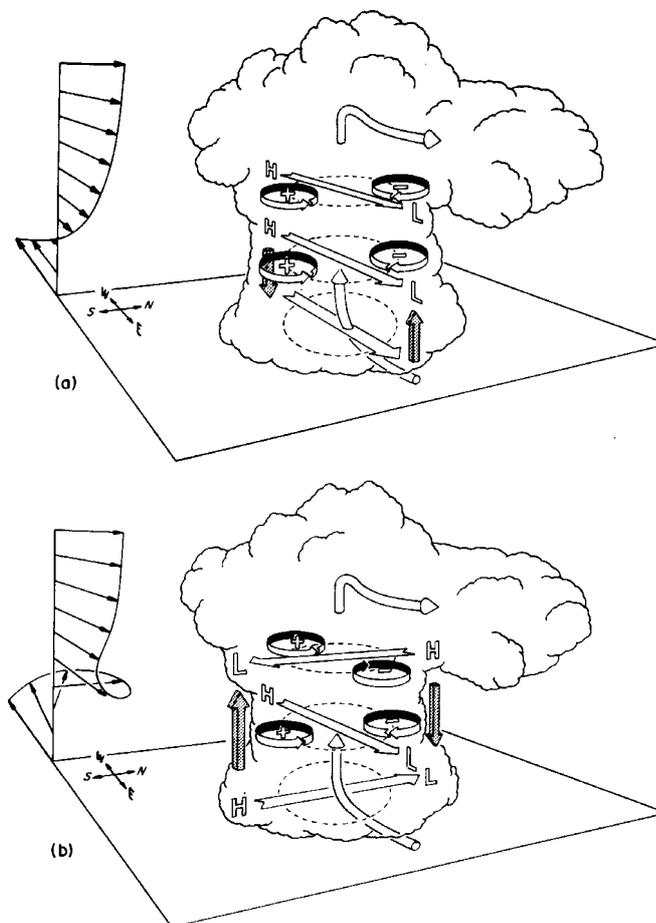


Abbildung 3.6: a) Bei nicht rotierender Windschering wird in Zugrichtung der Zelle positiver Auftrieb erzeugt b) Bei antizyklonal drehender Windschering wird die rechtsziehende Zelle verstärkt und die linksziehende Zelle unterdrückt (Klemp, 1987).

Bei antizyklonaler Drehung der Windschering wird die rechtsziehende Zelle verstärkt. Ist die Drehung der Windschering im Gegensatz zur in Abbildung 3.6 b) gezeigten Situation zyklonal, wird entsprechend das linksziehende Gewitter bevorzugt.

3.3.4 Intensivierung der Rotation

Eine rechtsziehende Superzelle kann aus ihrem Stationärzustand in eine Phase übergehen, in der sie einen oder eine ganze Serie von Tornados produziert. Diese Phase ist gekennzeichnet durch eine Zunahme der Rotation in den unteren Schichten, Abnahme der Stärke des ursprünglichen Aufwindzentrums und Bildung eines Rückseitenabwinds hinter dem Aufwind. Wie Abbildung 3.7 zeigt, drehen sich die kalte Luft aus dem neuen Abwind und die feucht-warme einströmende Luft um das Drehzentrum T . Die ist auch der Ort, wo der Tornado entsteht. Dieser Übergang kann sehr schnell (innerhalb von 10 *min*) stattfinden.

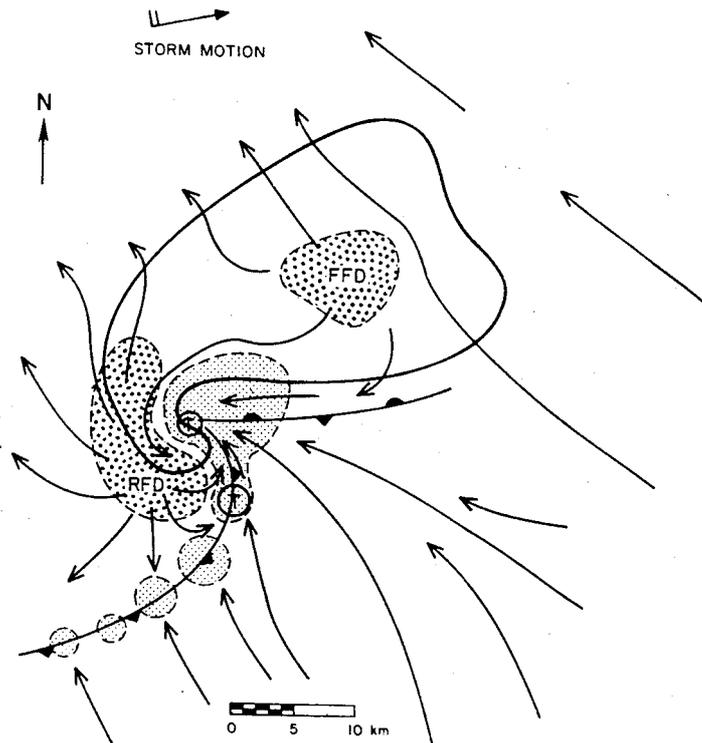


Abbildung 3.7: Übergang einer rechtsziehenden Superzelle in eine Tornados produzierende Phase (Klemp, 1987)

Die neue und die alte Böenfront beginnen zu okkludieren. Dabei schneidet die neue Böenfront die Zufuhr von feuchtwarmer Luft zum ursprünglichen Aufwindzentrum ab, welches sich in der Folge abschwächt. An der neuen Böenfront entstehen neue Aufwind- und Rotationszentren; dort können ebenfalls Tornados entstehen.

Numerische Simulationen zeigten, dass beim Übergang in die Tornados produzierende Phase zuerst eine Zunahme der horizontalen Vorticity an der Grenze zwischen der Böenfront des Abwinds und feuchtwarmer Luft des Aufwinds stattfindet. Diese baroklin erzeugte Vorticity ist parallel zur Einströmungsrichtung und wird durch den Tilting-Effekt aufgestellt. Die bereits im Aufwind vorhandene Rotation wird dadurch verstärkt. Diese Zunahme der Rotation in den unteren Luftschichten führt zu einer Absenkung des Druckes (siehe Gleichung 3.19). Dadurch entsteht der bereits erwähnte Rückseitenabwind, welcher durch Verdunstung von Niederschlag noch zusätzlich verstärkt wird. Dieser neue Abwind schneidet den ursprünglichen Aufwind von seinem Nachschub ab und induziert gleichzeitig an seiner Böenfront ein neues

Hebungs- und Rotationszentrum. Die erwähnten Prozesse sind in Abbildung 3.8 mit einer dreidimensionalen Darstellung verdeutlicht.

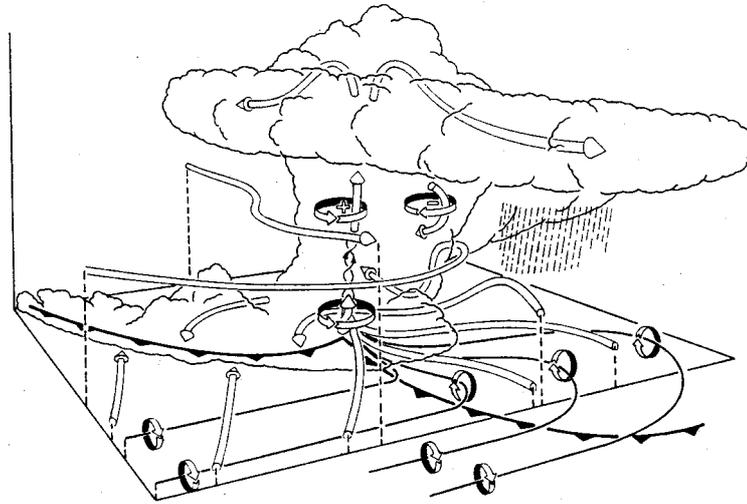


Abbildung 3.8: Dreidimensionale Ansicht einer Superzelle mit sich verstärkender Rotation (Klemp, 1987)

3.4 Synoptische Voraussetzungen

In diesem Kapitel sollen die Voraussetzungen für die Entstehung von Gewittern allgemein und insbesondere in der Schweiz erläutert werden. Anschliessend werden wichtige synoptische Wetterlagen und lokale Gegebenheiten, welche die Entwicklung von Superzellen beeinflussen, diskutiert. Die am häufigsten verwendeten Sondierungsparameter zur Vorhersage der Entwicklung von Superzellen werden ebenfalls kurz besprochen.

3.4.1 Gewittergrundlagen

In ihrer Arbeit zur Bildung, Verteilung und Vorhersage von Gewittern in der Schweiz hat Huntrieser eingehend untersucht, welche Synoptischen Wetterlagen und mesoskaligen Effekte die Bildung von Gewittern fördern. Damit Gewitter entstehen können, muss eine gewisse Instabilität und Feuchtigkeit in der Atmosphäre vorhanden sein. Ist ausserdem die Windscherung genügend gross, können sich besonders langlebige Superzellen- oder Multizellengewitter entwickeln. Um die mit der instabilen Schichtung der Atmosphäre verbundene Instabilität Energie freizusetzen, braucht es einen Auslösemechanismus. Dieser kann durch eine orographisch erzwungene Hebung, eine lokale Erwärmung der Luftmassen über sogenannten Wärmeinseln, den Durchzug einer Kaltfront oder durch das Ausfliessen von kalten, trockenen Luftmassen aus bereits vorhandenen Stürmen gegeben sein (Huntrieser, 1995). Kaltenböck weist in seiner Arbeit zum Ausbruch von heftigen Gewittern an einer präfrontalen Konvergenzlinie ebenfalls auf die Bedeutung von Instabilität, Feuchtigkeit und Konvergenz der Winde zur Bildung von Gewittern hin.

3.4.2 Voraussetzungen für starke Gewitter

Bei der Bildung von starken Gewittern über Mitteleuropa kann nach Huntrieser eine Wetterlage mit der Bezeichnung *Spanish Plume* besonders häufig beobachtet werden (Huntrieser, 1995). Kennzeichnend für diese besondere meteorologische Situation ist dabei ein sich von Westen nähernder Höhentrog, dessen zugehöriger Kaltfront auf eine Zunge mit warmen und feuchten Luftmassen aus Spanien über Mitteleuropa trifft. In Abbildung 3.9 sind die wichtigsten Elemente einer Starkgewitterlage auf vier verschiedenen Höhen der Atmosphäre zusammengefasst.

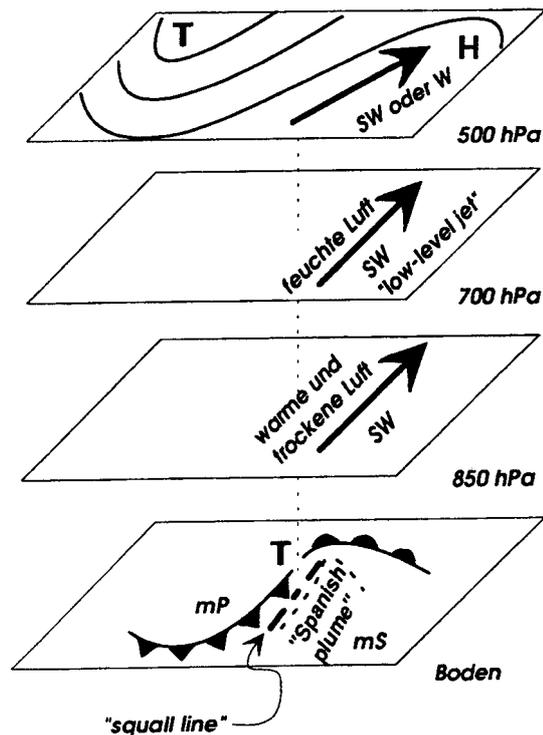


Abbildung 3.9: Merkmale einer Starkgewitterlage auf verschiedenen Höhen: Auf 500 *hPa* herrscht vor einem Tiefdrucktrog eine West- oder Südwestströmung, auf 700 *hPa* wird durch den thermischen Gradienten an der Bodenkaltfront des Tiefdrucktrog ein südwestlicher Low-level Jet induziert. Auf einer Höhe von 850 *hPa* bringen Südwestwinde warme und trockene Luft nach Norden und am Boden ist die *Spanish Plume*, eine Zunge mit warmer Luft aus Spanien, sowie die Bodenkaltfront des Höhentrog zu sehen. Vor dieser Kaltfront ist ausserdem die Lage einer präfrontalen Konvergenzlinie eingezeichnet (Huntrieser, 1995).

Von Bedeutung für die Auslösung von starken Gewittern sind auch zwei sogenannte Jetströmungen. Der Polarfrontjet sorgt für die Zufuhr von kühleren und feuchteren Luftmassen in der mittleren bis oberen Troposphäre, während der Low-level Jet als thermisch induzierter Wind parallel zur Kaltfront verläuft (Huntrieser, 1995). Mit diesen beiden Strömungen ist auch die notwendige Windscherung für starke Gewitter vorhanden (siehe auch Abbildung 3.3).

In ihrer Arbeit zum Einfluss einer Kanalisierung des Windes durch die Orographie auf die Vorhersage von heftigen Gewittern bezeichnen Schmid und Lehre einen Wind aus SSW bis

WSW sowie eine Windzunahme mit der Höhe als entscheidende Faktoren eines Gewittertages (Schmid and Lehre, 1998). Der Einfluss von lokalen Effekten auf die Entwicklung von Gewitterzellen wird auch von Bentley und seinen Mitarbeitern am Beispiel eines isolierten Tornados in Nebraska hervorgehoben (Bentley et al., 2002). In seiner Untersuchung mit Flugzeug- und Radarmessungen zeigt Fankhauser, dass auch die Verwendung von Divergenz- und Vorticityfeldern nützlich sein kann um zu erkennen, an welchen Orten heftige Gewitter ausgelöst werden.

3.4.3 Voraussetzungen für Superzellen

Damit es zu der für Superzellen notwendigen Trennung zwischen Auf- und Abwindströmung kommen kann, muss wie bereits im Kapitel zu den dynamischen Grundlagen erwähnt, eine starke Windscherung vorhanden sein. Durch Modellsimulationen unter vereinfachenden Annahmen konnten die theoretischen Resultate, dass es bei linear zunehmender Windstärke mit der Höhe zur Bildung einer rechts- und einer linksziehenden Superzelle kommt, bestätigt werden. Dreht die Windscherung hingegen antizyklonal mit der Höhe (was zum Beispiel beim Vorhandensein eines Polarfront- und eines Low-level Jets der Fall ist) wird die rechtsziehende Superzelle verstärkt und bleibt erhalten (siehe auch Abbildung 3.3). Bei zyklonal drehender Windscherung mit der Höhe wird dagegen die linksziehende Zelle bevorzugt (Klemp and Wilhelmson, 1978). Die erwähnten Resultate aus Theorie und Modellrechnung wurde auch tatsächlich beobachtet (Schmid et al., 1997),(Bentley et al., 2002).

In den meisten Gebieten werden die zyklonal drehenden, rechtsziehenden Superzellen wegen den vorherrschenden Windbedingungen häufiger beobachtet als die antizyklonalen linksziehenden Gewitter. In Gebirgigen Gegenden wie zum Beispiel im Alpenraum kann durch lokale Effekte wie die Kanalisierung der Windströmung, Berg- und Talwindssysteme, Entwicklung von Leezyklonen bei Föhnlagen das Windprofil lokal so modifiziert werden, dass die linksziehenden Zellen erhalten bleiben und teilweise grosse Hagelschäden verursachen (Houze et al., 1993),(Schmid and Schiesser, 1990),(Bunkers, 2002). Ein interessantes Phänomen sind die in der Schweiz beobachteten linksziehenden Zellen, welche auf dem Radarbild ein sogenanntes *false hook* aufweisen. Wird die ursprüngliche Aufwindregion nicht gleichmässig zwischen den beiden Teilen des Wirbelpaares aufgeteilt, so dass der antizyklonale Wirbel den grösseren Teil des Aufwindes enthält, kann sich der rechtsziehende Teil mit zyklonal rotierender Mesozyklone nicht abspalten und bleibt als *false hook* angehängt. Damit die linksziehende Zelle bevorzugt wird, genügen oft schon kleine Änderungen im Windprofil wie beispielsweise eine antizyklonale Drehung der Windscherung in der dünnen Schicht zwischen 1 km und 3 km Höhe (Bunkers, 2002).

Allgemein entstehen Superzellen bei ähnlichen Wetterlagen, welche auch starke Gewittertage auslösen (Höhentrog mit zugehöriger Kaltfront trifft auf warme, feuchte Luftmassen)(Bentley et al., 2002),(Schmid et al., 1997). Durch diabatische Frontogenese kann bereits vor der eigentlichen Kaltfront eine Konvergenzlinie entstehen, welche die Bildung von Superzellen auslösen kann (Kaltenböck, 2003).

Aus den meteorologischen Bedingungen, welche für die Entstehung von Gewittern oder Superzellen erfüllt sein müssen, resultieren verschiedene Sondierungsparameter, die zur Vorhersage von Gewittern benutzt werden können. Eine besonders schöne Auswertung und Berechnung dieser Parameter findet man beispielsweise bei Oker (Oker, 2004b). Zur Vorhersage von starken Gewittertagen in der Schweiz eignet sich aus der Mittagssondierung von Payerne die $CAPE_{CCL}$ und aus der Mitternachtssondierung der CS-Index am besten (Huntrieser, 1995).

3.4.4 Sondierungsparameter

Für die Vorhersage von Superzellenlagen eignen sich vor allem solche Parameter, welche wichtige Voraussetzungen für die Entstehung von Superzellen beinhalten. Viele Autoren haben erfolgreich Parameter wie CAPE (vorhandene Labilitätsenergie), Bulk Richardson Number (Instabilität der Atmosphäre) und Windscherung verwendet (Houze et al., 1993) (Moller et al., 1994). Aus Betrachtungen der Feuchtebilanz einer Gewitterzelle folgt, dass in einem Gebiet mit gegebener Feuchtigkeit nicht beliebig viele grosse Stürme entstehen können (Fankhauser, 1971). Deshalb muss zur Entwicklung von Superzellen auch etwas konvektive Hemmung CINH vorhanden sein. Besonders gut funktionieren die von Heidi Huntrieser speziell für die Schweiz entwickelten Parameter SWISS-Index und CS-Index zur Vorhersage von Gewittern. Indikatoren, welche Wind-, und Stabilitätsinformationen enthalten eignen sich zur Abschätzung des Potentials für Superzellen. Oker berechnet viele verschiedene Indikatoren aus Sondierungen weltweit und hat die Bedeutung und Verwendung der einzelnen Parameter zusammengefasst (Oker, 2004b). Ein Beispiel einer solchen Auswertung ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

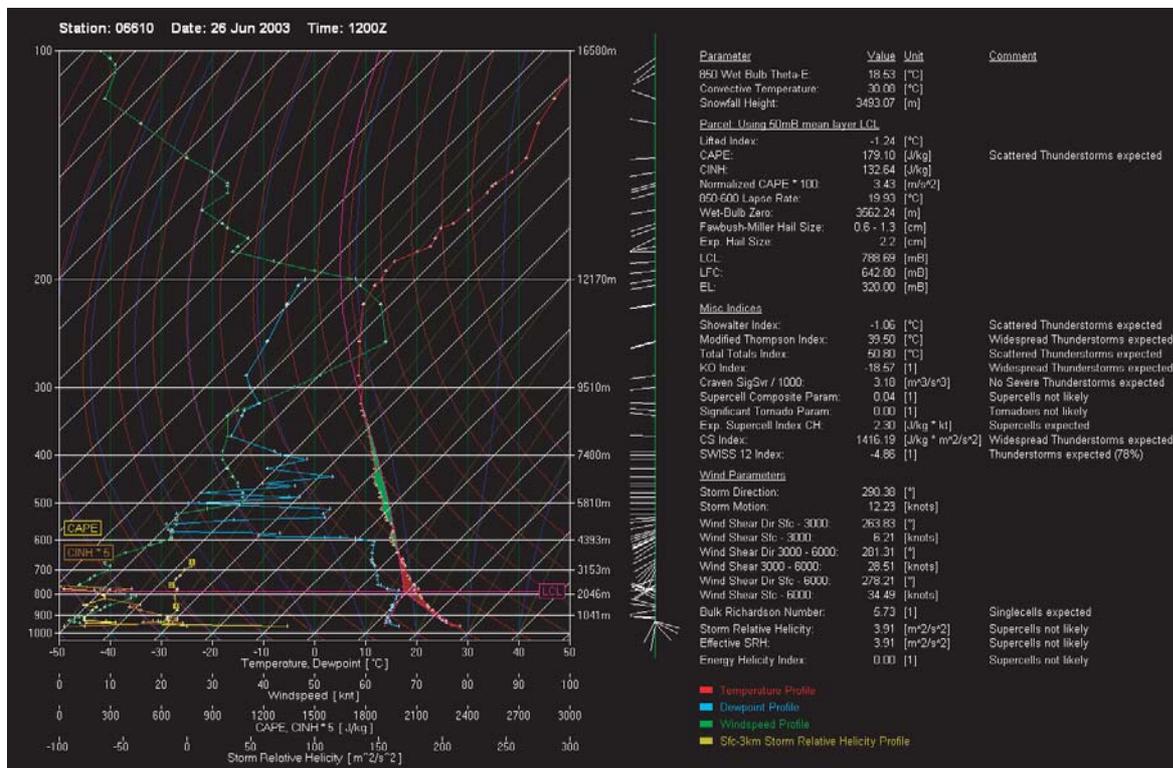


Abbildung 3.10: Payerne-Sondierung für den 26.06.2003: Die grün eingezeichnete Fläche gibt an, dass an diesem Tag mit einem Betrag von 1179 Jkg^{-1} nicht viel Labilitätsenergie vorhanden ist. Die Bulk Richardson Number ist mit 5.73 etwas zu klein für Superzellenbedingungen. Die Storm Relative Helicity SRH liegt mit $3.91 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ deutlich unterhalb der üblicherweise verwendeten Grenzwerte (Oker, 2004b).

Der dazugehörige Windhodograph, in Abbildung 3.11 dargestellt, kann ebenfalls abgerufen werden.

Die Auswertung der Payern-Sondierung wird zur Diskussion der synoptischen Wetterlage an

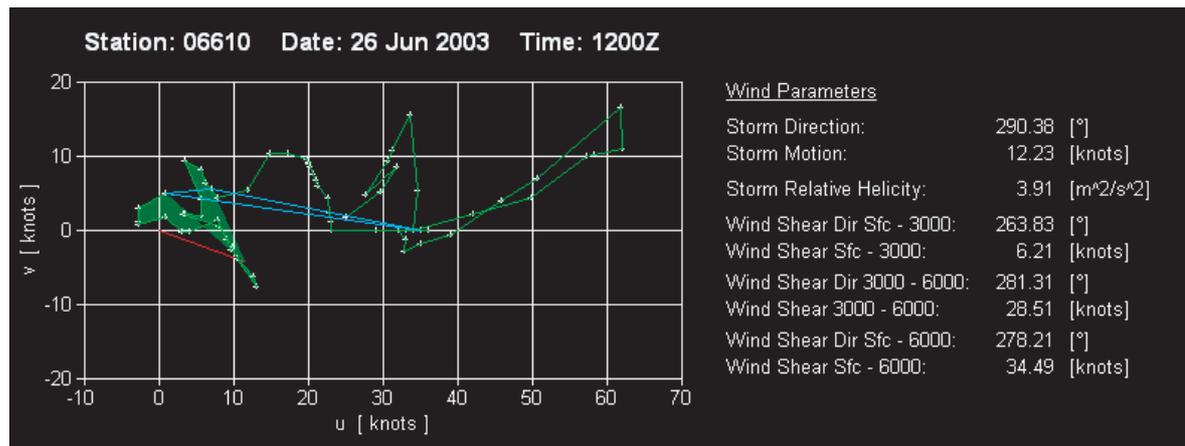


Abbildung 3.11: Windhodograph berechnet aus der Payerne-Sondierung für den 26.06.2003 (Oker, 2004b)

den sechs in dieser Arbeit betrachteten Tage verwendet.

3.5 Identifikationsmöglichkeiten von Superzellen

In diesem Abschnitt soll anhand bereits durchgeführter Studien dargestellt werden, welche Möglichkeiten zur Erkennung von Superzellen mit verschiedenen Daten bestehen.

In seiner Arbeit zur Beobachtung einer linksziehenden Zelle definiert Nielson-Gammon 1994 eine Superzelle nach folgenden Kriterien, die alle erfüllt sein sollen (Nielson-Gammon and Read, 1994):

1. Das Radarecho der Zelle muss in Richtung der vertikalen Windscherung verlängert sein.
2. Der maximale Gradient der Reflektivität liegt im hinteren Bereich des Echos.
3. Über dem Einströmungsgebiet ist ein Reflektivitätsüberhang erkennbar.
4. Die Sturmbewegung weicht vom mittleren Wind ab.
5. Es ist ein Hakenecho vorhanden.
6. Die Zelle weist eine Mesozyklone auf.

Als weitere Hinweise darauf, dass es sich um eine starke Superzelle handelt, werden in derselben Arbeit sogenannte Flares oder Hail Spikes (Hinweis auf Hagel) und begrenzte Schwachechozone (BWER:– > rotierende Aufwinde) verwendet. Aus der radialen Dopplergeschwindigkeit in den Flares kann ausserdem die Fallgeschwindigkeit des Hagels berechnet werden. Ist diese positiv, wachsen die Hagelkörner, bei negativer Geschwindigkeit fallen sie aus. Als wichtige Sondierungsparameter werden LI, CAPE, CINH und BRN verwendet.

Klemp beschreibt in seiner Arbeit zur Dynamik von Superzellen ebenfalls das vorhandensein einer Mesozyklone in mittlerer Höhe als wichtiges Erkennungsmerkmal für Superzellen. Die im Zusammenhang mit der Entstehung von Tornados wichtige Bildung von neuen Abwindzentren kann zum Beispiel in Form von Hakenechos oder einem sogenannten Clear Slot, dort wo der Niederschlag verdunstet beobachtet werden (Klemp, 1987).

Houze und seine Mitarbeiter zeigen in ihrer Arbeit zu den sogenannten *false hook* Stürmen in der Schweiz, wie die Abweichung einer Zelle vom mittleren Wind aus den Radarbildern bestimmt werden kann (Houze et al., 1993). Ein Hagelgewitter definieren sie als isolierte 45 dBZ -Zelle, für die folgende Bedingungen erfüllt sein müssen:

1. Die maximale Reflektivität überschreitet einen Wert von 65 dBZ .
2. Die Intensität ist während 30 min grösser als 60 dBZ .

Zur Identifikation von Superzellen verwenden sie Reflektivitätskriterien wie eine begrenzte Schwachechozone, oder ein Hakenecho, welches während mindestens 5 min auf der richtigen Seite vorhanden sein muss. Ausserdem wurde in dieser Arbeit festgestellt, dass die Richardsonnummer RI zur Beschreibung des Superzellenpotentials in einem Gebiet nicht ausreicht. Hat dieser Parameter einen Wert $< 30\text{-}50$, sind sowohl rechtsziehende Superzellen als auch linksziehende Multizellen möglich.

In seiner Arbeit zur operationellen Erkennung von Superzellen mit dem Radar beschreibt Moller das Vorhandensein einer Mesozyklone und den Stationärzustand als wichtige Kriterien für Superzellen (Moller et al., 1994). Die Mesozyklone sollte dabei eine Vorticity grösser als 10^{-2} s^{-1} aufweisen, während mindestens 10 min beobachtbar sein und $1/3$ der Höhe der Zelle umfassen. Weitere beobachtbare Merkmale sind BWER, Wallecloud oder ein Hakenecho. Die Abweichung vom mittleren Wind der Sturmbewegung ist nicht hinreichend zur eindeutigen Erkennung von Superzellen. Schwierigkeiten bei der Identifikation können Superzellen, welche vom klassischen Bild abweichen bieten. Bei sogenannten HP Superzellen liegt der Aufwind im vorderen Teil des Echos und LP Superzellen werden wegen dem niedrigen Niederschlagsgehalt nicht so leicht erkannt.

In ihren Fallstudien zu drei Fällen von Superzellen in der Schweiz beschreiben Schmid und Mitarbeiter zusätzlich zu den üblichen Reflektivitätskriterien (Hakenecho, BWER, v-Notch) die Höhe des 45 dBZ -Volumens oder die Beobachtung des integrierten Flüssigwassergehaltes als geeignete Kriterien zur Identifikation von Superzellen (Schmid et al., 1997). Bei der Betrachtung der Dopplergeschwindigkeit sollte man in mittlerer Höhe die rotierende Mesozyklone, in unteren Schichten Konvergenz und in höheren Schichten Divergenz sehen. Zur Erkennung von Rotation in einer Gewitterzelle werden folgende Kriterien beschrieben: Eine Vortessignatur VS wird durch die untenstehenden Parameter definiert:

D Distanz zwischen den Punkten mit maximaler Geschwindigkeit

ΔV Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den beiden Maximalwerten

Δ/D Scherung

$\Delta V/2$ Rotationsgeschwindigkeit

h Höhe der Vortessignatur

Δh Vertikale Ausdehnung der Signatur

Eine mesozyklonale Vortessignatur (MVS) erfüllt folgende Bedingungen:

- $\Delta V > 26\text{ ms}^{-1}$
- $\Delta V/D > 0.005$
- $\Delta V/D > 0.035$ falls $\Delta V > 32\text{ ms}^{-1}$

Eine Mesozyklone ist definiert als eine mesozyklonale Vortexsignatur, welche während mindestens 30 min vorhanden ist und eine vertikale Ausdehnung von $\Delta h > 4 \text{ km}$ erreicht. Probleme bei der Identifikation in Dopplerbildern stellt die Faltung von hohen Geschwindigkeiten grösser als die Nyquist-Geschwindigkeit dar. Da in Mesozyklonen wie bei gefalteten Geschwindigkeiten ebenfalls sehr grosse gegenläufige Werte nebeneinander zu liegen kommen, ist die Entfaltung in solchen Situationen sehr schwierig (Wüest, 2001).

In ihrer Fallstudie zu einer Linksziehenden Superzelle in Texas beschreiben Grasso und Hilgendorf unter anderem, wie der integrierte Flüssigwassergehalt zur Vorhersage von Hagel verwendet werden kann (Grasso and Hilgendorf, 2001). Beobachtete Hagelschläge sind mit einer schnellen Abnahme dieser Grösse verbunden.

In einigen der oben erwähnten Arbeiten wird auch dokumentiert, dass die überschüssenden Wolkentops von grossen Superzellen auf Satellitenbildern schön zu sehen sind.

Kapitel 4

Methode

In der vorliegenden Arbeit sollen Kriterien erarbeitet werden, um Superzellen in den ETH-Radar Daten ohne Dopplergeschwindigkeit zu erkennen. Die verwendeten Daten sowie der in IDL programmierte Algorithmus zur Identifizierung und Verfolgung von potentiellen Superzellen und fortlaufenden Berechnung verschiedener Parameter werden im Kapitel Vorgehen und Datengrundlagen beschrieben. Die genaue Berechnung dieser Kriterien wird im darauffolgenden Kapitel Definition der Kriterien dargestellt. Der Vergleich mit den von Oker in den verwendeten Daten identifizierten Zellen sowie die auf diesem Vergleich basierende statistische Auswertung der berechneten Parameter werden im Abschnitt Statistische Auswertung diskutiert.

4.1 Vorgehen und Datengrundlagen

Als Datengrundlage für diese Arbeit wurden archivierte Daten des institutseigenen C-Band Dopplerradars von sechs Tagen verwendet. Zwei dieser sechs Tage (der 23/24.06.2002 und der 26.06.2003) wurden dabei so ausgewählt, dass sie möglichst viele Superzellengewitter enthalten sollten. Die restlichen vier Tage (22.07.2003, 21.06.2002, 31.05.2003 und 12.08.2004) wurden als Tage mit vielen Gewitterzellen aber wenigen Superzellen verwendet. Als Kriterium für die Auswahl der letzten vier Tage diente die verhagelte Fläche, welche für jeden dieser Tage im Bereich $1000\text{km}^2 \pm 100\text{km}^2$ liegt (Oker, 2004a). Die Radardaten der sechs Tage wurden dann mit einer bereits existierenden Routine in einen Algorithmus eingelesen, der zur Identifikation und Verfolgung der vorhandenen Gewitterzellen sowie zur Berechnung der verschiedenen Parameter dient. Ein Flussdiagramm des erwähnten Algorithmus ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Um die Rechenzeit des Programmes zu verkürzen wurden die alle 5 *min* zur Verfügung stehenden PPIs der Reflektivität für jeweils einen Tag zuerst eingelesen und abgespeichert. Es wurden nur Daten grösser als 100000 *Byte* und kleiner als 250000 *Byte* verwendet um fehlerhafte PPIs oder Daten, bei denen es sich gar nicht um PPIs handelt, auszuschliessen. Mit dem *five-neighbor-filter* wurde die Daten ausserdem geglättet und Probleme, verursacht durch einzelne Pixel mit sehr hohen Reflektivitäten (beispielsweise die Üetlibergantenne), konnten beseitigt werden (Wüest, 2001). Fehlende Radarstrahlen wurden durch Interpolation der benachbarten Werte ersetzt.

Nach dem Einlesen der Daten wird zu Beginn des ersten Zeitpunktes t_0 zuerst ein Uebersichtsradarbild mit Zentrum am Standort des ETH-Radars dargestellt. Da noch keine identifizierten Zellen vorhanden sind, wird der ganze Verfolgungsteil übersprungen und es werden neue Zen-

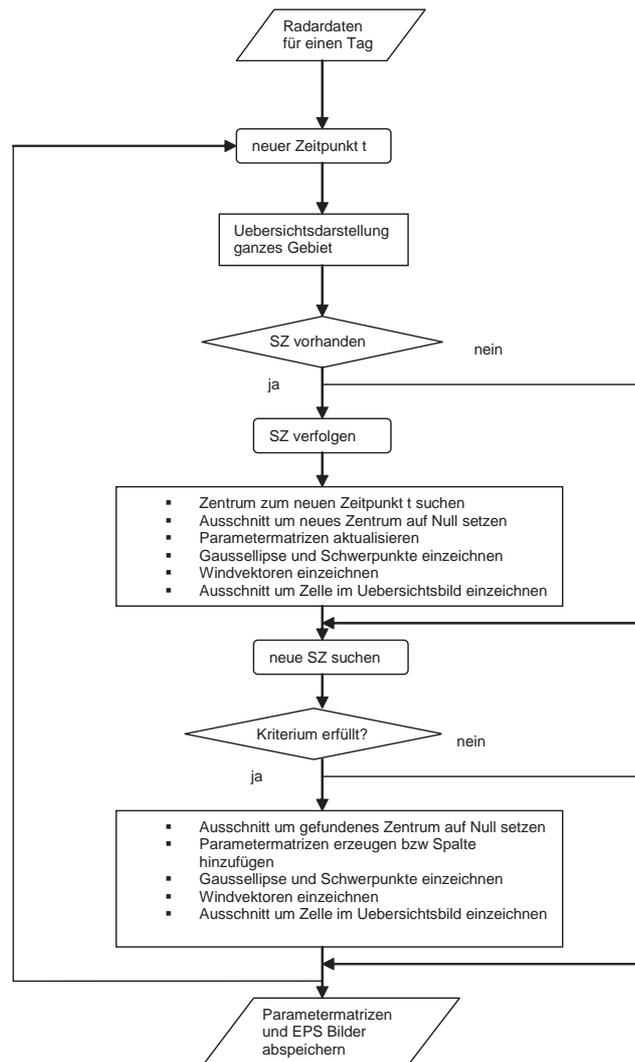


Abbildung 4.1: Flussdiagramm des Tracking-Algorithmus: Nach dem Einlesen der Radardaten wird das aktuelle Radarbild zum Zeitpunkt t dargestellt und darauf getestet, ob bereits identifizierte Superzellen vorhanden sind. Gegebenenfalls wird deren neue Position gesucht, die Parametermatrizen werden aktualisiert und es werden vergrößerte Ausschnitte der Zelle dargestellt. Falls keine Zellen vorhanden sind, wird das aktuelle Radarbild nach neuen Superzellen abgesucht, die Datenmatrizen werden entsprechend erweitert und Ausschnitte des Radarbildes um die Zelle werden dargestellt. Das Verfolgen von bereits vorhandenen- und Suchen nach neuen Zellen wird für jeden Zeitschritt wiederholt. Sind alle Daten des Tages abgearbeitet, werden die Datenmatrizen zur Weiterverarbeitung als Text-Files abgespeichert und alle Graphiken werden nochmals im EPS-Format ausgegeben.

tren gesucht. Eine neue Zelle wird als genügend starkes Gewitter erkannt, falls die über neun Pixel gemittelte maximale Reflektivität grösser als 52 dBZ ist. Damit dieselbe Zelle nicht mehrfach identifiziert wird, setzt man die Fläche ihrer 45 dBZ -Kontur in einer temporären Kopie des aktuellen PPIs auf Null. Anschliessend werden für die erste Zelle die verschiedenen, im nächsten Abschnitt zur Definition der Kriterien genauer erläuterten Parameter berech-

net und in die erste Spalte der Parametermatrizen eingetragen. In diesen Parametermatrizen stellt jede Zeile einen bestimmten Zeitpunkt und jede Spalte eine Zelle dar. Danach werden vergrösserte Ausschnitte mit einerseits einer angepassten Gaussellipse, dem Schwerpunkt und dem arithmetischer Mittelwert der 40 *dBZ*-Kontur sowie der Lage des Maximums und andererseits die berechnete Sturmbewegung und der nächstgelegene COTREC - Wind eingezeichnet (Mecklenburg et al., 2000). Im Übersichtsbild wird die Lage der Zelle mit einer Box von der Grösse des Ausschnittes markiert. Es werden solange Zellen gesucht und Spalten an die Datenmatrizen angefügt, bis der Wert der maximalen Reflektivität am Ort des neuen Zentrums unter den Schwellenwert von 52 *dBZ* fällt. Danach ist der Zeitschritt t_0 beendet und es wird das nächste PPI für den Zeitpunkt $t_0 + 1$ verwendet.

Sind zum nächsten Zeitpunkt bereits identifizierte Zellen vorhanden, wird für jede einzelne von ihnen die Lage des Zentrums zum aktuellen Zeitpunkt gesucht. Wie beim Suchen von neuen Zellen wird auch hier in einem temporären PPI, welches nach den verlagerten Zentren abgesucht wird, die 45 *dBZ*-Fläche auf Null gesetzt. Damit nicht das Zentrum einer anderen, gleichzeitig existierenden Zelle als neues verlagertes Zentrum identifiziert wird, ist der Suchbereich auf ein Quadrat mit Kantenlänge 40 *km* eingeschränkt. Ist der Wert der maximalen Reflektivität der verlagerten Zelle unter die Schwelle von 52 *dBZ* gefallen, wird sie nicht mehr weiterverfolgt und als verloren gemeldet. Ist hingegen der Schwellenwert nicht unterschritten, werden wiederum alle Parameter berechnet und die Werte in die Parametermatrizen eingetragen. Die Ausschnittsdarstellungen und die Übersicht mit der Lage der Superzelle werden ebenfalls eingezeichnet und am Bildschirm angezeigt. Für jede bereits vorhandene Zelle wird also deren neue Position gesucht und die Parameter werden berechnet. Bei den verlorenen Zellen wird die entsprechende Spalte in den Datenmatrizen nicht gelöscht; es werden einfach keine neuen Werte mehr eingetragen. Sind zu einem Zeitpunkt keine Zellen vorhanden, wird wie zu Beginn der Verfolgungsteil ausgelassen und es werden direkt neue Zellen gesucht.

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Bildern wird eine Karte mit den Zugbahnen aller identifizierten Gewitterzellen während der Laufzeit des Algorithmus erstellt, die wie die Parametermatrizen laufend aktualisiert wird. Sind schliesslich alle PPIs des betrachteten Tages durchlaufen, werden die erstellten Parametermatrizen als Textfiles zur weiteren Bearbeitung abgespeichert. Die während der Laufzeit erzeugten Übersichts- und Ausschnittsdarstellungen werden zur vereinfachten Weiterverwendung nochmals im EPS-Format gezeichnet.

4.2 Definition der Kriterien

Für jede mit dem Algorithmus identifizierte Zelle wurden für jeden Zeitschritt (alle 5 *min*) während der gesamten Lebensdauer verschiedene einfache Parameter berechnet. Ausserdem wurde eine Ellipse an die Kontur der Zelle angepasst und die Abweichung der Sturmbewegung vom nächstgelegenen COTREC-Wind berechnet. Die genaue Definition dieser Kriterien soll in diesem Abschnitt dargestellt werden.

4.2.1 Einfache Kriterien

Bei der Suche von neuen oder bei der Verlagerung von vorhandenen Gewitterzellen wird jeweils das Maximum $maxdbz$ der über neun Pixel gemittelten Reflektivität berechnet:

$$maxdbz = \max\left(\frac{1}{9} \sum_{\substack{i-1 < i < i+1 \\ j-1 < j < j+1}} Z(i, j)\right) \quad (4.1)$$

Dabei bezeichnen i und j die beiden horizontalen Koordinaten der Reflektivität $Z(i, j)$ in Pixeleinheiten. Ein Pixel entspricht einem Kilometer. Parallel zur Berechnung des Maximums wird die Lage des Zentrums SZI und SZJ in einem auf den Standort des Radars bezogenen Koordinatensystem aufgezeichnet. Diese Koordinaten haben in beiden Richtungen einen Wertebereich von 0 bis 360.

Als weitere Kriterien werden die Fläche der 40 dBZ-Kontur und der Radius eines hypothetischen Kreises mit dem gleichen Flächeninhalt berechnet. Dazu wird eine Funktion verwendet, welche vom Zentrum der Zelle aus ein zusammenhängendes Gebiet mit Reflektivitätswerten in einem bestimmten Interval sucht. Konturenflächen verschiedener Reflektivitätswerte einer Zelle wurden beispielsweise auch von Schmid betrachtet (Schmid, 1998).

Die von Houze beschriebene Definition einer Hagelzelle wurde für diese Arbeit etwas abgeändert. Der aus drei Komponenten zusammengesetzte Parameter *hail* wird folgendermassen berechnet:

1. Der Variablen *maxrefl* wird der Wert 1 zugewiesen, falls die maximale Reflektivität grösser als 55 dBZ ist.
2. Die Variable *lebensdauer* hat den Wert 1, falls die Zelle während sechs aufeinanderfolgenden Zeitpunkten ($\cong 30 \text{ min}$) vorhanden ist.
3. Die Variable *ref55dbz* hat den Wert 1, falls die maximale Reflektivität während 30 min grösser als 55 dBZ ist.

Wird eine Bedingung nicht erfüllt, hat die betreffende Variable den Wert 0. Der Parameter *hail* ist dann die Summe der drei Variablen, das heisst er kann die Werte 0 1 2 und 3 annehmen. Eine Zelle gilt als Hagelzelle, wenn *hail* den Wert 3 aufweist.

Wie von Klemp und verschiedenen anderen Autoren beschrieben, befinden sich die Luftströmungen einer Superzelle während der Hauptphase ihres Lebenszyklus in einem Stationärzustand. Das Vorhandensein dieses Stationärzustandes einer Zelle wird anhand von drei Bedingungen getestet und durch den Parameter *steady* zusammenfassend dargestellt:

1. Falls die Varianz der 40 dBZ -Fläche kleiner als 20 ist, bekommt die erste Kontrollvariable den Wert 1
2. Die Kontrollvariable für die Lebensdauer hat den Wert 1, falls die Zelle sechs mal hintereinander wiedergefunden wurde.
3. Ist die Varianz der Reflektivität kleiner als 3, wird der dritten Kontrollvariablen der Wert 1 zugewiesen.

Um die Variable *steady* zu erhalten, werden wiederum die Werte aller drei Kontrollvariablen addiert. Zusätzlich wird die mittlere Reflektivität der Zelle berechnet. Die einzelnen Komponenten dieser Stationaritätsvariablen (*lebensdauer*, *flaechenvarianz* und *reflektivitaetsvarianz*) werden auch getrennt abgespeichert und statistisch untersucht.

4.2.2 Ellipsenkriterien

Wie schon von Schmid (Schmid, 1998) durchgeführt, wird auch in dieser Arbeit die Form von Gewitterzellen durch eine Ellipse approximiert und verschiedene Parameter in Bezug auf diese Ellipse sollen berechnet werden. Dazu wird an einen quadratischen Ausschnitt des Radarbildes

mit dem Zentrum der Zelle (höchste Reflektivität) als Mittelpunkt eine zweidimensionale Gaussverteilung angepasst. Insgesamt werden die folgenden 21 Ellipsenparameter berechnet:

fArea Fläche der 40 *dBZ*-Kontur

ciArithmetic,cjArithmetic Lage des arithmetischen Mittelwertes der 40 *dBZ*-Kontur bezüglich der Ellipse

ciWeightedt,cjWeightedt Lage des Schwerpunktes der 40 *dBZ*-Kontur bezüglich der Ellipse

cit,cjt Lage des Reflektivitätsmaximums in Bezug auf die Ellipse

A Dieser Vektor enthält die 7 Parameter der von der an die Radardaten des Ausschnittes angepassten zweidimensionalen Gaussverteilung.

$$F(x, y) = A_0 + A_1 e^{-U/2} \quad (4.2)$$

wobei U die Gleichung einer Ellipse beschreibt, deren Hauptachsen a und b mit den Standardabweichungen der zweidimensionalen Gaussverteilung übereinstimmen:

$$U = (x'/a)^2 + (y'/b)^2 \quad (4.3)$$

x' und y' bezeichnen die Koordinaten bezüglich der Achsen der Ellipse.

Im Vektor A werden die sieben auch in der IDL-Hilfe beschriebenen Parameter der zweidimensionalen Gaussverteilung ausgegeben:

- $A(0)$: konstanter Term der Gleichung 4.2
- $A(1)$: Skalierungsfaktor der Gaussverteilung 4.2
- $A(2), A(3)$: grosse und kleine Halbachse der in Gleichung 4.3 beschriebenen Ellipse
- $A(4), A(5)$: Lage des Zentrums der Ellipse
- $A(6)$: Winkel T , um den die Ellipse von der X-Achse aus gesehen im Gegenuhrzeigersinn gedreht ist.

TDgr Winkel zwischen der X-Achse des nicht gedrehten Koordinatensystems und der grossen Halbachse a im Uhrzeigersinn.

Flaechenanteil : Fläche der 40 *dBZ*- Ellipse (d.h $F=40$ in Gleichung 4.2)/Fläche der 40 *dBZ*-Kontur

asym b/a Abweichung der an die Zellenkontur angepassten Ellipse vom Kreis

spi,spj,ami,amj : Zum Einzeichnen im Ausschnitt des Radarbildes verwendete Lage von arithmetischem Mittelwert und Schwerpunkt der 40 *dBZ*-Kontur in Schweizerkoordinaten

Nach der im Kapitel 3.5 gegebenen Definition einer Superzelle soll das Radarecho der Zelle in Richtung der vertikalen Windscherung verlängert sein und der maximale Gradient der Reflektivität befindet sich im hinteren Bereich (Nielson-Gammon and Read, 1994). Für diese Arbeit ist also zu erwarten, dass sich die Form einer Superzelle besser durch eine Ellipse approximieren lässt als die Form einer Singel- oder Multizelle. Der Parameter *Flaechenanteil*

sollte für eine Superzelle näher bei eins liegen und das Verhältnis der kleinen Halbachse zur grossen Halbachse sollte kleiner sein. Wie viele Arbeiten zeigen, liegt auch die maximale Reflektivität einer Superzelle nicht im Zentrum des Radarechos (Houze et al., 1993), (Moller et al., 1994). Bei einer Superzelle sollten deshalb die Schwerpunkts- und Mittelpunktsparemeter bezüglich der Ellipse eher im hinteren Bereich liegen. Vom Winkel $Tdgr$ wurde ausserdem eine korrigierte Form verwendet. Die korrigierten Winkel wurden so berechnet, dass für jeden Zeitpunkt falls nötig $\pm 180^\circ$ beziehungsweise $\pm 360^\circ$ addiert wurde, um die Abweichung vom Median über die gesamte Lebensdauer zu minimieren.

In Abbildung 4.2 ist eine Zelle mit approximierter Ellipse dargestellt. Schwerpunkt, arithmetischer Mittelpunkt sowie die Lage des Reflektivitätsmaximums sind ebenfalls eingezeichnet.

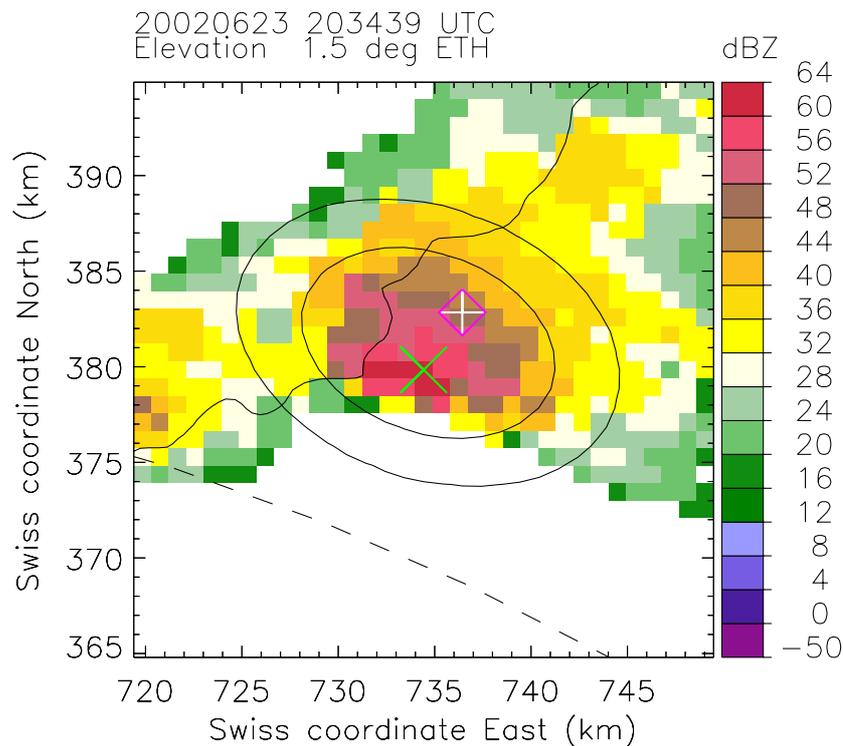


Abbildung 4.2: Beispiel einer Zelle mit eingezeichneter Ellipse: Die innere und äussere schwarze Ellipse bezeichnen den 41 dBZ - beziehungsweise 36 dBZ -Schnitt durch die an die 35 dBZ -Kontur angepasste Gaussellipse. Das Maximum der Reflektivität ist mit einem grünen Kreuz markiert, der Schwerpunkt der 40 dBZ -Fläche ist als weisses Plussymbol dargestellt und das rosa Zeichen bezeichnet den arithmetischen Mittelwert.

4.2.3 Windkriterien

Nach der Definition von Nielson-Gammon weicht eine Superzelle in ihrer Bewegung vom mittleren Wind ab (Nielson-Gammon and Read, 1994). Diese zum mittleren Wind senkrecht stehende Bewegungskomponente des Sturms kann auch mit verschiedenen Ansätzen dynamisch begründet werden (Klemp, 1987)(Holton, 1992). Für eine rechtsziehende Superzelle gilt nach Schmid und Lehre, dass sie bei einem Betrag der Sturmbewegung kleiner als

15 ms^{-1} 30° und bei einer Sturmbewegung grösser als 25 ms^{-1} um 20° nach rechts abweicht. In beiden Fällen bewegt sich die Zelle mit 75% beziehungsweise 80% des Betrages des mittleren Windes (Schmid and Lehre, 1998). Linksziehende Zellen bewegen sich oft schneller als der mittlere Wind, wie beispielsweise Fankhauser in seiner Arbeit erwähnt (Fankhauser, 1971). Diese Faustregeln sind aus der Betrachtung des mittleren Windes und der Sturmbewegung für rechts- und linksziehende Zellen ableitbar (siehe Abbildung 4.3).

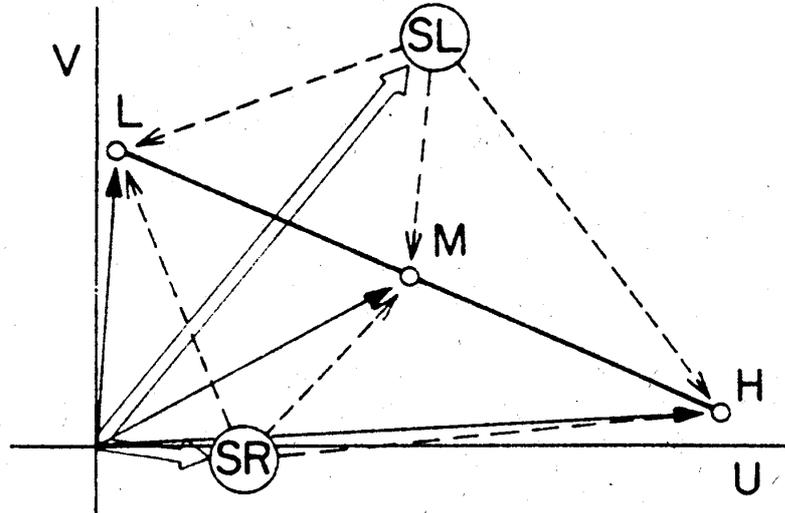


Abbildung 4.3: Winddarstellung für rechts- und linksziehende Zellen nach Klemp. Die dicken Pfeile von Ursprung ausgehend bezeichnen die absolute Geschwindigkeit einer rechts- beziehungsweise linksziehenden Zelle (entnommen aus (Klemp, 1987).

In dieser Arbeit werden der mittlere Wind, die Sturmbewegung, der Abweichungswinkel sowie die Richtung der Abweichung berechnet:

EW Vektor des nächstgelegenen COTREC-Windes. Wird in dieser Arbeit als Umgebungswind verwendet. $EW(0)$ ist die Ost-West Komponente in ms^{-1} , $EW(1)$ die Nord-Süd Komponente in ms^{-1} .

SM Aus dem aktuellen und dem vorhergehenden Zeitpunkt berechnete Sturmbewegung in ms^{-1} .

$$SM(0) = 1000 * (X2 - X1) / (5 * 60) \quad (4.4)$$

$$SM(1) = 1000 * (Y2 - Y1) / (5 * 60) \quad (4.5)$$

$(X1, Y1)$ und $(X2, Y2)$ sind die Schweizerkoordinaten des Reflektivitätsmaximums zum aktuellen beziehungsweise vorhergehenden Zeitpunkt.

EWBetrag Betrag des Umgebungswindvektors

SMBetrag Betrag des Sturmbewegungsvektors

gamma Winkel zwischen dem Umgebungswindvektor und dem Sturmbewegungsvektor

SLSR Aus der Richtung des Kreuzproduktvektors zwischen Sturmbewegung und Umgebungswind berechneter Indikator für die Richtung der Abweichung. Zeigt das Kreuzprodukt nach unten, weicht die Sturmbewegung nach rechts ab und *SLSR* bekommt den Wert 1 zugewiesen; anderenfalls weicht die Zelle nach links ab und *SLSR* hat den Wert -1

Wie oben erwähnt ist theoretisch zu erwarten, dass die Superzellen stärker vom mittleren Wind abweichen; das bedeutet, der Abweichungswinkel sollte grösser sein. Der Wert des Parameters *SLSR* sollte über die gesamte Lebensdauer gemittelt bei einer einfachen Zelle nahe bei 0 liegen. Eine Superzelle hingegen weicht in ihrer stationären Phase immer in dieselbe Richtung vom mittleren Wind ab, sodass der gemittelte Parameter *SLSR* für eine rechtsziehende Zelle näher bei 1 und für eine linksziehende Zelle näher bei -1 sein sollte.

In Abbildung 4.4 sind der Vektor des Umgebungswindes und die Sturmbewegung für den Ausschnitt um eine Gewitterzelle dargestellt:

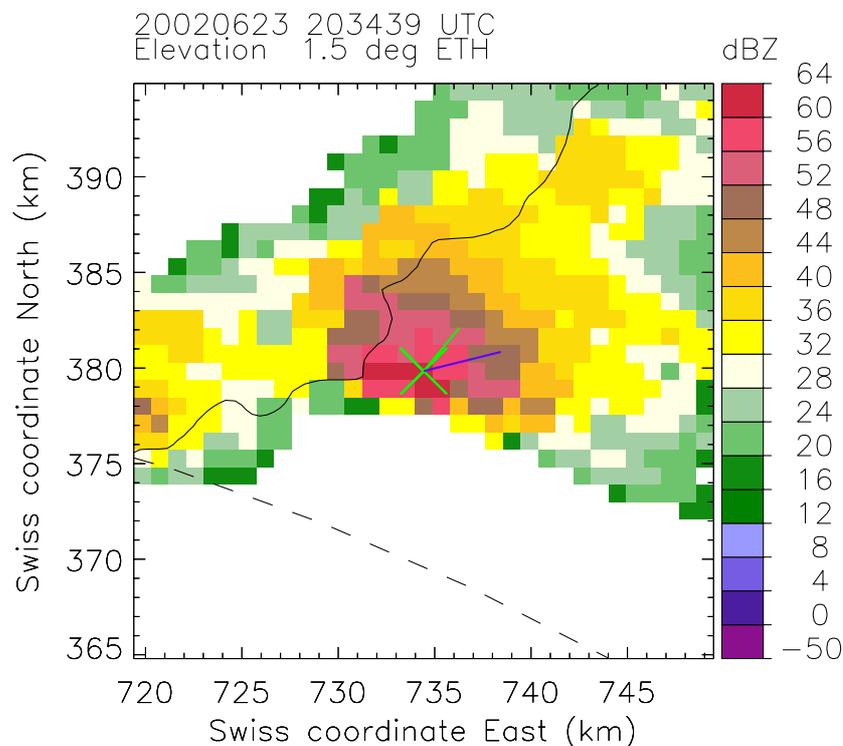


Abbildung 4.4: Beispiel einer Zelle mit eingezeichneter Sturmbewegung und Umgebungswind: Der nächstgelegene COTREC-Wind ist in grün, die berechnete Sturmbewegung in blau eingezeichnet.

4.2.4 Zusammenfassung der Kriterien

In Tabelle 4.1 sind die in der statistischen Auswertung betrachteten Kriterien nochmals kurz zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Kriterien unter den in der statistischen Auswertung verwendeten Bezeichnungen

| | |
|---------------------------|--|
| 40 <i>dBZ</i> -Fläche | Fläche der 40 <i>dBZ</i> -Kontur der Zelle |
| 40 <i>dBZ</i> -Fläche Std | Standardabweichung der 40 <i>dBZ</i> -Fläche |
| SM _x | Sturmbewegung in Ost-West Richtung |
| SM _y | Sturmbewegung in Nord-Süd Richtung |
| SM | Betrag der Sturmbewegung |
| Abweichung | Winkel zwischen Sturmbewegung und Umgebungswind |
| SLSR | Indikator für das Vorzeichen der Abweichung |
| SLSR Betrag | Absolutwert des Parameters SLSR |
| Hagelkriterium | Definition einer Hagelzelle |
| Stat.Kriterium | Bedingungen für einen Stationärzustand |
| maxReflekt | Grösster während der Lebensdauer erreichter Reflektivitätswert |
| Lebensdauer | Lebensdauer in 5 <i>min</i> Einheiten |
| mittlere Reflektivität | Über die Lebensdauer gemittelte maximale Reflektivität |
| Refl.Std | Standardabweichung der maximalen Reflektivität während der Lebensdauer |
| MaxX | X-Komponente des Maximums bezüglich Ellipse |
| MaxY | Y-Komponente des Maximums bezüglich Ellipse |
| MaxX.Betrag | Betrag der X-Komponente des Maximums bezüglich Ellipse |
| MaxY.Betrag | Betrag der Y-Komponente des Maximums bezüglich Ellipse |
| Neigung | Winkel zwischen X-Achse und grosser Halbachse |
| Neigung.Std | Standardabweichung des Winkels zwischen X-Achse und grosser Halbachse |
| Neigung.korr | Korrigierter Winkel zwischen X-Achse und grosser Halbachse |
| Neigung.korr.Std | Standardabweichung des korrigierten Winkels |
| Asymmetrie | Verhältnis zwischen kleiner und grosser Halbachse der Ellipse |

4.3 Statistische Auswertung

Nach der Berechnung der verschiedenen Parametermatrizen, welche jeweils für einen Tag die Parameterwerte jeder Zelle während ihrer Lebensdauer enthalten, geht es nun darum herauszufinden, welche der in Tabelle 4.1 aufgelisteten Kriterien für die Identifikation von

Superzellen geeignet sind. Die gefundenen Kriterien werden dann mit demselben Datensatz getestet. Ein Test mit unabhängigen Daten liegt nicht im Rahmen dieser Arbeit.

4.3.1 Datenaufbereitung

Um die verschiedenen Kriterien zu testen, muss zuerst bestimmt werden, bei welchen der insgesamt 73 während der sechs Tage identifizierten Gewitterzellen es sich um Superzellen handelt. Eine Klassifikation der Zellen in drei Kategorien wurde von Oker als unabhängiger Experte durchgeführt. Er erstellte für die sechs Tage jeweils eine Karte mit den farbcodierten Zugbahnen der Gewitterzellen und eine zugehörige Tabelle mit den Parametern Start- und Endzeit, Lebensdauer, Länge der Zugbahn, Sturmgeschwindigkeit sowie Lage des Start- und Endpunktes in Schweizerkoordinaten. Diese Daten wurden dann manuell mit den vom hier verwendeten Algorithmus generierten Hagelzügen und den Ortskoordinaten der Reflektivitätsmaxima verglichen. In Abbildung 4.5 sind die von Oker bestimmten Zugbahnen und die mit berechneten Hagelzüge dargestellt.

Beim Vergleich der Daten wurden nur die von Oker als potentielle oder sichere Superzellen klassifizierten Gewitter in den berechneten Hagelzügen gesucht. Alle anderen identifizierten Zellen wurden der Kategorie *keine Superzelle* zugewiesen.

Zur statistischen Prüfung der Kriterien mit dem Programm *StatView* wurde eine Datentabelle erstellt, welche für jede Gewitterzelle der sechs Tage die über die Lebensdauer gemittelten Werte der verschiedenen Kriterien enthält. Um die Variabilität bestimmter Parameter zu erfassen, wurden teilweise zusätzlich zu den Mittelwerten auch die Standardabweichungen über die gesamte Lebensdauer gesehen, verwendet. Der Variable *Superzelle* wurden die diskreten Werte 0 für die Kategorie *keine Superzelle*, 1 für eine *potentielle Superzelle* und 2 für die Kategorie *Superzelle* zugewiesen.

4.3.2 Deskriptive Analyse

Um einen Überblick über die Werte der verschiedenen Kriterien für die drei Klassen zu gewinnen, wurden zuerst verschiedene deskriptive Kennwerte berechnet. Dazu gehören die üblicherweise verwendeten Parameter einer Verteilung wie Mittelwert, Standardabweichung, Stichprobengrösse, Maximalwert, Minimalwert und Spannweite (SAS Institute, 1999). Durch Betrachtung dieser Werte für die einzelnen Kriterien gesamthaft und getrennt nach den drei Klassen kann man bereits eine erste Idee bekommen, welche Kriterien gut zwischen den Klassen diskriminieren. Um einen vertieften Einblick in die Verteilungen der verschiedenen Kriterien zu erhalten, wurde zusätzlich noch die Schiefe *Skewness* und *Kurtosis*, ein Parameter der die Breite der Verteilung beschreibt, berechnet (SAS Institute, 1999). Diese letzten beiden Parameter können bei der Diskussion, ob die Bedingungen für die verwendeten Statistiken erfüllt sind und bei der Diskussion der Resultate allgemein nützlich sein. Zur Veranschaulichung der Verteilungen der einzelnen Parameter wurden ausserdem Histogramme verwendet. In diesen Histogrammen ist zusätzlich eine Normalverteilung mit dem Mittelwert und der Standardabweichung der Ausgangsdaten eingezeichnet. Abbildung 4.6 zeigt beispielsweise die Gesamtverteilung des Hagelkriteriums

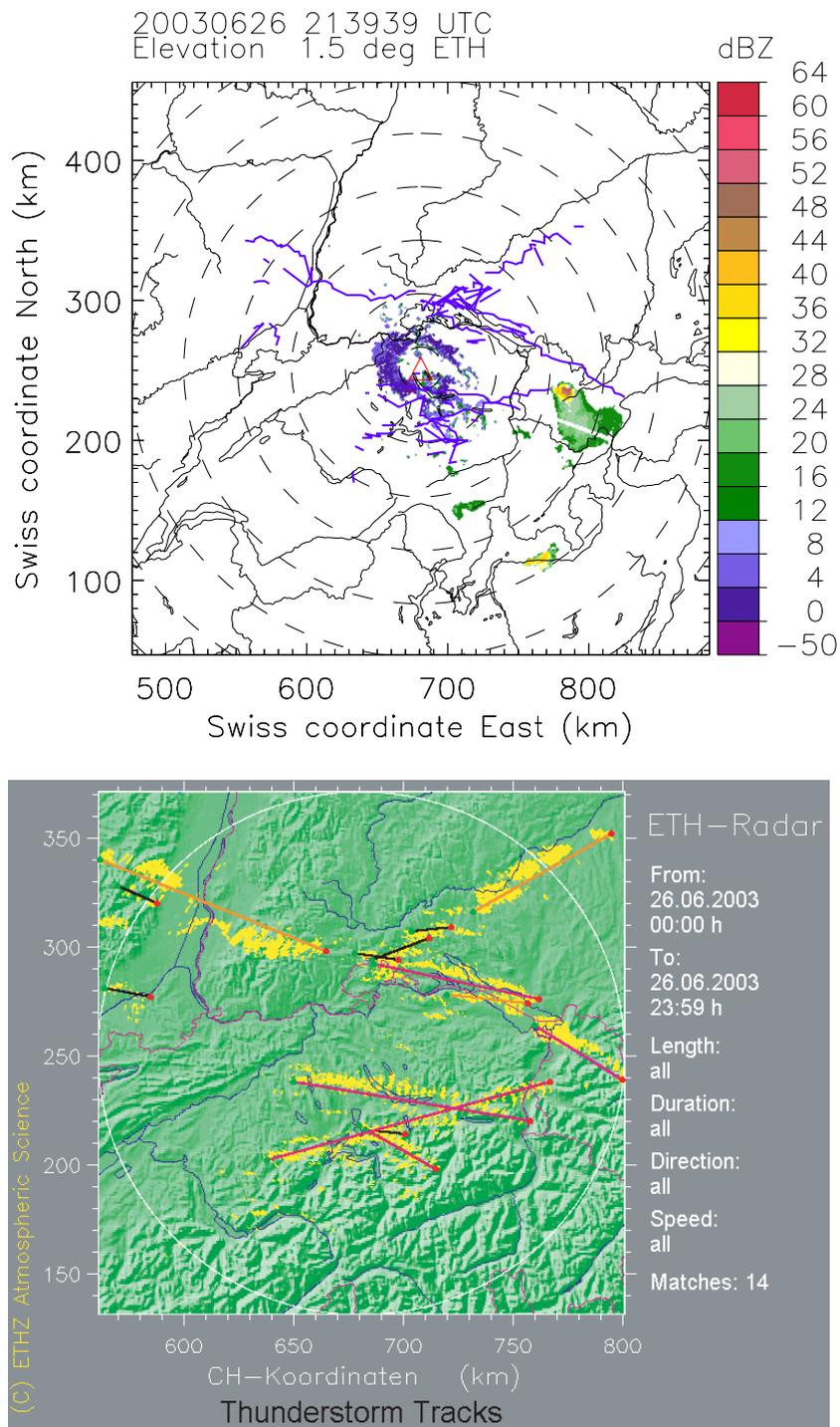


Abbildung 4.5: Gewitterzellen am 26.06.2003: In der oberen Abbildung sind die in dieser Arbeit berechneten Zugbahnen als blaue Linien dargestellt. Die untere Abbildung enthält die von Bernhard Oker klassifizierten Zellen. Die schwarzen Linien bezeichnen gewöhnliche Gewitter, die orangen Linien bezeichnen potentielle Superzellen und die rosa Linien sind Superzellen.

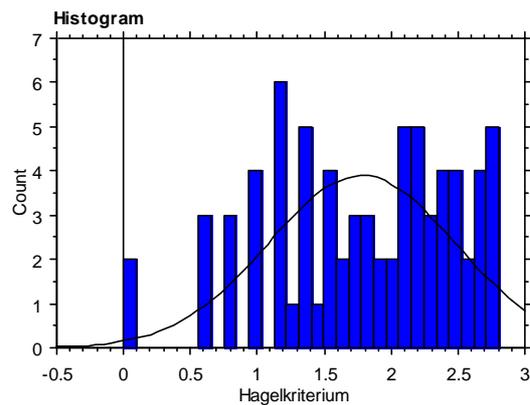


Abbildung 4.6: Verteilung des Hagelkriteriums und Normalverteilung mit dem Mittelwert und der Standardabweichung der Daten.

4.3.3 Test der einzelnen Kriterien

Ob sich die verschiedenen Kriterien für die drei Klassen *keine Superzelle*, *potentielle Superzelle* und *Superzelle* paarweise unterscheiden, wird mit einem zweiseitigen t-Test für unabhängige Stichproben untersucht. Die Resultate dieser Tests können dann dazu verwendet werden, um zu bestimmen, welche Kriterien in verschiedenen Regressionsanalysen weiterverwendet werden sollen. Ausserdem ist es durch Betrachtung der Ergebnisse der t-Tests möglich zu bestimmen, ob die Kategorie *potentielle Superzellen* bezüglich der untersuchten Kriterien näher bei den *Superzellen* oder bei der Klasse *keine Superzelle* liegt. Zur Illustration der Unterschiede zwischen den drei Klassen werden für alle Parameter Boxplots gezeichnet. Ein Beispiel ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

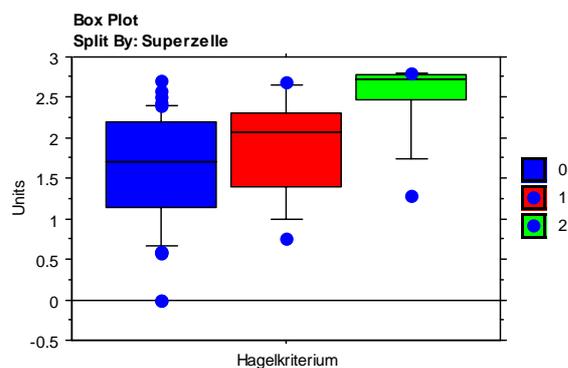


Abbildung 4.7: Boxplot für das Hagelkriterium: Die Klasse *keine Superzelle* ist in blau, die *potentiellen Superzellen* sind in rot und die *Superzellen* sind in grün dargestellt. Die blauen Punkte bezeichnen Ausreisser oberhalb der 90% beziehungsweise unterhalb der 10% Quantile (SAS Institute, 1999).

Die Boxplotdarstellungen tragen ebenfalls dazu bei, die Verteilungen der Parameter für die drei Klassen zu veranschaulichen.

4.3.4 Regressionsmodelle

Um weiter zu ergründen, welche Kriterien sich zur Einteilung von mit der hier verwendeten Methode identifizierten Gewitterzellen in die drei Klassen eignen, wurden drei verschiedene Arten von Regressionen mit vier verschiedenen Gruppen von unabhängigen Eingangsvariablen durchgeführt (siehe Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Definition der Regressionsverfahren und Inputvariablen der Regressionsmodelle

| Regressionsverfahren | Eingangsvariablen |
|-----------------------------------|---|
| Multiple Regression | Alle Kriterien |
| Schrittweise Regression Vorwärts | Alle Kriterien ohne Lebensdauer |
| Schrittweise Regression Rückwärts | Signifikante Kriterien |
| | Signifikante Kriterien ohne Lebensdauer |

Dabei sind mit *alle Variablen* die in Tabelle 4.1 aufgeführten Kriterien gemeint. *Signifikante Variablen* sind diejenigen, für welche laut t-Test signifikante Unterschiede zwischen den drei Klassen bestehen. Der Signifikanzbegriff wurde wie im Kapitel Resultate erläutert, nicht ganz streng auf ein bestimmtes Niveau fixiert. In allen Modellen wurde die Variable *Superzelle*, mit den Werten 0, 1 und 2 entsprechend den drei Klassen, als unabhängige Variable verwendet. Bei den Multiplen Regressionsmodellen wurden dann jeweils diejenigen Variablen als wichtig zur Erkennung von Superzellen betrachtet, welche, wie mittels t-Test bewiesen, eine signifikante ($\alpha = 5\%$) lineare Beziehung zur Klassierungsvariable *Superzelle* aufweisen. Mit den Schrittweisen Regressionsverfahren wurden die Eingangsvariablen auf die wichtigsten Kriterien reduziert. Die Schrittweise Regression Vorwärts fügt so lange Kriterien ins Modell ein, bis die Vorhersage der unabhängigen Größe durch zusätzliche unabhängige Variablen nicht mehr verbessert wird. Bei der Schrittweisen Regression Rückwärts werden Kriterien mit einem zu kleinen Beitrag zur Vorhersage aus dem Modell entfernt. Eine genauere Beschreibung der hier verwendeten Regressionsverfahren findet man beispielsweise im Handbuch zu *StatView* oder in verschiedenen Lehrbüchern zur multivariaten Statistik (SAS Institute, 1999)(Hartung and Elpelt, 1992).

4.3.5 Test der Regressionsmodelle mit Skill Scores

Für jede oben beschriebene Regression wird von *StatView* automatisch für jede der 73 Gewitterzellen aus den verwendeten Kriterien der Wert der Klassierungsvariable *Superzelle* vorhergesagt. Rundet man diesen Wert mathematisch auf die ganzen Zahlen 0, 1 und 2 bekommt man die mit dem verwendeten Regressionsmodell vorhergesagte Klassenzugehörigkeit der Zelle. Mit diesen vorhergesagten Werten und der von Oker durchgeführten Klassifizierung können dann sogenannte Skill Scores berechnet werden, um die verschiedenen Modelle zu testen. Eine gute Beschreibung der Parameter *Probability of Detection (POD)*, *False Alarm Rate (FAR)*, *Critical Success Index (CSI)*, *True Skill Statistic (TSS)* und *Heidke Skill Score (S)* findet man bei Huntrieser (Huntrieser, 1995).

Sollen mit den verschiedenen Regressionsmodellen neue Zellen klassifiziert werden, braucht man nur die Werte der Kriterien in die *StatView*-Datentabelle einzutragen. Die Klassierungsvariable *Superzelle* wird dann automatisch berechnet und kann gerundet werden um zu bestimmen, ob es sich um ein gewöhnliches Gewitter, eine potentielle Superzelle oder um eine

definitive Superzelle handelt. Mögliche praktische Anwendungen einer solchen Klassifizierung von Gewitterzellen werden im Ausblick dieser Arbeit weiter diskutiert.

Kapitel 5

Resultate

Mit dem hier verwendeten Algorithmus konnte für die sechs Fallstudientage der Grossteil der von Oker als *potentielle Superzellen* und *Superzellen* klassierten Gewitter identifiziert werden. Durch Vergleich der Hagelzüge, Koordinaten und Zeit der Aktivität wurden 10 von 13 *Superzellen* (76.9%) und 15 von 17 *potentiellen Superzellen* (88,2%) in den vom Tracking-Algorithmus erzeugten Daten wiedergefunden. Zusammen mit den 48 von Oker als *keine Superzelle* klassierten oder gar nicht erwähnten Gewittern, ergibt dies einen Datensatz von 73 Zellen. Genauere Begründungen und Erklärungen der nun folgenden Resultate der statistischen Analysen werden im Diskussionsteil dieser Arbeit gegeben.

5.1 Deskriptive Auswertung

Hier sollen nun die Resultate der deskriptiven statistischen Analyse dargestellt werden. Histogramme der Häufigkeitsverteilungen für alle Kriterien sind im Anhang dieser Arbeit enthalten.

5.1.1 Einfache Kriterien

In Abbildung 5.1 sind die mit *StatView* berechneten Kennwerte der einfacheren Kriterien *Hagelkriterium*, *maxRefl*, *Stat.Kriterium*, *lebensdauer*, *mittlereRefl*, *Refl.Std*, *40dBZ-Fläche* und *40dBZ-Fläche Std* dargestellt.

Beim *Hagelkriterium* unterscheiden sich die Mittelwerte der drei Klassen in der erwarteten Weise, indem die Superzellen den höchsten und die Kontrollgruppe den kleinsten Wert aufweisen. Die potentiellen Superzellen liegen dazwischen, sie sind aber der Kontrollgruppe ähnlicher als den Superzellen.

Die maximale während der gesamten Lebensdauer erreichte Reflektivität im Zentrum ist ebenfalls für die Superzellen am grössten und bei der Kontrollgruppe am niedrigsten. Wiederum liegen die potentiellen Superzellen für dieses Kriterium näher bei den Gewittern, welche keine Superzellen sind.

Das aus drei Bedingungen für die Reflektivität und die Lebensdauer zusammengesetzte Stationaritätskriterium zeigt die erwarteten Vorzeichen bei den Unterschieden zwischen den drei Klassen, indem die Superzellen den grössten Wert aufweisen. Die dazwischenliegenden potentiellen Superzellen können aber nicht mehr eindeutig einer der beiden anderen Gruppen zugewiesen werden.

Die Superzellen zeigen sich mit einem mittleren Wert von 25 (\simeq 2 Stunden) für die Lebensdauer deutlich am langlebigsten, was auch den Beobachtungen aus anderen in dieser Arbeit

Descriptive Statistics
Split By: Superzelle

| | Mean | Std. Dev. | Std. Error | Count | Minimum | Maximum | Range | Skew ness | Kurtosis |
|-------------------------|---------|-----------|------------|-------|---------|---------|---------|-----------|----------|
| Hagelkriterium, Total | 1.781 | 0.699 | 0.082 | 73 | 0.000 | 2.806 | 2.806 | -0.459 | -0.519 |
| Hagelkriterium, 0 | 1.604 | 0.674 | 0.097 | 48 | 0.000 | 2.706 | 2.706 | -0.449 | -0.469 |
| Hagelkriterium, 1 | 1.861 | 0.596 | 0.154 | 15 | 0.750 | 2.690 | 1.940 | -0.321 | -0.988 |
| Hagelkriterium, 2 | 2.508 | 0.471 | 0.149 | 10 | 1.286 | 2.806 | 1.520 | -1.963 | 2.675 |
| maxReflekt., Total | 57.915 | 2.580 | 0.302 | 73 | 53.780 | 66.670 | 12.890 | 0.713 | 0.587 |
| maxReflekt., 0 | 57.307 | 2.291 | 0.331 | 48 | 53.780 | 66.670 | 12.890 | 1.434 | 4.173 |
| maxReflekt., 1 | 58.148 | 2.933 | 0.757 | 15 | 53.940 | 62.500 | 8.560 | 0.171 | -1.223 |
| maxReflekt., 2 | 60.483 | 1.750 | 0.554 | 10 | 58.060 | 63.060 | 5.000 | 0.208 | -1.041 |
| Stat.Kriterium, Total | 1.303 | 0.395 | 0.046 | 73 | 0.333 | 2.000 | 1.667 | -0.285 | -0.770 |
| Stat.Kriterium, 0 | 1.216 | 0.377 | 0.054 | 48 | 0.600 | 2.000 | 1.400 | 0.093 | -0.847 |
| Stat.Kriterium, 1 | 1.400 | 0.394 | 0.102 | 15 | 0.333 | 2.000 | 1.667 | -1.118 | 1.735 |
| Stat.Kriterium, 2 | 1.576 | 0.357 | 0.113 | 10 | 0.818 | 1.813 | 0.995 | -1.482 | 0.397 |
| Lebensdauer, Total | 11.329 | 8.727 | 1.021 | 73 | 2.000 | 39.000 | 37.000 | 1.608 | 1.627 |
| Lebensdauer, 0 | 7.604 | 3.419 | 0.494 | 48 | 3.000 | 18.000 | 15.000 | 1.188 | 1.160 |
| Lebensdauer, 1 | 14.133 | 8.919 | 2.303 | 15 | 2.000 | 32.000 | 30.000 | 0.708 | -0.725 |
| Lebensdauer, 2 | 25.000 | 11.392 | 3.602 | 10 | 7.000 | 39.000 | 32.000 | -0.564 | -1.016 |
| mittlereRefI., Total | 55.438 | 1.624 | 0.190 | 73 | 52.925 | 59.600 | 6.675 | 0.734 | -0.109 |
| mittlereRefI., 0 | 54.903 | 1.246 | 0.180 | 48 | 52.925 | 59.000 | 6.075 | 0.909 | 1.178 |
| mittlereRefI., 1 | 55.904 | 2.003 | 0.517 | 15 | 53.500 | 59.600 | 6.100 | 0.660 | -0.754 |
| mittlereRefI., 2 | 57.305 | 1.000 | 0.316 | 10 | 55.710 | 59.110 | 3.400 | 0.038 | -0.578 |
| RefI.Std., Total | 1.915 | 1.137 | 0.133 | 73 | 0.270 | 6.840 | 6.570 | 2.301 | 7.073 |
| RefI.Std., 0 | 1.664 | 0.645 | 0.093 | 48 | 0.270 | 3.140 | 2.870 | 0.104 | -0.141 |
| RefI.Std., 1 | 2.043 | 1.635 | 0.422 | 15 | 0.690 | 6.840 | 6.150 | 1.995 | 3.210 |
| RefI.Std., 2 | 2.928 | 1.585 | 0.501 | 10 | 1.510 | 6.570 | 5.060 | 1.317 | 0.768 |
| 40dBZ Fläche , Total | 135.489 | 73.600 | 8.614 | 73 | 39.000 | 350.364 | 311.364 | 1.120 | 0.557 |
| 40dBZ Fläche , 0 | 127.096 | 65.761 | 9.492 | 48 | 39.000 | 303.000 | 264.000 | 0.846 | -0.231 |
| 40dBZ Fläche , 1 | 160.350 | 96.165 | 24.830 | 15 | 77.750 | 350.364 | 272.614 | 1.100 | -0.321 |
| 40dBZ Fläche , 2 | 138.482 | 70.367 | 22.252 | 10 | 60.909 | 274.281 | 213.372 | 0.801 | -0.516 |
| 40dBZ Fläche Std, Total | 55.530 | 41.040 | 4.803 | 73 | 3.962 | 183.753 | 179.791 | 1.146 | 0.470 |
| 40dBZ Fläche Std, 0 | 49.691 | 37.898 | 5.470 | 48 | 3.962 | 152.363 | 148.401 | 1.149 | 0.247 |
| 40dBZ Fläche Std, 1 | 65.701 | 44.533 | 11.498 | 15 | 16.388 | 154.197 | 137.809 | 0.691 | -0.802 |
| 40dBZ Fläche Std, 2 | 68.302 | 48.509 | 15.340 | 10 | 26.203 | 183.753 | 157.550 | 1.462 | 1.173 |

Abbildung 5.1: Deskriptive Statistik der einfacheren Kriterien: Die Klasse *keine Superzelle* ist mit 0 kodiert, die *potentiellen Superzellen* sind mit 1 bezeichnet und die *Superzellen* sind in der Gruppe 2 enthalten. Für alle Kriterien wurden die Parameter Mittelwert, Standardabweichung, Standardfehler, Stichprobengrösse, Maximum und Minimum, Spannweite, Schiefe der Verteilung und Kurtosis, ein Parameter für die Breite der Verteilung, berechnet.

erwähnten Studien entspricht. Dieses Kriterium weist insbesondere für die potentiellen Superzellen und die Superzellen eine grosse Spannweite von 30 beziehungsweise 32 mal 5 min auf.

Die über die gesamte Lebensdauer gemittelte maximale Reflektivität verhält sich ähnlich wie das Kriterium maximale Reflektivität. Wie erwartet weisen auch hier die Superzellen den höchsten Wert auf. Die potentiellen Superzellen liegen etwas näher bei der Kontrollgruppe. Die Reflektivität schwankt bei den Superzellen über die gesamte Lebensdauer gesehen am stärksten, wie die Standardabweichung der Reflektivität zeigt. Die potentiellen Superzellen würden nach diesem Kriterium wiederum eher der Kontrollgruppe zugeordnet.

Die Fläche der 40 dBZ -Kontur hängt nicht linear von der Gruppierungsvariablen ab. Bei den potentiellen Superzellen ist sie deutlich grösser als bei den beiden anderen Gruppen.

Die Standardabweichung der 40 dBZ -Fläche ist ähnlich wie die der Reflektivität für die Superzellen am grössten. Die potentiellen Superzellen weisen für dieses Kriterium einen beinahe gleich grossen Wert auf.

5.1.2 Windkriterien

In diesem Abschnitt sollen nun die deskriptiven Resultate der verschiedenen Windkriterien dargestellt werden. Die berechneten statistischen Parameter sind in Abbildung 5.2 aufgeführt.

Descriptive Statistics

Split By: Superzelle

| | Mean | Std. Dev. | Std. Error | Count | Minimum | Maximum | Range | Skew ness | Kurtosis |
|---------------------|--------|-----------|------------|-------|---------|---------|--------|-----------|----------|
| SMx, Total | 6.656 | 6.907 | 0.808 | 73 | -17.500 | 18.330 | 35.830 | -0.797 | 0.872 |
| SMx, 0 | 4.995 | 7.483 | 1.080 | 48 | -17.500 | 18.330 | 35.830 | -0.444 | 0.384 |
| SMx, 1 | 8.985 | 4.869 | 1.257 | 15 | -2.080 | 15.250 | 17.330 | -0.690 | -0.123 |
| SMx, 2 | 11.136 | 2.514 | 0.795 | 10 | 7.780 | 16.340 | 8.560 | 0.820 | 0.007 |
| SMy, Total | 0.390 | 6.109 | 0.715 | 73 | -16.000 | 14.440 | 30.440 | -0.230 | -0.035 |
| SMy, 0 | -0.749 | 6.478 | 0.935 | 48 | -16.000 | 12.500 | 28.500 | -0.142 | -0.393 |
| SMy, 1 | 2.837 | 3.819 | 0.986 | 15 | -3.650 | 8.890 | 12.540 | -0.151 | -0.916 |
| SMy, 2 | 2.191 | 6.018 | 1.903 | 10 | -4.980 | 14.440 | 19.420 | 0.771 | -0.267 |
| SM, Total | 15.311 | 8.284 | 0.970 | 73 | -2.370 | 53.740 | 56.110 | 1.580 | 5.148 |
| SM, 0 | 14.823 | 9.575 | 1.382 | 48 | -2.370 | 53.740 | 56.110 | 1.609 | 4.173 |
| SM, 1 | 15.652 | 5.844 | 1.509 | 15 | 9.190 | 30.520 | 21.330 | 1.321 | 1.017 |
| SM, 2 | 17.140 | 3.453 | 1.092 | 10 | 12.850 | 23.440 | 10.590 | 0.418 | -0.905 |
| Abw eichung, Total | 16.290 | 14.602 | 1.709 | 73 | -26.140 | 49.790 | 75.930 | -0.158 | 0.434 |
| Abw eichung, 0 | 15.341 | 17.079 | 2.465 | 48 | -26.140 | 49.790 | 75.930 | -0.005 | -0.266 |
| Abw eichung, 1 | 18.100 | 7.423 | 1.917 | 15 | 7.560 | 34.480 | 26.920 | 0.473 | -0.340 |
| Abw eichung, 2 | 18.128 | 9.090 | 2.874 | 10 | -1.750 | 31.010 | 32.760 | -0.932 | 0.453 |
| SR/SL, Total | 0.053 | 0.488 | 0.057 | 73 | -1.000 | 1.000 | 2.000 | 0.095 | -0.257 |
| SR/SL, 0 | 0.031 | 0.527 | 0.076 | 48 | -1.000 | 1.000 | 2.000 | 0.317 | -0.395 |
| SR/SL, 1 | 0.055 | 0.404 | 0.104 | 15 | -1.000 | 0.692 | 1.692 | -0.958 | 1.324 |
| SR/SL, 2 | 0.154 | 0.439 | 0.139 | 10 | -0.556 | 0.667 | 1.223 | -0.301 | -1.349 |
| SL/SR.Betrag, Total | 0.381 | 0.307 | 0.036 | 73 | 0.000 | 1.000 | 1.000 | 0.781 | -0.417 |
| SL/SR.Betrag, 0 | 0.403 | 0.335 | 0.048 | 48 | 0.000 | 1.000 | 1.000 | 0.662 | -0.810 |
| SL/SR.Betrag, 1 | 0.294 | 0.271 | 0.070 | 15 | 0.000 | 1.000 | 1.000 | 1.317 | 1.140 |
| SL/SR.Betrag, 2 | 0.405 | 0.190 | 0.060 | 10 | 0.143 | 0.667 | 0.524 | 0.051 | -1.344 |

Abbildung 5.2: Deskriptive Statistik der Windkriterien: Die Klasse *keine Superzelle* ist mit 0 kodiert, die *potentiellen Superzellen* sind mit 1 bezeichnet und die *Superzellen* sind in der Gruppe 2 enthalten. Für alle Kriterien wurden die Parameter Mittelwert, Standardabweichung, Standardfehler, Stichprobengrösse, Maximum und Minimum, Spannweite, Schiefe der Verteilung und Kurtosis, ein Parameter für die Breite der Verteilung, berechnet.

Betrachtet man die Ost-West Komponente SM_x der Sturmbewegung, bewegen sich die Stürme aller drei Klassen von Westen nach Osten. Die Superzellen ziehen dabei am schnellsten, während die Kontrollgruppe den kleinsten Wert in dieser Bewegungskomponente aufweist. Die dazwischenliegenden potentiellen Superzellen müssten nach diesem Kriterium eher den Superzellen zugeordnet werden.

Für die Nord-Süd Komponente SM_y ist keine lineare Beziehung zur Gruppierungsvariablen ersichtlich. Die Gewitter der Kontrollgruppe bewegen sich im Mittel etwas nach Süden, die potentiellen Superzellen ziehen am schnellsten und die Superzellen etwas langsamer nach Norden.

Betrachtet man den Betrag SM des Sturmbewegungsvektors, weisen die Superzellen die grösste Geschwindigkeit auf, die Gewitter der Kontrollgruppe bewegen sich am langsamsten und die potentiellen Superzellen liegen dazwischen. Allerdings sind die Unterschiede zwischen den

Gruppen nicht gross.

Wie das Kriterium *Abweichung* (berechnet als Winkel zwischen dem nächstgelegenen COTREC-Wind und der Sturmbewegung) zeigt, weichen die Superzellen und potentiellen Superzellen etwa um 3° stärker vom mittleren Wind ab als die Gewitter der Kontrollgruppe. Die Abweichung der potentiellen Superzellen ist derjenigen der Superzellen sehr ähnlich.

Das Kriterium *SL/SR*, welches die Richtung der Abweichung vom mittleren Wind bezeichnet, hat bei allen Klassen ein positives Vorzeichen. Die Superzellen weichen dabei etwas stärker nach rechts ab als die beiden anderen Gruppen. Die potentiellen Superzellen liegen hier näher bei der Kontrollgruppe.

Der Betrag des Kriteriums *SL/SR* weist keine lineare Beziehung zur Gruppierungsvariablen auf. Für die potentiellen Superzellen ist dieser Wert am kleinsten, für die Kontrollgruppe und die Superzellen etwa doppelt so gross.

Betrachtet man allgemein die verschiedenen Indikatoren für die Breite der Verteilungen wie Standardabweichung und Spannweite so ist zu beobachten, dass diese Kriterien für alle Klassen einen grossen Wertebereich umfassen.

5.1.3 Ellipsenkriterien

In diesem Abschnitt sollen die deskriptiven Resultate der verschiedenen Kriterien, welche mit der an die Form der Zellen angepassten Gaussellipsen zusammenhängen, dargestellt werden. Abbildung 5.3 enthält die statistischen Parameter.

Die Neigung der Ellipse (Winkel zwischen grosser Halbachse und X-Achse) zeigt keinen linearen Zusammenhang mit der Gruppierungsvariablen. Die Ellipsen der Potentiellen Superzellen sind um etwa 12° geneigt, während die Ellipsen der beiden anderen Klassen mit einer Abweichung von nur etwa 2.5° beinahe Ost-West orientiert sind.

Betrachtet man die Standardabweichung des Neigungskriteriums ist zu sehen, dass die Orientierung der Ellipse bei den potentiellen Superzellen und den Superzellen erheblich stärker variiert als bei der Kontrollgruppe.

Korrigiert man den Neigungswinkel wie im Kapitel 4.2 beschrieben, sind die Ellipsen der Kontrollgruppe in etwa West-Ost orientiert, die potentiellen Superzellen weichen etwa 6° positiv und die Superzellen etwa 7° negativ von der Ost-West Orientierung ab.

Die Standardabweichung der korrigierten Orientierungswinkel ist etwas kleiner als im unkorrigierten Fall. Die potentiellen Superzellen und die Superzellen haben aber immer noch grössere Werte für dieses Kriterium.

Das Kriterium Asymmetrie liegt wie theoretisch erwartet etwas näher bei 0 in der Klasse *Superzellen*; der Unterschied ist aber gering. Der Wert der potentiellen Superzellen liegt dabei etwas näher beim Wert der Kontrollgruppe.

Das Reflektivitätsmaximum befindet sich bei den Superzellen wie erwartet im Hinteren Teil der Ellipse. Die potentiellen Superzellen weisen einen ähnlichen Wert für dieses Kriterium auf; sie sind also eher der Klasse der Superzellen zuzuordnen.

Betrachtet man den Betrag der Abweichung des Reflektivitätsmaximums in Längsrichtung der Ellipse, zeigt die Kontrollgruppe einen grösseren Wert als die beiden anderen Klassen.

Für alle drei Klassen liegt das Reflektivitätsmaximum etwas rechts von der Längsachse der Ellipse. Der Zusammenhang mit der Gruppierungsvariable ist aber nicht linear, indem die Reflektivitätsmaxima der potentiellen Superzellen stärker von der Längsachse abweichen als diejenigen der beiden anderen Klassen.

Betragsmässig weichen die Maxima der Superzellen am wenigsten und die Kontrollgruppe am stärksten von der Längsachse der Ellipse ab. Die potentiellen Superzellen liegen dazwischen.

Descriptive Statistics
Split By: Superzelle

| | Mean | Std. Dev. | Std. Error | Count | Minimum | Maximum | Range | Skewness | Kurtosis |
|-------------------------|--------|-----------|------------|-------|---------|---------|---------|----------|----------|
| Neigung, Total | 4.495 | 34.544 | 4.043 | 73 | -82.530 | 81.140 | 163.670 | -0.269 | 0.113 |
| Neigung, 0 | 2.562 | 36.701 | 5.297 | 48 | -82.530 | 81.140 | 163.670 | -0.176 | -0.096 |
| Neigung, 1 | 11.915 | 31.887 | 8.233 | 15 | -40.250 | 62.020 | 102.270 | 0.191 | -1.165 |
| Neigung, 2 | 2.641 | 28.553 | 9.029 | 10 | -72.440 | 31.020 | 103.460 | -1.949 | 3.075 |
| Neigung.Std, Total | 56.901 | 29.613 | 3.466 | 73 | 1.470 | 107.780 | 106.310 | -0.335 | -1.070 |
| Neigung.Std, 0 | 52.029 | 29.699 | 4.267 | 48 | 1.470 | 97.270 | 95.800 | -0.310 | -1.294 |
| Neigung.Std, 1 | 65.140 | 28.540 | 7.369 | 15 | 21.940 | 104.300 | 82.360 | -0.127 | -1.458 |
| Neigung.Std, 2 | 67.926 | 27.705 | 8.761 | 10 | 9.780 | 107.780 | 98.000 | -0.694 | 0.069 |
| Neigung.korr, Total | 1.124 | 33.603 | 3.933 | 73 | -82.520 | 78.230 | 160.750 | -0.116 | 0.289 |
| Neigung.korr, 0 | 1.320 | 33.114 | 4.780 | 48 | -82.520 | 76.900 | 159.420 | -0.327 | 0.612 |
| Neigung.korr, 1 | 6.046 | 37.698 | 9.734 | 15 | -40.240 | 78.230 | 118.470 | 0.517 | -0.990 |
| Neigung.korr, 2 | -7.201 | 31.283 | 9.893 | 10 | -72.440 | 28.490 | 100.930 | -0.907 | 0.010 |
| Neigung.korr.Std, Total | 42.120 | 32.130 | 3.760 | 73 | 1.470 | 114.220 | 112.750 | 0.829 | -0.576 |
| Neigung.korr.Std, 0 | 35.569 | 30.385 | 4.386 | 48 | 1.470 | 114.220 | 112.750 | 1.184 | 0.331 |
| Neigung.korr.Std, 1 | 55.102 | 35.218 | 9.093 | 15 | 18.000 | 112.050 | 94.050 | 0.526 | -1.357 |
| Neigung.korr.Std, 2 | 54.094 | 28.958 | 9.157 | 10 | 9.780 | 89.510 | 79.730 | -0.093 | -1.398 |
| Asymmetrie, Total | 0.499 | 0.120 | 0.014 | 73 | 0.270 | 0.740 | 0.470 | -0.045 | -0.953 |
| Asymmetrie, 0 | 0.502 | 0.132 | 0.019 | 48 | 0.270 | 0.740 | 0.470 | -0.045 | -1.161 |
| Asymmetrie, 1 | 0.501 | 0.111 | 0.029 | 15 | 0.290 | 0.660 | 0.370 | -0.347 | -0.990 |
| Asymmetrie, 2 | 0.481 | 0.073 | 0.023 | 10 | 0.340 | 0.610 | 0.270 | -0.111 | 0.138 |
| MaxY.Betrag, Total | 1.371 | 1.733 | 0.203 | 73 | 0.010 | 8.840 | 8.830 | 2.657 | 7.143 |
| MaxY.Betrag, 0 | 1.613 | 1.895 | 0.274 | 48 | 0.070 | 8.840 | 8.770 | 2.347 | 5.359 |
| MaxY.Betrag, 1 | 1.167 | 1.598 | 0.412 | 15 | 0.010 | 6.580 | 6.570 | 2.782 | 7.148 |
| MaxY.Betrag, 2 | 0.512 | 0.321 | 0.102 | 10 | 0.090 | 1.000 | 0.910 | 0.151 | -1.363 |
| MaxY, Total | -0.229 | 2.203 | 0.258 | 73 | -6.580 | 8.840 | 15.420 | 1.132 | 6.139 |
| MaxY, 0 | -0.055 | 2.499 | 0.361 | 48 | -5.560 | 8.840 | 14.400 | 1.342 | 4.197 |
| MaxY, 1 | -0.845 | 1.802 | 0.465 | 15 | -6.580 | 0.900 | 7.480 | -2.221 | 5.010 |
| MaxY, 2 | -0.144 | 0.610 | 0.193 | 10 | -1.000 | 0.850 | 1.850 | 0.133 | -1.116 |
| MaxX.Betrag, Total | 2.199 | 1.772 | 0.207 | 73 | 0.000 | 9.770 | 9.770 | 1.493 | 3.213 |
| MaxX.Betrag, 0 | 2.333 | 1.928 | 0.278 | 48 | 0.000 | 9.770 | 9.770 | 1.520 | 2.994 |
| MaxX.Betrag, 1 | 1.986 | 1.708 | 0.441 | 15 | 0.010 | 5.480 | 5.470 | 0.680 | -0.606 |
| MaxX.Betrag, 2 | 1.875 | 0.943 | 0.298 | 10 | 0.760 | 3.730 | 2.970 | 0.842 | -0.522 |
| MaxX, Total | -1.434 | 2.440 | 0.286 | 73 | -6.480 | 9.770 | 16.250 | 1.570 | 5.575 |
| MaxX, 0 | -1.290 | 2.752 | 0.397 | 48 | -6.480 | 9.770 | 16.250 | 1.613 | 4.591 |
| MaxX, 1 | -1.763 | 1.953 | 0.504 | 15 | -5.480 | 1.670 | 7.150 | -0.326 | -0.587 |
| MaxX, 2 | -1.633 | 1.354 | 0.428 | 10 | -3.730 | 1.210 | 4.940 | 0.516 | 0.303 |

Abbildung 5.3: Deskriptive Statistik der Ellipsenkriterien: Die Klasse *keine Superzelle* ist mit 0 kodiert, die *potentiellen Superzellen* sind mit 1 bezeichnet und die *Superzellen* sind in der Gruppe 2 enthalten. Für alle Kriterien wurden die Parameter Mittelwert, Standardabweichung, Standardfehler, Stichprobengröße, Maximum und Minimum, Spannweite, Schiefe der Verteilung und Kurtosis, ein Parameter für die Breite der Verteilung, berechnet.

5.2 Test der Kriterien

Um herauszufinden, für welche Kriterien die schon in der deskriptiven Analyse festgestellten Unterschiede zwischen den Gruppen auch statistisch signifikant sind, werden t-Tests für unabhängige Stichproben berechnet. Die Resultate dieser Tests können auch mit Boxplots, von denen in diesem Abschnitt ein paar gezeigt werden sollen, veranschaulicht werden. Die vollständigen Resultate der t-Tests sowie alle Boxplots sind im Anhang vorhanden.

5.2.1 Einfache Kriterien

Wie Abbildung 5.4 zeigt, unterscheiden die einfacheren Kriterien mit Ausnahme der 40 dBZ-Fläche recht gut zwischen den drei Klassen.

Für die 40 dBZ-Fläche erweist sich nur der Unterschied zwischen den potentiellen Superzellen

| Daten | 40dBZ Fläche | 40dBZ Fläche Std | Hagelkriterium | maxReflekt. | Stat.Kriterium | Lebensdauer | mittlereRefl | Refl.Std |
|------------------------|--------------|------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|--------------|----------|
| 6Tage, 3Klassen | | | | | | | | |
| 0-1 | | | | | | | | |
| Mittelwertdifferenz | -33.254 | -16.01 | -0.257 | -0.841 | -0.185 | 0.529 | -2.402 | -0.375 |
| p-Wert | 0.1331 | 0.1758 | 0.1913 | 0.2519 | 0.1062 | 0.0001 | 0.0233 | 0.1902 |
| 0-2 | | | | | | | | |
| Mittelwertdifferenz | -11.386 | -18.611 | -0.904 | -3.176 | -0.36 | 17.396 | -1.401 | -1.264 |
| p-Wert | 0.6244 | 0.1839 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0076 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| 1-2 | | | | | | | | |
| Mittelwertdifferenz | -21.869 | -2.601 | -0.647 | -2.335 | -0.175 | 10.867 | -0.357 | -0.885 |
| p-Wert | 0.5441 | 0.8914 | 0.0085 | 0.034 | 0.2699 | 0.0136 | 0.0531 | 0.1926 |

Abbildung 5.4: t-Tests der einfachen Kriterien: Für alle Kriterien werden in der darunterstehenden Spalte die Klassen 0 (keine Superzellen), 1 (potentielle Superzellen) und 2 (Superzellen) paarweise verglichen. p-Werte < 0.05 sind rot hervorgehoben; p-Werte zwischen 0.05 und 0.20 sind blau markiert. Ein negatives Vorzeichen bei der Mittelwertsdifferenz bedeutet beispielsweise beim Vergleich 0-2 dass das Kriterium der Klasse 2 den grösseren Mittelwert aufweist. Die Interpretation des Vorzeichens bei den zwei anderen Vergleichen ist analog. Die grün markierten Kriterien werden in den Regressionsmodellen als Inputvariablen weiterverwendet.

und den Superzellen mit einem p-Wert von 0.1331 als beinahe signifikant. Man sieht ausserdem, dass die potentiellen Superzellen aufgrund dieses Kriteriums eher der Klasse Superzellen zugeordnet werden können. Dieses Kriterium wird deshalb in den Regressionsmodellen nicht weiterverwendet.

Bei der Standardabweichung der 40 dBZ- Fläche sind die Unterschiede zwischen den potentiellen Superzellen und der Kontrollgruppe sowie zwischen den Superzellen und der Kontrollgruppe beinahe signifikant. Die Kontrollgruppe lässt sich mit diesem Kriterium gut von den anderen beiden Klassen trennen.

Das Hagelkriterium trennt sehr gut zwischen den drei Klassen. Die potentiellen Superzellen unterscheiden sich nicht signifikant von der Kontrollgruppe und würden nach diesem Kriterium nicht als Superzellen klassifiziert.

Mit der maximalen Reflektivität lassen sich die Superzellen ebenfalls deutlich von den anderen Klassen unterscheiden. Die potentiellen Superzellen und die Kontrollgruppe sind sich hingegen sehr ähnlich.

Betrachtet man das Stationaritätskriterium, lassen sich die Superzellen gut von der Kontrollgruppe unterscheiden. Bezüglich dieses Kriteriums sind die potentiellen Superzellen den Superzellen ähnlicher als der Kontrollgruppe.

Die Lebensdauer ist wie schon in der deskriptiven Analyse festgestellt wurde, sehr gut zur Trennung der drei Klassen geeignet. Die Superzellen haben eine um etwa 90 min grössere Lebensdauer als die Kontrollgruppe und unterscheiden sich mit einer um etwa 50 min längeren Lebensdauer auch deutlich von den potentiellen Superzellen.

Die mittlere Reflektivität ist wie die Lebensdauer sehr gut zur Einteilung der Gewitter in die drei Klassen geeignet.

Die Standardabweichung der mittleren Reflektivität zeigt signifikante Unterschiede zwischen den Superzellen und den beiden anderen Klassen. Die potentiellen Superzellen liegen näher bei der Kontrollgruppe.

5.2.2 Windkriterien

In Abbildung 5.5 sind die Resultate der t-Tests für die verschiedenen Windkriterien zusammengefasst.

| Daten | SMx | SMy | SM | Abweichung | SR/SL | SL/SR.Betrag |
|------------------------|--------|--------|--------|------------|--------|--------------|
| 6Tage, 3Klassen | | | | | | |
| 0-1 | | | | | | |
| Mittelwertdifferenz | -3.99 | -3.586 | -0.829 | -2.759 | -0.024 | 0.109 |
| p-Wert | 0.0576 | 0.0468 | 0.7528 | 0.5472 | 0.8738 | 0.2575 |
| 0-2 | | | | | | |
| Mittelwertdifferenz | -6.141 | -2.94 | -0.317 | -2.787 | -0.123 | -0.002 |
| p-Wert | 0.0136 | 0.1921 | 0.4561 | 0.6197 | 0.4939 | 0.8921 |
| 1-2 | | | | | | |
| Mittelwertdifferenz | -2.151 | 0.646 | -1.488 | -0.028 | -0.009 | -0.111 |
| p-Wert | 0.2129 | 0.7448 | 0.4773 | 0.9933 | 0.5661 | 0.2728 |

Abbildung 5.5: t-Tests der Windkriterien: Für alle Kriterien werden in der darunterstehenden Spalte die Klassen 0 (keine Superzellen), 1 (potentielle Superzellen) und 2 (Superzellen) paarweise verglichen. p-Werte < 0.05 sind rot hervorgehoben; p-Werte zwischen 0.05 und 0.20 sind blau markiert. Ein negatives Vorzeichen bei der Mittelwertsdifferenz bedeutet beispielsweise beim Vergleich 0-2, dass das Kriterium der Klasse 2 den grösseren Mittelwert aufweist. Die Interpretation des Vorzeichens bei den zwei anderen Vergleichen ist analog. Die grün markierten Kriterien werden in den Regressionsmodellen als Inputvariablen weiterverwendet.

Betrachtet man die Ost-West Komponente der Sturmbewegung, ziehen die potentiellen Superzellen und die Superzellen schneller nach Osten als die Gewitter der Kontrollgruppe. Die Klasse der potentiellen Superzellen unterscheidet sich dabei nicht signifikant von den Superzellen.

Mit der Nord-Süd Komponente der Sturmbewegung sieht man, dass sich die potentiellen Superzellen und die Superzellen deutlich von der Kontrollgruppe unterscheiden, sich aber untereinander sehr ähnlich sind (Vergleich 1-2 nicht signifikant).

Die anderen vier Windkriterien zeigen keine grossen Unterschiede zwischen den drei Klassen. Die theoretisch erwarteten Zusammenhänge sind zwar wie in der deskriptiven Analyse festgestellt vorhanden, aber nicht signifikant. In die Regressionsanalysen gehen deshalb auch nur die beiden Komponenten der Sturmbewegung als unabhängige Variablen ein. Gründe für das Versagen dieser theoretisch gut begründeten Kriterien werden in der Diskussion erläutert.

5.2.3 Ellipsenkriterien

Die Resultate des Tests der Ellipsenparameter sind in Abbildung 5.6 gezeigt.

Für die beiden Kriterien $MaxX$ und $MaxX.Betrag$ konnten keine nennenswerten Unterschiede zwischen den drei Klassen gefunden werden. In der deskriptiven Analyse konnte zwar für die potentiellen Superzellen und die Superzellen eine leichte Verschiebung des Maximums in den hinteren Teil der Ellipse beobachtet werden; diese Beziehungen sind aber nicht signifikant.

Betrachtet man die Kriterien $MaxY$ und $MaxY.Betrag$ so ist der Unterschied zwischen den Superzellen und der Kontrollgruppe mit einem p-Wert von 0.0741 knapp nicht signifikant. Das Maximum liegt bei den Superzellen näher bei der Längsachse der Ellipse als bei den anderen beiden Klassen.

Die Orientierung (Winkel zwischen grosser Halbachse und X-Achse) der angepassten Ellipse

| Daten | MaxX | MaxX.Betrag | MaxY | MaxY.Betrag | Neigung | Neigung.Std | Neigung.korr | Neigung.korr.Std | Asymmetrie |
|------------------------|--------|-------------|--------|-------------|---------|-------------|--------------|------------------|------------|
| 6Tage, 3Klassen | | | | | | | | | |
| 0-1 | | | | | | | | | |
| Mittelwertdifferenz | 0.473 | 0.346 | 0.79 | 0.446 | -9.352 | -13.111 | -4.724 | -19.533 | 0.001 |
| p-Wert | 0.539 | 0.5355 | 0.2617 | 0.4134 | 0.3787 | 0.1373 | 0.6423 | 0.046 | 0.9789 |
| 0-2 | | | | | | | | | |
| Mittelwertdifferenz | 0.343 | 0.458 | 0.089 | 1.101 | -0.079 | -15.897 | 8.521 | -18.525 | 0.021 |
| p-Wert | 0.7034 | 0.4692 | 0.9114 | 0.0741 | 0.9949 | 0.1253 | 0.4583 | 0.0827 | 0.6351 |
| 1-2 | | | | | | | | | |
| Mittelwertdifferenz | -0.13 | 0.111 | -0.701 | 0.655 | 9.274 | -2.786 | 13.247 | 1.008 | 0.02 |
| p-Wert | 0.8563 | 0.8537 | 0.2508 | 0.2163 | 0.4658 | 0.811 | 0.3697 | 0.9408 | 0.6259 |

Abbildung 5.6: t-Tests der Ellipsenkriterien: Für alle Kriterien werden in der darunterstehenden Spalte die Klassen 0 (keine Superzellen), 1 (potentielle Superzellen) und 2 (Superzellen) paarweise verglichen. p-Werte < 0.05 sind rot hervorgehoben; p-Werte zwischen 0.05 und 0.20 sind blau markiert. Ein negatives Vorzeichen bei der Mittelwertsdifferenz bedeutet beispielsweise beim Vergleich 0-2 dass das Kriterium der Klasse 2 den grösseren Mittelwert aufweist. Die Interpretation des Vorzeichens bei den zwei anderen Vergleichen ist analog. Die grün markierten Kriterien werden in den Regressionsmodellen als Inputvariablen weiterverwendet.

zeigt weder für den ursprünglichen noch für den korrigierten Parameter signifikante Unterschiede zwischen den Klassen. Einzig die Standardabweichungen der beiden Winkel sind grösser für die Superzellen und potentiellen Superzellen als bei der Kontrollgruppe.

Beim Asymmetriekriterium, welches die Abweichung der angepassten Ellipse vom Kreis beschreibt, zeigen sich die theoretisch erwarteten und in der deskriptiven Analyse auch festgestellten Beziehungen nicht signifikant. Auf die Ursachen und die Bedeutung dieser Resultate für die Ellipsenkriterien soll in der Diskussion eingegangen werden.

5.2.4 Boxplots und Klassifizierung der potentiellen Superzellen

Nun sollen die Resultate der oben durchgeführten Tests für die fünf Kriterien *Hagelkriterium*, *maxReflekt*, *Lebensdauer*, *SMx* und *MaxY.Betrag* mit Boxplots veranschaulicht werden (siehe Abbildung 5.7).

Abschliessend soll auf das schon bei der deskriptiven Analyse mittels Vergleich der Mittelwerte und bei den t-Tests unter Betrachtung der p-Werte angesprochene Problem der Klassifikation der potentiellen Superzellen nochmals eingegangen werden. Tabelle 5.1 enthält für jedes Kriterium die Klasse, welche den potentiellen Superzellen durch Betrachtung der Gruppenmittelwerte und der p-Werte beim paarweisen Vergleich mittels t-Test zugewiesen würde.

Von den insgesamt 23 untersuchten Kriterien weisen 9 eher auf eine Klassierung der potentiellen Superzellen als Superzellen hin, die Werte von 10 Kriterien liegen näher bei der Kontrollgruppe und für 4 Kriterien war keine Klassierung möglich. Dieses Resultat soll in der Diskussion weiter interpretiert werden.

5.3 Regressionsmodelle

Bei den t-Tests haben sich die folgenden 12 Kriterien als signifikant zur Trennung der drei Klassen herausgestellt (grün markiert in Abbildung 5.4-5.6): *40dBZ-Fläche Std*, *SMx*, *SMy*,

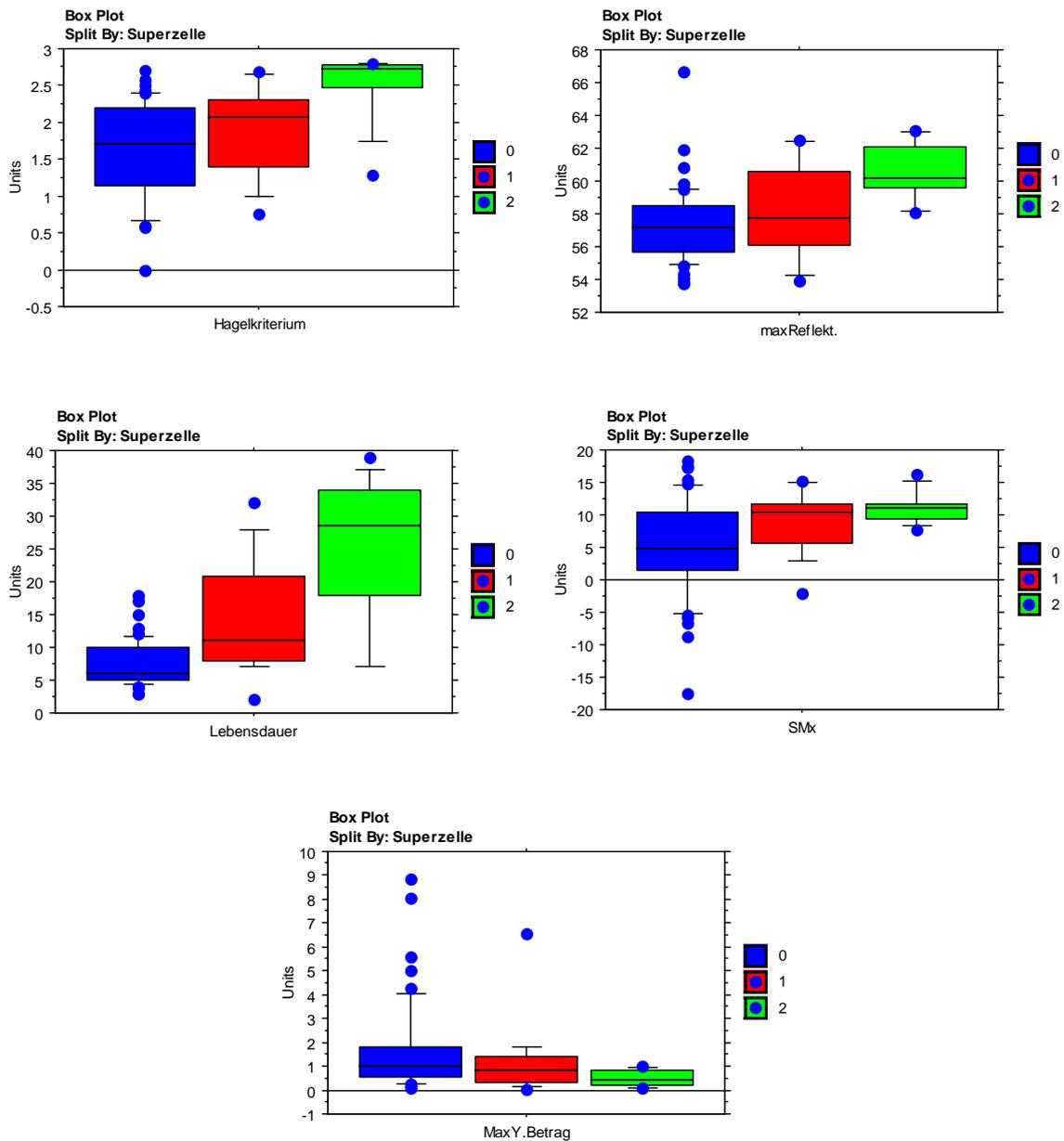


Abbildung 5.7: Boxplots für die Kriterien *Hagelkriterium*, *maxReflekt*, *Lebensdauer*, *SMx* und *MaxY.Betrag*: Die Klasse *keine Superzelle* ist in blau, die *potentiellen Superzellen* sind in rot und die *Superzellen* sind in grün dargestellt. Die blauen Punkte bezeichnen Ausreisser oberhalb der 90% beziehungsweise unterhalb der 10% Quantile (SAS Institute, 1999).

Hagelkriterium, *maxReflekt.*, *Stat.Kriterium*, *Lebensdauer*, *mittlereRefl*, *Refl.Std*, *MaxY.Betrag*, *Neigung.Std* und *Neigung.korr.Std*. Die *Abweichung* wurde zur Gruppe der signifikanten Parameter hinzugenommen, da dieses Kriterium theoretisch gut begründet ist (siehe Kapitel 4.2). Als unabhängige Inputvariablen für die Regressionsanalysen wurden nun einerseits die signifikanten Parameter, die signifikanten Parameter ohne Lebensdauer sowie andererseits al-

Tabelle 5.1: Klassifizierung der *potentiellen Superzellen* in die Gruppe 0 (*keine Superzelle*) oder 2 (*Superzellen*) aufgrund der Ergebnisse der deskriptiven Analyse und der t-Tests. Ein Strich (-) bedeutet, dass keine Klassierung möglich ist.

| Kriterien | Klasse |
|---------------------------|--------|
| 40 <i>dBZ</i> -Fläche | - |
| 40 <i>dBZ</i> -Fläche Std | 2 |
| SMx | 2 |
| SMy | 2 |
| SM | 0 |
| Abweichung | 2 |
| SLSR | 0 |
| SLSR Betrag | - |
| Hagelkriterium | 0 |
| Stat.Kriterium | 2 |
| maxReflekt | 0 |
| Lebensdauer | - |
| mittlere Reflektivität | 0 |
| Refl.Std | 0 |
| MaxX | 2 |
| MaxY | - |
| MaxX.Betrag | 2 |
| MaxY.Betrag | 0 |
| Neigung | 0 |
| Neigung.Std | 2 |
| Neigung.korr | 0 |
| Neigung.korr.Std | 2 |
| Asymmetrie | 0 |

le 23 Kriterien und alle Kriterien ohne Lebensdauer verwendet. Eine Zusammenfassung der Resultate für die Anwendung von drei verschiedenen Regressionsverfahren auf die vier Gruppen von Inputvariablen ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

Die vollständigen Resultate dieser Regressionen sowie Korrelationsanalysen, um Abhängigkeiten unter den erklärenden Variablen aufzudecken, sind im Anhang dieser Arbeit enthalten.

Bei der Betrachtung der Resultate der Regressionsanalysen stellt man fest, dass die Lebensdauer in allen Modellen, bei denen sie als Eingangsvariable verwendet wurde, enthalten ist. Lässt man die Lebensdauer weg, taucht dafür die Sturmbewegung in Nord-Süd Richtung (*SMy*) in den Modellen auf. Bei den Modellen mit nicht nur den signifikanten Parametern als Inputvariablen kommt ausserdem die 40 *dBZ*-Fläche auf, obwohl sie laut t-Test nicht signifikant ist. Viele Modelle enthalten auch die Schwankung in der Orientierung der angepassten Ellipse (*Neigung korr Std*).

Die fünf an häufigsten vorkommenden Kriterien sind somit die Lebensdauer, *SMy*, die 40 *dBZ*-Fläche, die mittlere Reflektivität und die Standardabweichung der korrigierten Orientierung der Ellipse.

Die mit den verschiedenen Modellen erklärte Varianz weist Werte zwischen $R^2 = 0.311$ und $R^2 = 0.643$ für die Multiple Regression mit allen Parametern auf. Verwendet man adjus-

| | 6 Tage, 3Gruppen alle Parameter | 6 Tage, 3Gruppen alle Parameter ohne Lebensdauer | 6 Tage, 3Gruppen sign Parameter | 6 Tage, 3Gruppen sign Parameter ohne Lebensdauer |
|--|--|---|---|---|
| Multiple Regression Variablen | Lebensdauer 40dBZ Fläche Smy (SM) (Neigung korr Std) | 40dBZ Fläche 40dBZ Fläche Std (SM) SM (max Refl) (maxY) (MaxY Betrag) (Neigung Korr Std) | Lebensdauer (40dBZ Fläche Std) (SM) | (mittlere Refl) |
| R2 | 0.643 | 0.497 | 0.553 | 0.363 |
| ad R2 | 0.475 | 0.276 | 0.455 | 0.236 |
| Stepwise forward Variablen | Lebensdauer 40dBZ Fläche Smy | mittlere Refl Neigung korr Std | Smy Lebensdauer | mittlere Refl Neigung korr Std |
| R2 | 0.543 | 0.311 | 0.507 | 0.311 |
| ad R2 | 0.523 | 0.291 | 0.493 | 0.291 |
| Stepwise backward Variablen | Lebensdauer 40dBZ Fläche Smy | 40dBZ Fläche 40dBZ Fläche Std mittlere Refl Neigung korr Std | Smy Lebensdauer | mittlere Refl Neigung korr Std |
| R2 | 0.543 | 0.359 | 0.507 | 0.311 |
| ad R2 | 0.523 | 0.321 | 0.493 | 0.291 |

Abbildung 5.8: Resultate der Regressionsanalysen: Für die vier verschiedenen Gruppen von erklärenden Variablen (in schwarz in der Kopfzeile beschrieben) sind in der darunterstehenden Spalte die zusammengefassten Ergebnisse von drei verschiedenen Regressionsmethoden (rot in der ersten Spalte) dargestellt. Für jede Kombination von erklärenden Variablen und Regressionsmethode sind die signifikanten (Multiple Regression) beziehungsweise die ins Regressionsmodell eingefügten Variablen sowie die Parameter R^2 und adjusted R^2 aufgeführt.

ted R^2 und bezieht so die unterschiedliche Anzahl der Variablen mit ein, erhält man Werte zwischen 0.236 (Multiple Regressionen mit den signifikanten Parametern ohne Lebensdauer) und 0.523 (Schrittweise Regression mit allen Variablen). Die Schrittweisen Regressionen mit allen Parametern erzielen also die grösste aufgeklärte Varianz und eignen sich unter diesem Gesichtspunkt am besten für die Vorhersage des Wertes der Klassierungsvariablen *Superzelle* anhand der Werte der verschiedenen Kriterien.

Im nächsten Abschnitt sollen nun die Regressionsmodelle auch noch anhand von verschiedenen Skill Scores getestet werden (Huntrieser, 1995).

5.4 Skill Scores

In diesem Abschnitt sollen nun für die vier Regressionsmodelle mit dem kleinsten und grössten R^2 sowie dem kleinsten und grössten adjusted R^2 fünf verschiedene Skill Scores berechnet werden. Damit kann man testen, wie gut sich verschiedene Gruppen von Kriterien zur Klassierung von Gewitterzellen eignen.

Da im Falle dieser Arbeit drei Klassen von Gewitterzellen vorliegen, wurden zur Berechnung der Elemente der Kontingenzmatrix nach Huntrieser folgende Definitionen verwendet (Huntrieser, 1995):

- Die vom jeweiligen Modell vorhergesagten auf ganze Zahlen gerundeten Werte werden mit der Klassierungsvariable *Superzelle* verglichen.

- Die Klasse der *potentiellen Superzellen* und der *Superzellen* definieren zusammengenommen das vorherzusagende Ereignis.
- Als Fehlalarm werden alle Fälle, bei denen die Stärke der Gewitterzelle vom Modell überschätzt wird bezeichnet (2 anstatt 1, 1 anstatt 0).
- Als verpasste Ereignisse werden alle Fälle, bei denen die Stärke der Gewitter unterschätzt wird bezeichnet (0 anstatt 1, 1 anstatt 2).
- Die Fälle, bei denen eine potentielle Superzelle oder eine Superzelle richtig klassiert wurde, gelten als richtige Beobachtungen des Ereignisses (*Superzelle* oder *potentielle Superzelle*).
- Die richtige Klassierung der Gruppe *keine Superzelle* gilt als richtige Information bei der nicht Beobachtung des Ereignisses (*Superzelle* oder *potentielle Superzelle*).

Die mit diesen Definitionen erhaltenen Werte der Kontingenztabellelemente für die Multiple Regression mit allen Variablen (grösstes R^2), für die Schrittweise Regression vorwärts mit allen Parametern ausser der Lebensdauer (kleinstes R^2), die schrittweise Regression vorwärts mit allen Variablen (grösstes adjusted R^2) und die Multiple Regression mit den signifikantesten Variablen ohne Lebensdauer (kleinstes adjusted R^2) sind in Abbildung 5.9 als Histogramme dargestellt.

Tabelle 5.2 enthält die Werte POD (Probability of Detection), FAR (False Alarm Ratio), CSI (Critical Success Index), TSS (True Skill Statistics) und S (Heidke Skill Score) für die in Abbildung 5.9 gezeigten Modelle.

Tabelle 5.2: Skill Scores für vier Regressionsmodelle

| Modell | POD | FAR | CSI | TSS | S |
|--|------|------|------|------|------|
| Multiple Reg. alle Parameter | 0.56 | 0.26 | 0.47 | 0.46 | 0.08 |
| Multiple Reg. sign. Parameter ohne L. | 0.47 | 0.68 | 0.24 | 0.33 | 0.11 |
| Schrittweise Reg. vorwärts alle Parameter | 0.64 | 0.2 | 0.55 | 0.56 | 0.58 |
| Schrittweise Reg. vorwärts alle Parameter ohne L. | 0.38 | 0.58 | 0.25 | 0.08 | 0.11 |

Nach den von Huntrieser beschriebenen Werten für eine völlig richtige beziehungsweise völlig falsche Vorhersage der einzelnen Skill Scores, erzielt man mit der Schrittweisen Regression Vorwärts unter Verwendung aller Kriterien die besten Resultate (Huntrieser, 1995). In dieses Modell wurden die Variablen *Lebensdauer*, *40 dBZ-Fläche*, *SM_y* zur Erklärung der Klassierungsvariablen *Superzelle* eingefügt (siehe auch Abbildung 5.8).

Die Regressionsgleichung lautet:

$$\text{Superzelle} = 0.033 - 0.002 \cdot 40 \text{ dBZFlaeche} + 0.024 \cdot \text{SM}_y + 0.063 \cdot \text{Lebensdauer} \quad (5.1)$$

Auf die Bedeutung dieser mit den Skill Scores erhaltenen Resultate wird im Diskussionsteil dieser Arbeit genauer eingegangen.

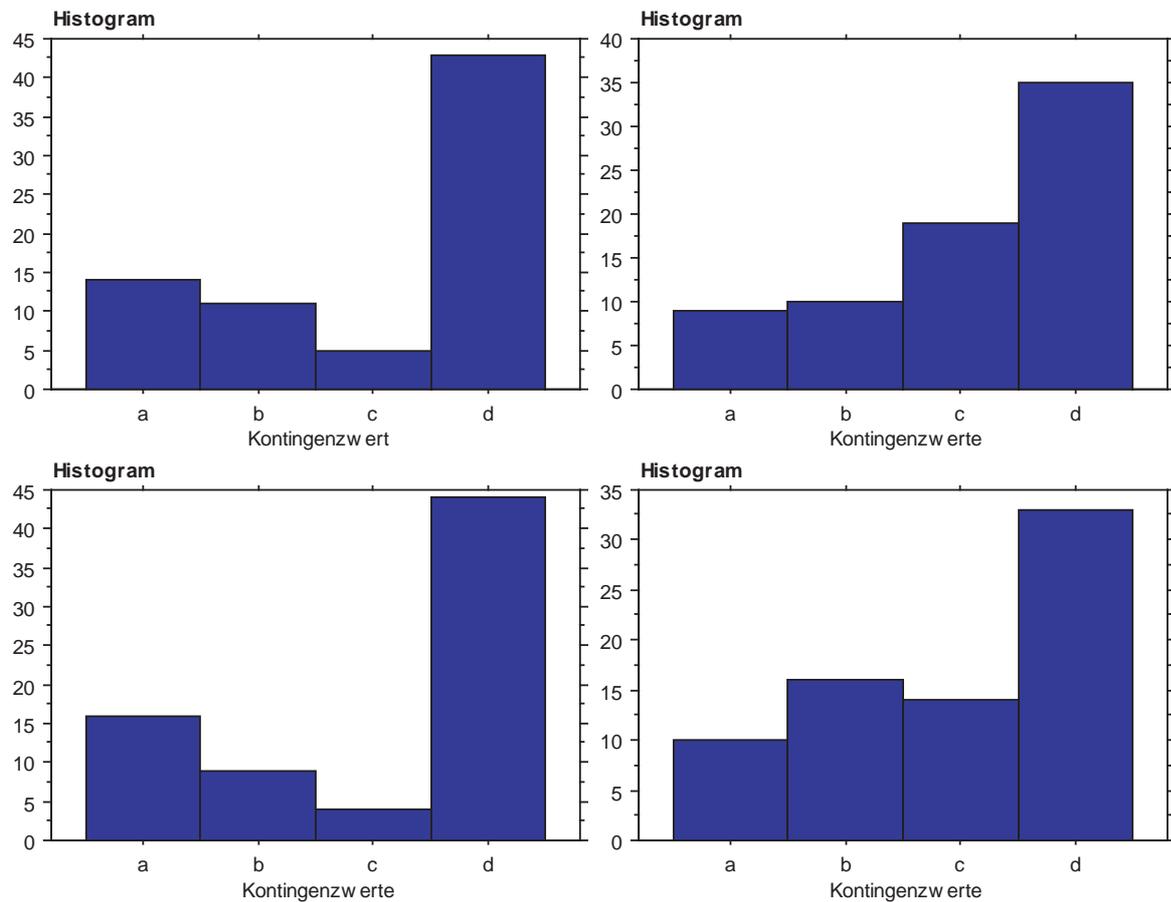


Abbildung 5.9: Elemente der Kontingenzzmatrix für die vier Modelle Multiple Regression mit allen Variablen (oben links), Schrittweise Regression Vorwärts mit allen Variablen ausser Lebensdauer (oben rechts), Schrittweise Regression Vorwärts mit allen Variablen (unten links) und Multiple Regression mit den signifikanten Variablen ohne Lebensdauer (unten rechts). *a* bezeichnet die richtig vorhergesagten Superzellen oder potentiellen Superzellen, *b* enthält die verpassten Superzellen oder potentiellen Superzellen, *c* bezeichnet die Falschalarne und *d* die nicht vorhergesagten aber beobachteten potentiellen Superzellen oder Superzellen.

Kapitel 6

Diskussion

In diesem Kapitel sollen die vorliegenden Resultate interpretiert und diskutiert werden. Falls nicht anders bezeichnet, sind alle Zeitangaben in Lokalzeit angegeben. Im ersten Teil wird für die sechs Fallstudientage die synoptische Wetterlage überblicksmässig dargestellt. Dazu werden Isobarenkarten auf Bodenniveau und auf dem 500 hPa -Niveau des deutschen Wetterdienstes sowie Temperaturkarten auf dem 850 hPa -Niveau der deutschen Wetterzentrale betrachtet. Die Wind-, Stabilitäts-, und Feuchteverhältnisse in der Schweiz werden mit den Auswertungen der Payerne-Sondierungen weiter untersucht (Oker, 2004b).

Im zweiten Teil sollen mögliche physikalische und methodische Begründungen dafür gegeben werden, weshalb sich einige der getesteten Kriterien zur Identifizierung von Superzellen eignen und andere weniger gut funktionieren.

6.1 Synoptische Situation

Anhand der erwähnten Wetter- und Temperaturkarten soll für alle sechs Tage diskutiert werden, welche der in Abbildung 3.9 beschriebenen Elemente einer Starkgewitterlage vorhanden sind. Diese Bedingungen sollten für die Superzellentage besser erfüllt sein als bei den Vergleichstagen.

Bei der Betrachtung der Payerne-Sondierungen sollten ebenfalls Unterschiede zwischen den Superzellentagen und den Vergleichstagen sichtbar sein. Es soll vor allem auf folgende Merkmale geachtet werden:

- Eigenschaften des Windprofils wie Zunahme der Windstärke mit der Höhe, Drehung der Windscherung
- vorhandene Jetströmungen, Typ des Windprofils (Huntrieser, 1995)
- vorhandene Labilitätsenergie CAPE ($> 1500\text{ Jkg}^{-1}$?)(Moller et al., 1994)
- konvektive Hemmung CINH ($< 50\text{ Jkg}^{-1}$?) (Bunkers, 2002)
- Storm Relative Helicity SRH als Mass für die Geschwindigkeits- und Richtungsänderung des Windes in den untersten 3000 m ($|SRH| > 100\text{ m}^2\text{s}^{-2}$?) (Moller et al., 1994)
- Stabilitätsmass Bulk Richardson Number BRN ($40 > BRN > 10$?) (Moller et al., 1994)

- Lifted Index LI, Unterschied zwischen der Temperatur eines aufsteigenden Luftpaketes und der Umgebungstemperatur auf 500 hPa ($< -5^\circ\text{C}$?)
- CS-Index, ein speziell für die Schweiz angepasster Parameter, der sich aus der CAPE und der Windscherung zusammensetzt ($> 2700 \text{ Jkg}^{-1}\text{m}^2\text{s}^{-2}$?) (Huntrieser, 1995)
- SWISS00 beziehungsweise SWISS12: zwei zusammengesetzte und ebenfalls speziell für die Schweiz angepasste Parameter zur allgemeinen Vorhersage von Gewittern (SWISS00 < 5.1 ?, SWISS12 < 0.6 ?) (Huntrieser, 1995)

6.1.1 Superzellentage

23/24 Juni 2002

Um die vorherrschende Wetterlage für diesen Superzellenfall zu studieren, wurden Karten vom 22/23/24.06.2002 verwendet. Die Gewitter traten zwischen 22:00 am 23.06.2002 und 05:00 am 24.06.2002 auf. Deshalb sind in Abbildung 6.1 die Karten des 24.06.2002 um 00:00 UTC als repräsentatives Beispiel dargestellt.

Die Karten der 400 hPa beziehungsweise 500 hPa Höhe zeigen, wie sich ein Höhentrog westlich von England in den drei Tagen nach Osten verschiebt. Die starke Strömung um diesen Höhentrog dreht dabei etwas von West nach Südwest. Im Verlaufe dieser drei Tage entwickelt sich über Spanien ein neuer Tiefdrucktrog, dort wo die starke Höhenströmung eine Ausbuchtung nach Süden aufweist.

Auf der Bodenwetterkarte beobachtet man ebenfalls das nach Osten wandernde Tiefdruckgebiet vor England. Zwei seiner aufeinanderfolgenden Fronten vereinigen sich zu einer einzigen langen Kaltfront, welche nördlich der Schweiz liegen bleibt. Vor der Kaltfront beobachtet man Temperaturen deutlich über 20° , hinter der Front werden Temperaturen unter 20° gemessen. Der Durchzug dieser Front in der Nacht auf den 24.06.2002 löst dann die heftigen Gewitter aus. Die Bodenkarte zeigt, dass auf der langen Kaltfront nicht nur über Spanien, sondern auch an der Grenze Schweiz-Italien ein neues kleines Tiefdruckgebiet entstand. Dies könnte die Gewitteraktivität noch zusätzlich verstärkt haben.

Die Karten der Temperatur auf 850 hPa unterstützen die oben erwähnten Beobachtungen. Dort wo die starke Südwestströmung vorherrscht, ist ein starker Temperaturgradient vorhanden, der ebenfalls zuerst nördlich der Schweiz hängen bleibt. Die Entwicklung der neuen Tiefdruckgebiete macht sich durch eine grössere Ausbuchtung der kalten Luftmassen nach Süden über Spanien und einem schwach angedeuteten Knick der Isothermen an der Grenze zwischen Italien und der Schweiz bemerkbar.

Da die Gewitter in diesem Fall in der Nacht auf den 24.06.2002 mit der erwähnten Kaltfront über die Schweiz hinwegzogen, werden in Abbildung 6.2 die Payerne-Sondierung und der dazugehörige Hodograph vom 24.06.2002 00:00 UTC gezeigt.

Die grüne Kurve in der Sondierung zeigt eine Zunahme der Windgeschwindigkeit vom Boden bis auf 700 hPa auf etwa 32 knt , darüber nimmt die Windgeschwindigkeit etwas langsamer zu und erreicht auf 500 hPa einen Wert von etwa 43 knt . Dies deutet auf einen bei Starkgewitterlagen in der Schweiz oft beobachteten Jet auf 700 hPa hin (Huntrieser, 1995).

Die berechneten Sondierungsparameter CAPE (1551.18 Jkg^{-1}), SRH ($124.75 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, grüne Fläche im Hodograph), BRN (13.37), LI (-5.2°C), CS ($23627.39 \text{ Jkg}^{-1}\text{m}^2\text{s}^{-2}$) und SWISS00 (2.48) liegen alle im für das Auftreten von Superzellen günstigen Bereich. Nur die konvektive Hemmung CINH, welche zur Auslösung der Gewitter überwunden werden muss, ist mit einem Wert von 91.88 Jkg^{-1} etwas grösser als der Grenzwert von 50 Jkg^{-1} .

Zusammenfassend kann man feststellen, dass an diesem Tag die synoptischen Bedingungen für die Entwicklung von heftigen Gewittern sehr günstig waren.

26. Juni 2003

An diesem Tag wurden in der Schweiz zwischen 14:30 und 22:30 heftige Gewitter und auch einige Superzellen beobachtet. In Abbildung 6.3 ist die Synoptische Wetterlage anhand von Karten vom 26.06.2003 dargestellt. Zur Interpretation wurden auch die Karten vom Vortag betrachtet; diese werden aber hier nicht gezeigt.

Die Karte der 400 *hPa* Fläche zeigt, dass sich im Atlantik vor Island ein grosses Tiefdruckgebiet befindet. Vor Frankreich und über der Ostsee sieht zwei kleinere Tiefdruckgebiete. Diese Druckverteilung führt zu einer starken Nord-West Strömung über Mitteleuropa. Auf der 500 *hPa* Höhe beobachtet man eine ähnliche Druckverteilung, die Winde kommen in Südeuropa aber eher aus einer südwestlichen Richtung von Spanien.

Am Boden sind die drei erwähnten Tiefdruckgebiete ebenfalls zu beobachten. Die Warmfront des Frankreichtiefs hängt mit der Kaltfront des Tiefs über der Ostsee zusammen. Vor dieser eigentlichen Front hat sich über Frankreich eine Konvergenzlinie gebildet. Bis zum 26.06.2003 verschiebt sich das Tief vor Frankreich etwas nach Norden.

Betrachtet man die Temperatur auf 850 *hPa*, erkennt man starke Temperaturgradienten an den Fronten des nun knapp südlich von England liegenden Tiefdruckgebietes. Die Warmfront dieses Tiefs liegt um 00:00 UTC knapp nördlich von der Schweiz, die Kaltfront zieht sich quer über Frankreich und Spanien hin. An der Front nördlich der Schweiz fällt die Temperatur auf 850 *hPa* von 20 °C auf 10 °C.

Der Durchzug dieser Front von Norden nach Süden über die Schweiz löst die beobachteten Gewitter aus.

In Abbildung 6.4 sind die Payerne-Sondierung und der Hodograph vom 26.06.2003 um 12:00 UTC dargestellt.

Das Profil der Windgeschwindigkeit zeigt ein schwaches Maximum von 15 *knt* auf einer Höhe von etwa 800 *hPa*. In den untersten 1000 *m* dreht die Windrichtung antizyklonal von Süd nach Süd-Ost. Darüber ändert die Windrichtung auf West und nimmt bis zum Erreichen des Maximums zu. Über diesem Maximum drehen die Winde von Süd-West wieder auf West.

Die Sondierungsparameter erreichen in diesem Fall für die Auslösung von starken Gewittern weniger typische Werte. Es ist nur wenig Labilitätsenergie vorhanden (179 Jkg^{-1}) und die konvektive Hemmung ist recht gross (132.64 Jkg^{-1}). Die SRH ist wegen der antizyklonalen Drehung in den untersten 1000 *m* mit einem Wert von 3.91 m^2s^{-2} sehr klein. Auch die BRN liegt ausserhalb des für Superzellen geeigneten Bereiches (5.73). Der LI (-1.24 °C) und auch der extra für die Schweiz angepasste CS-Index (1416 $Jkg^{-1}m^2s^{-2}$) weisen nicht auf besonders heftige Gewitter hin. Einzig der SWISS12 Index liegt mit einem Wert vom -4,86 im für verbreitete Gewitter geeigneten Bereich.

Die synoptische Wetterlage und die Sondierungsparameter sind hier also etwas weniger typisch für eine Starkgewittersituation als im vorher betrachteten Fall.

6.1.2 Vergleichstage

Hier soll die synoptische Situation während den vier Vergleichstagen betrachtet werden. Diese wurden so ausgewählt, dass die verhagelte Fläche etwa 1000 km^2 beträgt, (siehe Kapitel 4).

21 Juni 2002

In Abbildung 6.5 ist die synoptische Situation für den 21.06.2002 um 00:00 UTC dargestellt. Zwischen 14:30 und 20:30 werden an diesem Tag einige Gewitter, aber keine Superzellen beobachtet.

Die 400 *hPa* und 500 *hPa* Karten zeigen ein grosses Tiefdrucksystem über dem Atlantik vor England. Ein Hochdruckgebiet erstreckt sich von Südosteuropa bis weit nach Russland. Zwischen diesen Drucksystemen beobachtet man eine starke Südwestströmung über West- und Mitteleuropa.

Das Atlantiktief ist in den Bodenwetterkarten ebenfalls zu beobachten. Nördlich von Finnland liegt ein Tiefdruckgebiet, dessen sehr lange Kaltfront sich quer über ganz Europa erstreckt. Auf dieser langen Front entwickelt sich unter anderem über der Ostsee ein neues Tiefdruckgebiet. Noch vor dessen Kaltfront bildet sich über Deutschland eine Konvergenzlinie mit Nord-Südlichem Verlauf. Die lange Front bleibt im Nordwesten der Schweiz liegen. Bereits vor ihrem Durchzug in der Nacht auf den 24.06.2002 werden am 21.06.2002 einige Gewitter ausgelöst.

In der Karte mit der Temperatur auf einer Höhe von 850 *hPa* zeigt sich der Verlauf der langen Front durch einen scharfen, in derselben Richtung verlaufenden Temperaturgradienten.

Abbildung 6.6 zeigt die Auswertung der Mittagssondierung (12 UTC) von Payerne vom 21.06.2002.

Die grüne Linie in Abbildung 6.6 oben zeigt eine Windzunahme vom Boden bis etwa 800 *hPa* auf etwa 27 *knt*. Unterhalb von 1000 *m* kommt der Wind aus Westen, darüber aus Südwesten. In der untersten Schicht ist die Drehung der Windscherung leicht antizyklonal.

Mit einer CAPE von 1003.01 Jkg^{-1} ist recht viel Labilitätsenergie vorhanden, die Konvektive Hemmung beträgt 70,96 Jkg^{-1} . Die SRH liegt mit einem Wert von 84.60 m^2s^{-2} etwas unter dem weiter oben definierten Grenzwert und der LI ($-2.54^\circ C$) weist auf die Entwicklung von nicht besonders heftigen Gewittern hin. Die BRN (17.45) sowie der CS-Index (10752,85 $Jkg^{-1}m^2s^{-2}$) und der SWISS12-Index (-11,20) zeigen aber, dass auch heftige Gewitter auftreten könnten.

Dass trotz den recht günstigen Bedingungen keine Superzellen beobachtet wurden könnte daran liegen, dass solange die lange Kaltfront nordwestlich der Schweiz liegen blieb, die notwendige Hebung fehlte.

31. Mai 2003

Die am 31.05.2003 vorherrschende Wetterlage wird in Abbildung 6.7 illustriert.

Auf den Karten des 400 *hPa* und 500 *hPa* Niveaus sieht man nordwestlich von den Britischen Inseln ein grosses Tiefdrucksystem. Über ganz Europa herrscht eine flache Hochdruckverteilung mit nur schwachen Winden. Der Polarfrontjet mit etwas stärkerer Strömung liegt weit im Norden. Die 500 *hPa*-Karte zeigt ausserdem die Entwicklung eines kleinen Tiefs über Spanien.

Bei der Betrachtung der Bodenkarten werden die flache Druckverteilung und die schwachen Winde über Europa bestätigt. Man sieht nordöstlich vor England und westlich vor Skandinavien zwei grosse Tiefdrucksysteme. Eine lange Front, welche zu einem weit im Nordosten liegenden Tief gehört erstreckt sich von Russland bis nach Deutschland.

In der Temperaturkarte des 850 *hPa*-Niveaus sieht man aber, dass diese sich auflösende Front nicht besonders stark ist. Ihr Temperaturgradient ist nur schwach ausgeprägt.

Die Auswertung der Payerne-Sondierung vom Mittag des 31.05.2003 ist in Abbildung 6.8

dargestellt.

In der untersten 3000 m sind wie bereits in den synoptischen Karten gesehen, die Winde nur schwach, sie erreichen eine Stärke von höchstens 10 *knt*. In den untersten 2000 m dreht der Wind von Ost auf West (antizyklonal), darüber herrscht eine Nordwestströmung.

Mit einer CAPE von 752,31 Jkg^{-1} und einer konvektiven Hemmung von nur 58,15 Jkg^{-1} ist ein gewisses Gewitterpotential vorhanden. Die Winde und die Windscherung sind aber zu schwach für heftige Gewitter (SRH: $2.75 m^2 s^{-2}$, BRN: 108.33). Die Parameter LI, CS-Index, SWISS12 zeigen ebenfalls Werte, die eine Entwicklung von Gewittern begünstigen (LI: $-2.51 ^\circ C$, CS: $2803.67 Jkg^{-1} m^2 s^{-2}$, SWISS12: -4.18).

Aus der Diskussion der synoptischen Wetterlage und der Auswertung der Mittagssondierung von Payerne kann man schliessen, dass für diesen Tag hauptsächlich Wärmegewitter zu erwarten waren.

22. Juli 2003

Die synoptische Wetterlage an diesem Tag ist in den Karten von Abbildung 6.9 dargestellt. Die Karten der 400 *hPa*- und 500 *hPa*-Höhe zeigen ein grosses Tiefdrucksystem vor den Britischen Inseln. Um dieses Tiefdruckgebiet herum sieht man eine starke Südwestströmung über Frankreich und Spanien. Östlich von Frankreich herrscht eine flache Hochdrucklage mit nur schwachen Winden.

Die Isobarenkarte zeigt eine sehr lange, okkludierte Front des Tiefdruckgebietes vor den Britischen Inseln. Sie verläuft von Norden nach Süden bis nach Spanien. Über dem Mittelmeer westlich von Süditalien hat sich ein kleines Hitzetief gebildet. Vor der eigentlichen Front ist bereits eine Konvergenzlinie zu sehen.

Die Karte der Temperatur auf 850 *hPa* zeigt, dass an der langen Front in dieser Höhe grosse Temperaturgradienten vorhanden sind. Eine Warmluftzunge erstreckt sich vor der Front bis weit nach Norden über Mitteleuropa hinweg.

Der Durchzug der langen und sehr starken Front am Abend löste die beobachteten Gewitter aus.

In Abbildung 6.10 ist die Auswertung der Mittagssondierung (12 UTC) von Payerne gezeigt. Die in den synoptischen Karten beobachtete Südwestströmung wird in der Sondierung von Payerne mit Ausnahmen in den untersten 1000 m (Nordwest- und Nordostwind) bestätigt. Die Windgeschwindigkeit erreicht knapp unter 700 *hPa* ein Maximum von etwa 32 *knt*, was auf einen Low-level Jet vor der Front hinweist.

Die CAPE von 400,15 Jkg^{-1} und der LI ($-1.36 ^\circ C$) zeigen, dass nicht besonders viel Labilitätsenergie vorhanden ist. Um Konvektion auszulösen muss zuerst die konvektive Hemmung von 96,53 Jkg^{-1} überwunden werden. Die BRN hat einen Wert von 4.65. Die beiden speziell für die Schweiz angepassten Parameter weisen beide auf die verbreitete Entwicklung von Gewittern hin (CS: $6250.26 Jkg^{-1} m^2 s^{-2}$, SWISS12: -10.28). Mit einer SRH von $139,66 m^2 s^{-2}$ in den untersten 3000 m ist genügend Windscherung für die Entstehung von Superzellen vorhanden.

Insgesamt deuten die synoptischen Beobachtungen und die Auswertung der Payerne Sondierung darauf hin, dass lokal ein paar sehr heftige Gewitter entstehen könnten. Diese wurden ab 14:30 auch beobachtet.

12. August 2004

Abbildung 6.11 zeigt einen Überblick der Wetterlage am 12.08.2004. Die Karte der Temperatur auf 850 *hPa* ist nicht verfügbar.

In der Höhe von 400 hPa zeigt sich ein ausgedehntes Tiefdrucksystem vor den Britischen Inseln, welches nach Südosten wandert. Es löst über Spanien eine starke westliche Strömung aus, welche über Frankreich eine südliche Richtung hat. Über Südosteuropa beobachtet man eine starke südöstliche Strömung. Die resultierende Konvergenz über Mitteleuropa deutet auf das Vorhandensein einer Front hin.

In den Bodenkarten sieht man zusätzlich zum Tiefdrucksystem vor den Britischen Inseln ein kleines Bodentief über England. Die bereits in den Höhenkarten angedeutete Front über Mitteleuropa wird bestätigt. Sie verläuft mit einer östlichen Ausbuchtung über Mitteleuropa von Island bis nach Spanien. Zwischen dieser langen Front und der Front des kleinen Englandtiefs liegt eine Konvergenzlinie. Die ausgebuchtete Front über Mitteleuropa löst die in der Schweiz am frühen Abend beobachteten, zum Teil sehr heftigen Gewitter aus.

Die Auswertung der Payerne-Sondierung ist in Abbildung 6.12 dargestellt:

Die Windgeschwindigkeit erreicht ein erstes Maximum unterhalb 800 hPa von etwa 26 knt . In den untersten 2000 m beobachtet man Südwestwinde. In den darüberliegenden 1000 m dreht die Windrichtung auf Süd. Diese zyklonale Windrehung zwischen 2000 m und 3000 m kann zu einer Bevorzugung der linksziehenden Zellen führen (Schmid and Schiesser, 1990).

Die Parameter CAPE (290 Jkg^{-1}), LI ($-1.93\text{ }^\circ\text{C}$) und BRN (9.11) weisen darauf hin, dass nicht besonders viel Labilitätsenergie vorhanden ist. Die konvektive Hemmung von 56.36 Jkg^{-1} stellt kein grosses Hindernis für die Entwicklung von Gewittern dar. Die SRH hat einen Wert von $85.13\text{ m}^2\text{ s}^{-2}$. Der CS-Index ist für die Entwicklung von verbreiteten Gewittern etwas klein ($2323.26\text{ Jkg}^{-1}\text{ m}^2\text{ s}^{-2}$, der SWISS12-Index liegt mit einem Wert von -10.73 dagegen im günstigen Bereich.

6.2 Diskussion der erhaltenen Resultate

Wie bereits im Kapitel 5 angesprochen, konnten die meisten der von Oker identifizierten potentiellen Superzellen und Superzellen mit dem in dieser Arbeit verwendeten Algorithmus wiedergefunden werden. Da jedoch nur solche Gewitterzellen verfolgt wurden, deren maximale Reflektivität einen Schwellenwert von 52 dBZ überschreitet, konnten einige langlebige Zellen nicht kontinuierlich beobachtet werden, wenn sie sich zwischenzeitlich abschwächten. Pulsierende oder sogenannte weak evolution Superzellen werden mit der verwendeten Methode eventuell nur als einzelne, kurzlebige Zellen wahrgenommen. Das sonst sehr gut zur Identifizierung von Superzellen geeignete Kriterium Lebensdauer ist dann weniger gut anwendbar. Beim Verfolgen der Gewitterzellen treten allgemein Schwierigkeiten auf, wenn verschiedene Zentren nahe zusammenliegen, beispielsweise bei der Verschmelzung oder Teilung von Zellen. In diesen Fällen besteht das Risiko, dass die einzelnen Zellen nicht richtig getrennt werden können. Beispielsweise wurde beobachtet, dass das identifizierte Maximum eines Gewitters von einem Zeitpunkt zum nächsten zwischen benachbarten Zellen hin und her springt.

Mit wenigen Ausnahmen konnte das theoretisch erwartete Verhalten der verschiedenen Kriterien in der deskriptiven Analyse bestätigt werden, auch wenn sich viele der gefundenen Zusammenhänge bei den weiteren Tests nicht als signifikant erwiesen. Die 40 dBZ -Fläche weist keinen linearen Zusammenhang zur Klassierungsvariablen *Superzelle* auf. Dies könnte damit zusammenhängen, dass die Berechnung von Konturenflächen zu bestimmten Niveaus bei der Teilung oder Verschmelzung von Gewittern ebenfalls problematisch ist.

Betrachtet man alle Kriterien als gleichwertig, ist eine eindeutige Umklassierung der potentiellen Superzellen entweder in die Kontrollgruppe oder in die Klasse der Superzellen nicht möglich (siehe Kapitel 5.1). Schaut man sich hingegen die drei Gruppen der Kriterien getrennt

an, weist die Mehrzahl der einfachen Kriterien eher auf eine Zugehörigkeit zur Kontrollgruppe hin, die Windkriterien zeigen eher Superzelleneigenschaften und bei den Ellipsenkriterien ist das Verhältnis ausgeglichen. Die allgemeine Zuverlässigkeit der verschiedenen Kriteriengruppen wird im folgenden Abschnitt weiter diskutiert

6.2.1 Einfache Kriterien

Diese Gruppe der einfacheren Kriterien eignet sich wie in der univariaten statistischen Analyse gesehen gut zur Identifizierung von Superzellen. Die einzelnen Kriterien sind auch theoretisch gut begründet und sollen in diesem Abschnitt genauer diskutiert werden.

Das Hagelkriterium (maximale Reflektivität grösser als 55 dBZ während 30 min und Lebensdauer länger als 30 min) eignet sich sehr gut zur Trennung der Superzellen von den anderen beiden Klassen. Der mittlere Wert dieses Kriteriums ist, wie theoretisch erwartet, bei den Superzellen am grössten.

Das Stationaritätskriterium enthält neben der Voraussetzung, dass die Lebensdauer mindestens 30 min betragen muss noch die Bedingung, dass die Standardabweichungen der Reflektivität und der 40 dBZ -Fläche nicht zu gross sein dürfen. Dieses Kriterium kann theoretisch nur dann gut funktionieren, wenn sich die Superzellen im Stationärzustand befinden. Am heikelsten ist wie bereits angesprochen die 40 dBZ -Fläche, die anderen beiden Komponenten der hier verwendeten Stationaritätsdefinition funktionieren recht gut. Das Stationaritätskriterium eignet sich gut, um die potentiellen Superzellen und Superzellen von der Kontrollgruppe zu trennen.

Die beiden Kriterien maximale und mittlere Reflektivität entsprechen der Erwartung, dass die Superzellen grössere Werte aufweisen sollten. Bei der Betrachtung der Standardabweichungen sieht man, dass die Reflektivität der Superzellen grössere Schwankungen aufweist. Diese Feststellung scheint zur oben besprochenen Stationaritätsbedingung im Widerspruch zu stehen. Es ist aber anzunehmen, dass die Superzellen noch nicht den Stationärzustand erreicht haben, wenn sie ab einem Schwellenwert von 52 dBZ von Tracking-Algorithmus erfasst werden. Die Reflektivität nimmt immer noch zu, während sie bei den Gewittern der Kontrollgruppe nicht mehr viel stärker wird.

Die Lebensdauer ist ein wichtiges Kriterium zur Identifikation von Superzellen. Sie eignet sich von allen untersuchten Kriterien am besten zur Trennung der Gewitter in die drei Klassen. Problematisch ist einzig die 40 dBZ -Fläche, welche sich nicht gut zur Erkennung von Superzellen eignet. Indem die potentiellen Superzellen im Mittel einen grösseren Wert haben als die anderen beiden Klassen, besteht kein linearer Zusammenhang mit der Klassierungsvariablen. Da die 40 dBZ -Fläche mit der Reflektivität im Zusammenhang steht entspricht die Beobachtung, dass dieser Parameter bei den Superzellen grössere Schwankungen (Standardabweichung) aufweist, hingegen den theoretischen Erwartungen.

6.2.2 Windkriterien

Wie im Kapitel 4.2.3 bei der Definition der Windkriterien beschrieben, sollten sich Superzellen in ihrer Bewegung von gewöhnlichen Gewittern unterscheiden. In Abbildung 6.13 ist am Beispiel einer Gewitterzelle vom 23.06.2003 zu sehen, dass vor allem bei der Berechnung der Sturmbewegung Probleme auftreten.

Um 20:59 UTC weist die beobachtete Zelle zwei Maxima auf, das weiter östlich gelegene wurde wegen der höheren Reflektivität als Zentrum identifiziert. Um 21:14 UTC wird die Zelle von einem fehlenden Radarstrahl durchtrennt. Wie weiter unten noch erläutert werden

soll, ist es in solchen Situationen auch schwierig, eine Ellipse anzupassen. Um 21:49 UTC hat sich östlich vom ursprünglich betrachteten Gewitter eine vorher neu aufgetauchte Zelle soweit verstärkt, dass nun das Zentrum in diesem neuen Maximum liegt.

Betrachtet man die Windvektoren, so ist der COTREC-Umgebungswind (grün), recht stabil. Seine Richtung und sein Betrag weisen keine grossen Schwankungen auf. Bei der Berechneten Sturmbewegung treten hingegen grosse Schwankungen sowohl in der Richtung als auch im Betrag auf. Diese auch in den Histogrammen (hier nicht gezeigt) bestätigten grossen Änderungen der Sturmbewegung von einem Zeitpunkt zum nächsten könnten dadurch bedingt sein, dass mit der verwendeten Rückwärtsdifferenz noch nicht die beste Berechnungsmethode gefunden wurde. Denkbar ist, dass durch ein stärker glättendes Verfahren die grossen Schwankungen herausgefiltert werden könnten.

Die X-Komponente der berechneten Sturmbewegung zeigt, dass sich die potentiellen Superzellen und die Superzellen schneller von Westen nach Osten bewegen als die Gewitter der Kontrollgruppe. Betrachtet man die Y-Komponente ist zu sehen, dass die Zellen der Kontrollgruppe eine schwache südliche Bewegungskomponente aufweisen, während die Gewitter der beiden anderen Klassen eher nach Norden ziehen. Die potentiellen Superzellen weisen dabei den grössten Betrag in dieser Bewegungskomponente auf, die Beziehung zur Klassierungsvariablen ist deshalb nicht linear. Der Betrag der Sturmbewegung zeigt, dass sich Superzellen und potentielle Superzellen etwas schneller bewegen; diese Beziehungen sind aber nicht signifikant. Theoretisch erwartet man, dass sich linksziehende Superzellen etwas schneller und die rechtsziehenden Superzellen etwas langsamer fortbewegen in Bezug auf den mittleren Umgebungswind (siehe Abbildung 4.3). Die Beobachtungen bezüglich der Sturmbewegung könnten also so interpretiert werden, dass in den betrachteten Daten die Superzellen eher linksziehend waren. Das Verhältnis von rechts- und linksziehenden Superzellen ist in der Schweiz etwa ausgeglichen (Houze et al., 1993).

Mit der berechneten Sturmbewegung weisen natürlich auch die Abweichung (Winkel zwischen Sturmbewegung und COTREC-Wind) sowie der Indikator für die Richtung der Abweichung, SLSR, Schwankungen von einem Zeitpunkt zum nächsten auf. Der Winkel zeigt zwar, dass die potentiellen Superzellen und die Superzellen beide etwa 3° stärker vom mittleren Wind abweichen; die Unterschiede sind aber nicht signifikant. Das positive Vorzeichen von SLSR und der grössere Wert für die Superzellen gibt an, dass diese etwas stärker nach rechts abweichen als die beiden anderen Klassen. Dies steht im Widerspruch zu den Beobachtungen der Sturmbewegung.

Die obige Diskussion zeigt, dass bei der Interpretation der Windparameter Vorsicht geboten ist und deren Verhalten durch ein besseres Verfahren zur Berechnung der Sturmbewegung eventuell noch verbessert werden könnte.

6.2.3 Ellipsenkriterien

Wie in der Definition von Nielson Gammon beschrieben, sollte das Radarecho einer Superzelle in Richtung der vertikalen Windscherung verlängert sein (Nielson-Gammon and Read, 1994). Deshalb wurde in dieser Arbeit wie schon bei Schmid versucht, eine Ellipse an die Form der identifizierten Gewitterzellen anzupassen (Schmid, 1998). In Abbildung 6.14 sind für eine Gewitterzelle, welche in der Nacht auf den 24.06.2002 beobachtet wurde, einige Bilder mit den Ellipsenkonturen sowie der Lage von Schwerpunkt, Maximum und arithmetischen Mittelwert dargestellt. Die Abbildung zeigt ausserdem ein schönes Beispiel einer sich teilenden Zelle mit anschliessender Verstärkung des rechten Gewitters.

In den meisten Fällen liegen die drei eingezeichneten Punkte nahe beieinander. Die Gaussel-

lipse konnte für alle acht Zeitpunkte angepasst werden. Vor der Zellteilung ist die Orientierung nordwest-südöstlich ausgerichtet, die Ellipse wird an die ganze Zelle mit beiden Maxima angepasst. Nach der Teilung wird mit einer Ausnahme um 22:59:39 UTC die rechte Zelle verfolgt, die Orientierung der Ellipse hat sich um etwa 90° gedreht.

In Abbildung 6.14 auch gut zu sehen, dass bei den Ellipsenparametern Probleme entstehen, wenn viele Gewitterzellen nahe beieinander liegen (Zellteilung und Verschmelzung). Ausserdem ist wie bereits weiter oben erwähnt die Berechnung der Konturenfläche, welche der Ellipsenanpassung zugrunde liegt, nicht ganz einfach. Für isolierte Zellen, welche keine Teilungen oder Verschmelzungen durchmachen, ist die Orientierung der Ellipse stabil.

Im folgenden soll das Verhalten der einzelnen Ellipsenkriterien genauer diskutiert werden.

Bei der Lage des Maximums erwartet man theoretisch, dass es bei einer Superzelle eher im hinteren Teil des Radarechos und damit auch der Ellipse zu finden ist. Dies wurde auch beobachtet, wobei aber das Maximum der potentiellen Superzellen weiter hinten liegt als das der Superzellen. Diese Unterschiede sind nicht signifikant. Die seitliche Abweichung des Reflektivitätsmaximums von der langen Achse der Ellipse liefert keine lineare Beziehung zur Klassierungsvariablen. Die Maxima liegen bei allen drei Gruppen im Mittel südlich der langen Achse. Die potentiellen Superzellen weisen dabei die grösste Asymmetrie auf. Betrachtet man nur die betragsmässige Entfernung zur langen- beziehungsweise kurzen Achse, liegt der grösste Wert für beide Komponenten bei der Kontrollgruppe. Dies hängt damit zusammen, dass alle Kriterien, wie in den entsprechenden Histogrammen zu sehen ist, für die Kontrollgruppe sehr breite Verteilungen aufweisen. Theoretisch würde man erwarten, dass das Maximum bei den Superzellen asymmetrischer liegt und die Betragsparameter höhere Werte aufweisen.

Die Neigungsparameter schwanken aus den in diesem Abschnitt bereits diskutierten Gründen zu stark von einem Zeitpunkt zum nächsten, um zur Klassierung der Gewitterzellen verwendet werden zu können. Die potentiellen Superzellen und Superzellen zeigen grössere Schwankungen im Neigungsparameter, wie aus der Betrachtung der Standardabweichungen hervorgeht. Eine Hypothese zur Erklärung wäre, dass in diesen Gruppen mehr Zellteilungen und zugehörige Drehungen der Orientierung stattfinden als bei gewöhnlichen Einzelzellen, (siehe Abbildung 6.14).

Das Verhältnis der kleinen zur grossen Halbachse der angepassten Gaussellipse ist wie theoretisch erwartet bei den Superzellen etwas kleiner als bei den anderen beiden Gruppen. Die nur minimalen Unterschiede sind aber nicht signifikant.

Durch Verbesserungen beim Umgang mit Teilungs- und Verschmelzungsereignissen und eventuell anderen Methoden zur Ellipsenanpassung könnte diese Gruppe von Kriterien optimiert werden.

6.2.4 Regressionsmodelle

Um zu bestimmen, ob es sich bei einem Gewitter, für welches man die in dieser Arbeit definierten Kriterien berechnet hat, um eine Superzelle handeln könnte, wurden verschiedene Regressionsmodelle untersucht, (siehe Abbildung 5.8). Betrachtet man als Kriterium für das beste Modell die grösste aufgeklärte Varianz (adjusted R^2), erhält eine Regression mit der Lebensdauer, der Nord-Süd Komponente der Sturmbewegung (SM_y) und der 40 dBZ -Fläche als erklärenden Variablen für die Klassierungsvariable Superzelle den Vorzug. Mit einer Berechnung der Skill Scores bekommt man für dasselbe Regressionsmodell mit diesen drei Variablen ebenfalls die besten Resultate (siehe Tabelle 5.2).

Bei genauerer Betrachtung der erhaltenen Regressionsgleichung gibt es einige Punkte zu beachten, (vergleiche Gleichung 5.1). Die 40 dBZ -Fläche geht mit einem negativen Vorzeichen ein.

Dies würde bedeuten, dass Supercellen eine kleinere 40 dBZ -Fläche haben als gewöhnliche Gewitter, was sich physikalisch nicht erklären lässt. Dies zeigt, dass die Berechnung dieses Parameters noch mit zu grossen Schwierigkeiten verbunden ist. Das positive Vorzeichen von SM_y zeigt, dass sich im hier verwendeten Datensatz die Supercellen stärker nach Norden bewegen als die anderen Gewitter. In den meisten Fällen weist der mittlere Wind, mit dem sich die gewöhnlichen Gewitter fortbewegen, eine starke Westwindkomponente auf. Die Supercellen bewegen sich also stärker nach links von dieser mittleren Windrichtung aus gesehen. Obwohl in der Schweiz auch viele linksziehende Hagelgewitter beobachtet werden, muss die Zuverlässigkeit dieses Kriteriums unbedingt mit weiteren, unabhängigen Daten getestet werden. Ausserdem besteht noch ein Widerspruch zu den Parametern, welche die Richtung der Abweichung angeben. Die Lebensdauer ist wie erwartet für die Supercellen sehr gross und eignet sich besonders gut zur Klassierung der Gewitter.

Aus dieser Diskussion folgt, dass vor der praktischen Anwendung eines Regressionsmodells dieses zuerst mit unabhängigen Daten getestet werden muss. Die in vielen Modellen auftauchende Schwankung in der Orientierung der Ellipse könnte eventuell zur Identifizierung von sich teilenden Zellen hinzugenommen werden (siehe Abbildung 6.14). Bei gut definierten isolierten Zellen ist die Orientierung der Ellipse stabil und keinen grösseren Schwankungen von einem Zeitschritt zum nächsten unterworfen. Um bereits zu einem frühen Zeitpunkt zu erkennen, ob es sich bei einem Gewitter um eine Supercelle handelt, könnte die Lebensdauer möglicherweise durch die mittlere Reflektivität ersetzt werden, da diese beiden Kriterien miteinander korreliert sind ($r^2 = 0.674$).

Bei einem entsprechenden Regressionsmodell ohne Lebensdauer, welches als unabhängige Variablen die 40 dBZ -Fläche, die Standardabweichung der 40 dBZ -Fläche, die mittlere Reflektivität und die Schwankung in der Orientierung der Ellipse beinhaltet, ist die aufgeklärte Varianz (adjusted $R^2 = 0.321$) kleiner als beim ersten Modell mit der Regressionsgleichung 5.1. Die neu hinzukommende Schwankung der 40 dBZ -Fläche ist physikalisch gut interpretierbar. Die potentiellen Supercellen und Supercellen haben im Gegensatz zu den gewöhnlichen Gewittern ihre maximale Intensität noch nicht erreicht, wenn sie ab einem Schwellenwert von 52 dBZ vom Tracking-Algorithmus erfasst werden und weisen deshalb stärkere Schwankungen in der 40 dBZ -Fläche auf. Die Variation in der Orientierung der angepassten Ellipse könnte wie bereits erwähnt damit zusammenhängen, dass bei den potentiellen Supercellen und den Supercellen häufiger Teilungsereignisse auftreten als bei der Kontrollgruppe. Die Regressionsgleichung für dieses Modell, welches durch die Anwendung der Schrittweisen Regression Rückwärts unter Verwendung aller Variablen ausser der Lebensdauer erhalten wurde, lautet (siehe Abbildung 5.8):

$$\begin{aligned} \text{Supercelle} = & -12.679 - 0.004 \cdot 40\text{ dBZFlaeche} + 0.006 \cdot 40\text{ dBZFlaecheStd} \\ & + 0.236 \cdot \text{mittlereRefl} + 0.006 \cdot \text{Neigung.korr.Std} \end{aligned} \quad (6.1)$$

Da die Lebensdauer während der Verfolgung einer Gewitterzelle in Echtzeit nicht definiert ist, ist zur operationellen Klassierung dieses neue, in Gleichung 6.1 beschriebene Modell, besser geeignet.

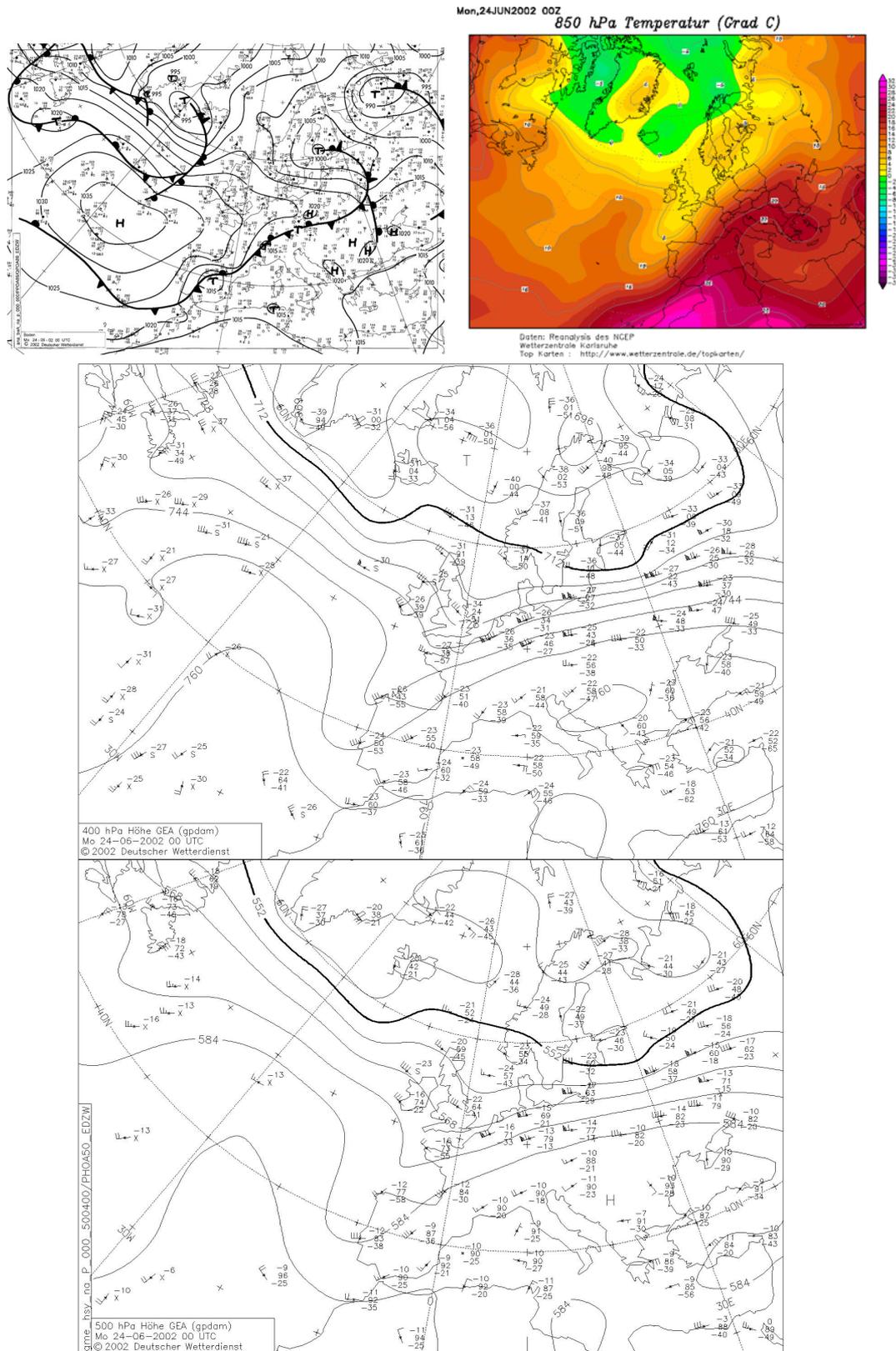


Abbildung 6.1: Wetterlage am 24.06.2002 um 00:00 UTC: oben links ist eine Bodenwetterkarte dargestellt (deutscher Wetterdienst), oben rechts die Temperatur auf 850 hPa (deutsche Wetterzentrale), in der Mitte sieht man die Höhe der 400 hPa Fläche und ganz unten die Höhe der 500 hPa Fläche (deutscher Wetterdienst).

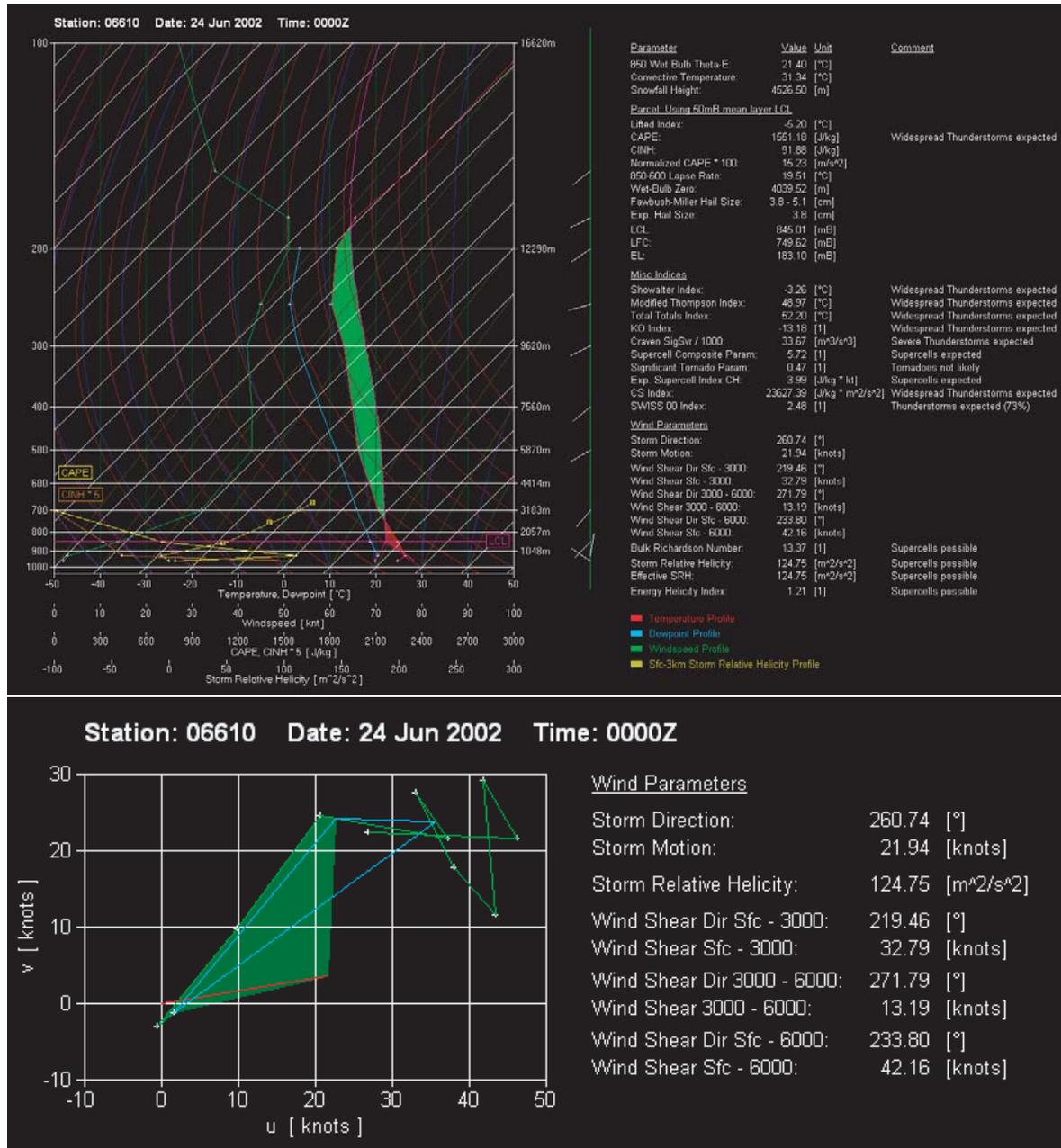


Abbildung 6.2: Auswertung der Payerne-Sondierung vom 24.06.2002 um 00:00 UTC: unten ist der Windhodograph und oben ein Skew-t-Plot abgebildet (Oker, 2004b).

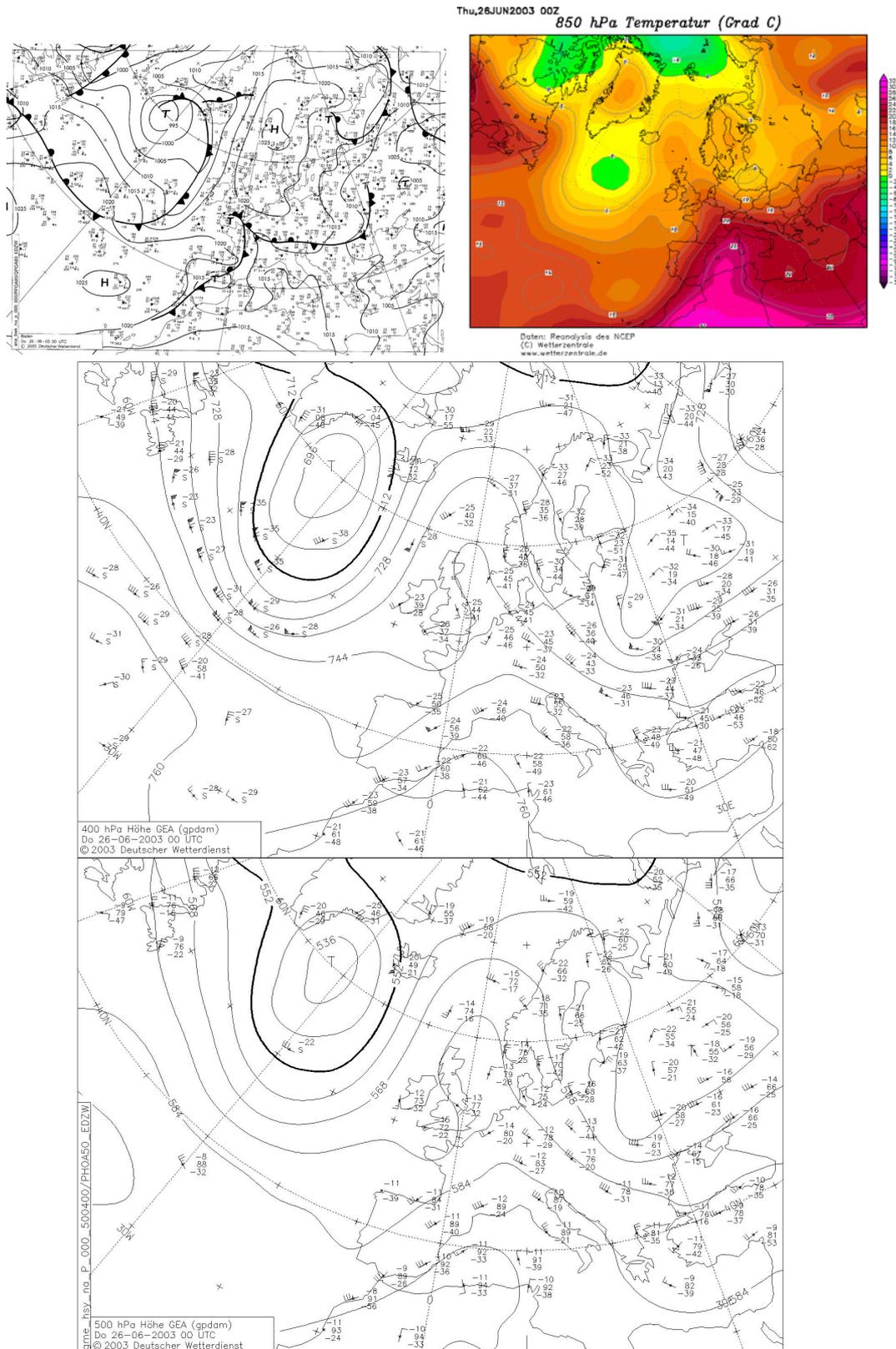


Abbildung 6.3: Wetterlage am 26.06.2003 um 00:00 UTC: oben links ist eine Bodenwetterkarte dargestellt (deutscher Wetterdienst), oben rechts die Temperatur auf 850 hPa (deutsche Wetterzentrale), in der Mitte sieht man die Höhe der 400 hPa Fläche und ganz unten die Höhe der 500 hPa Fläche (deutscher Wetterdienst).

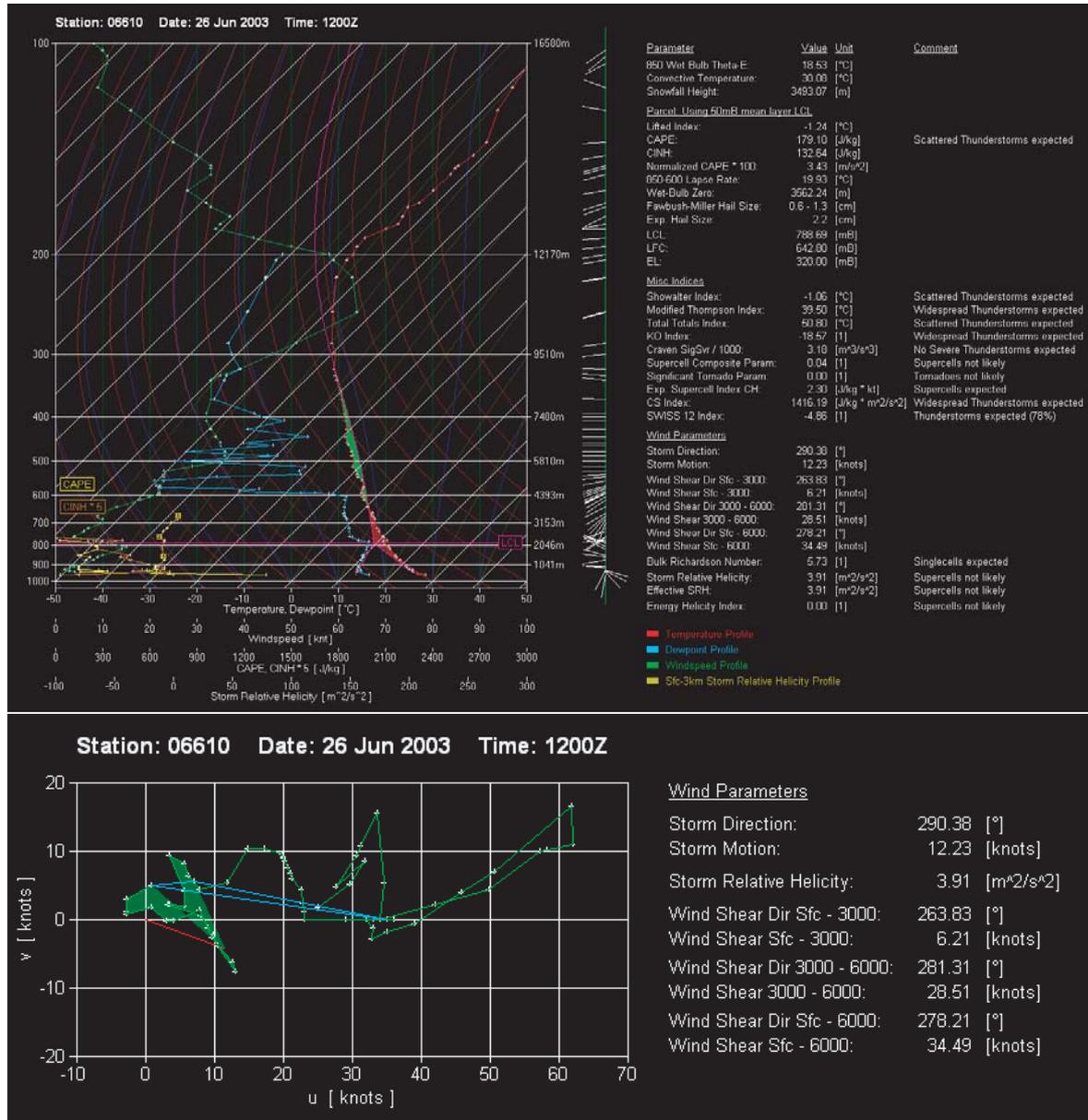


Abbildung 6.4: Auswertung der Payerne-Sondierung vom 26.06.2003 um 12:00 UTC: unten ist der Windhodograph und oben ein Skew-t-Plot abgebildet (Oker, 2004b).

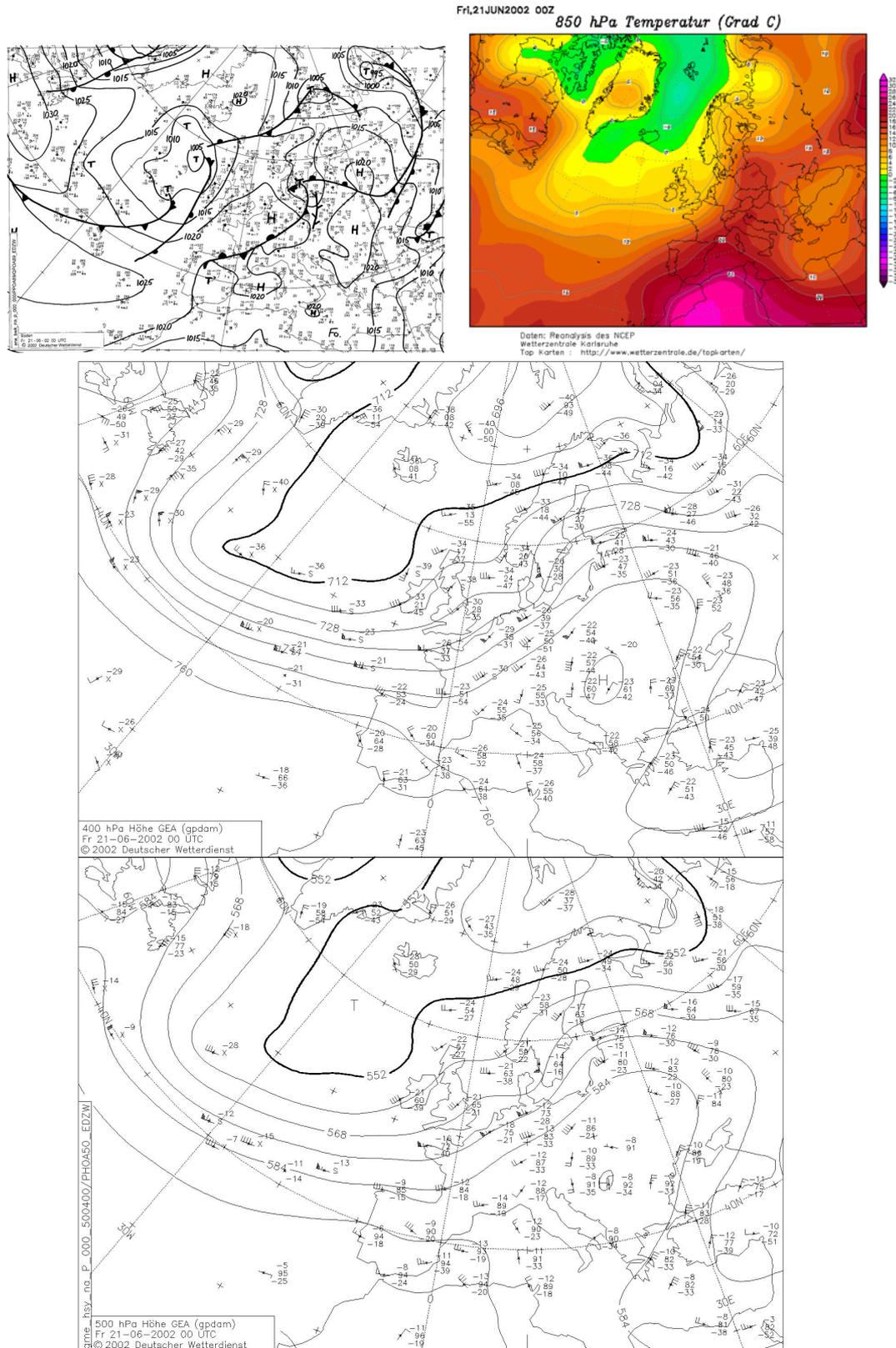


Abbildung 6.5: Wetterlage am 21.06.2002 um 00:00 UTC: oben links ist eine Bodenwetterkarte dargestellt (deutscher Wetterdienst), oben rechts die Temperatur auf 850 hPa (deutsche Wetterzentrale), in der Mitte sieht man die Höhe der 400 hPa Fläche und ganz unten die Höhe der 500 hPa Fläche (deutscher Wetterdienst).

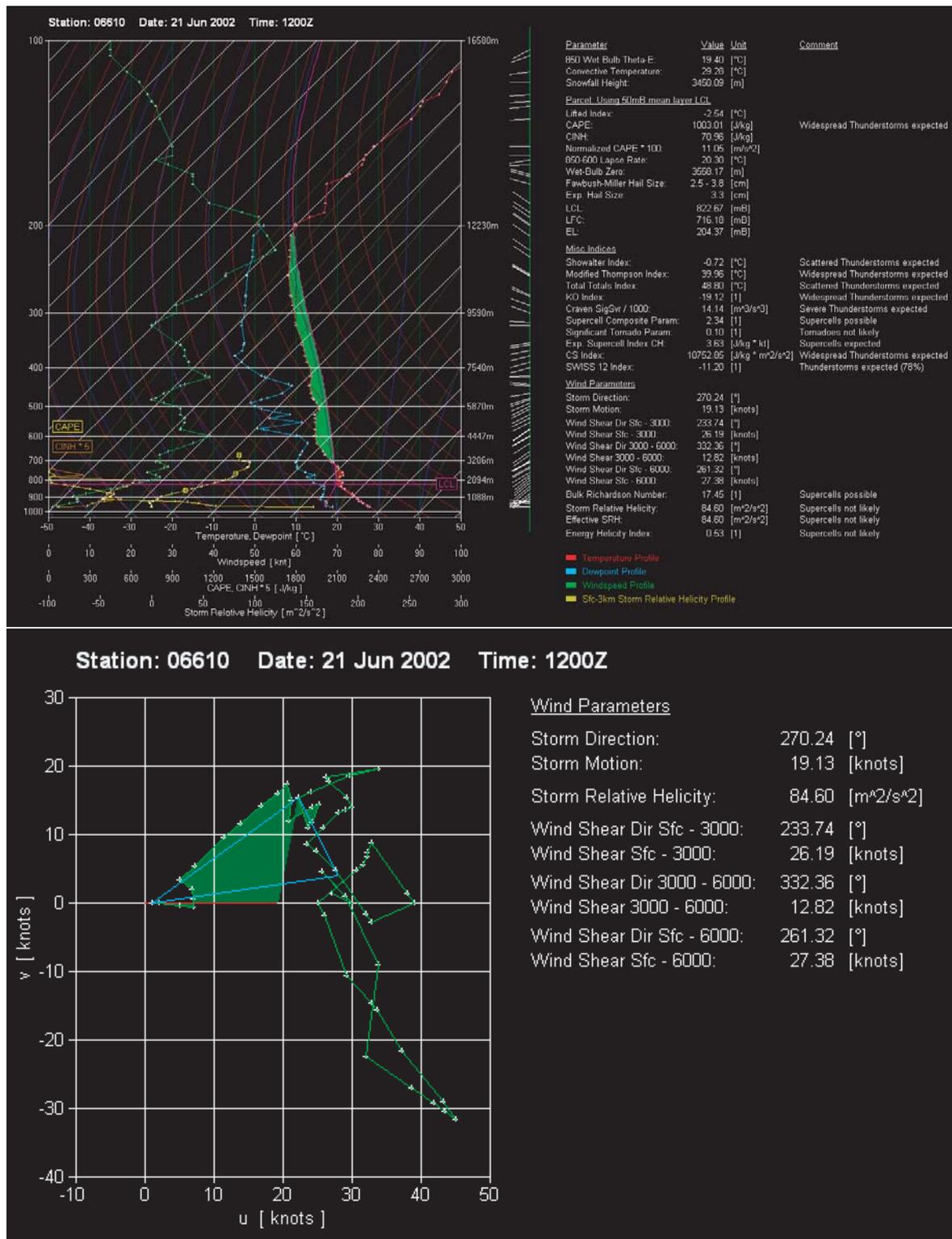


Abbildung 6.6: Auswertung der Payerne-Sondierung vom 21.06.2002 um 12:00 UTC: unten ist der Windhodograph und oben ein Skew-t-Plot abgebildet (Oker, 2004b).

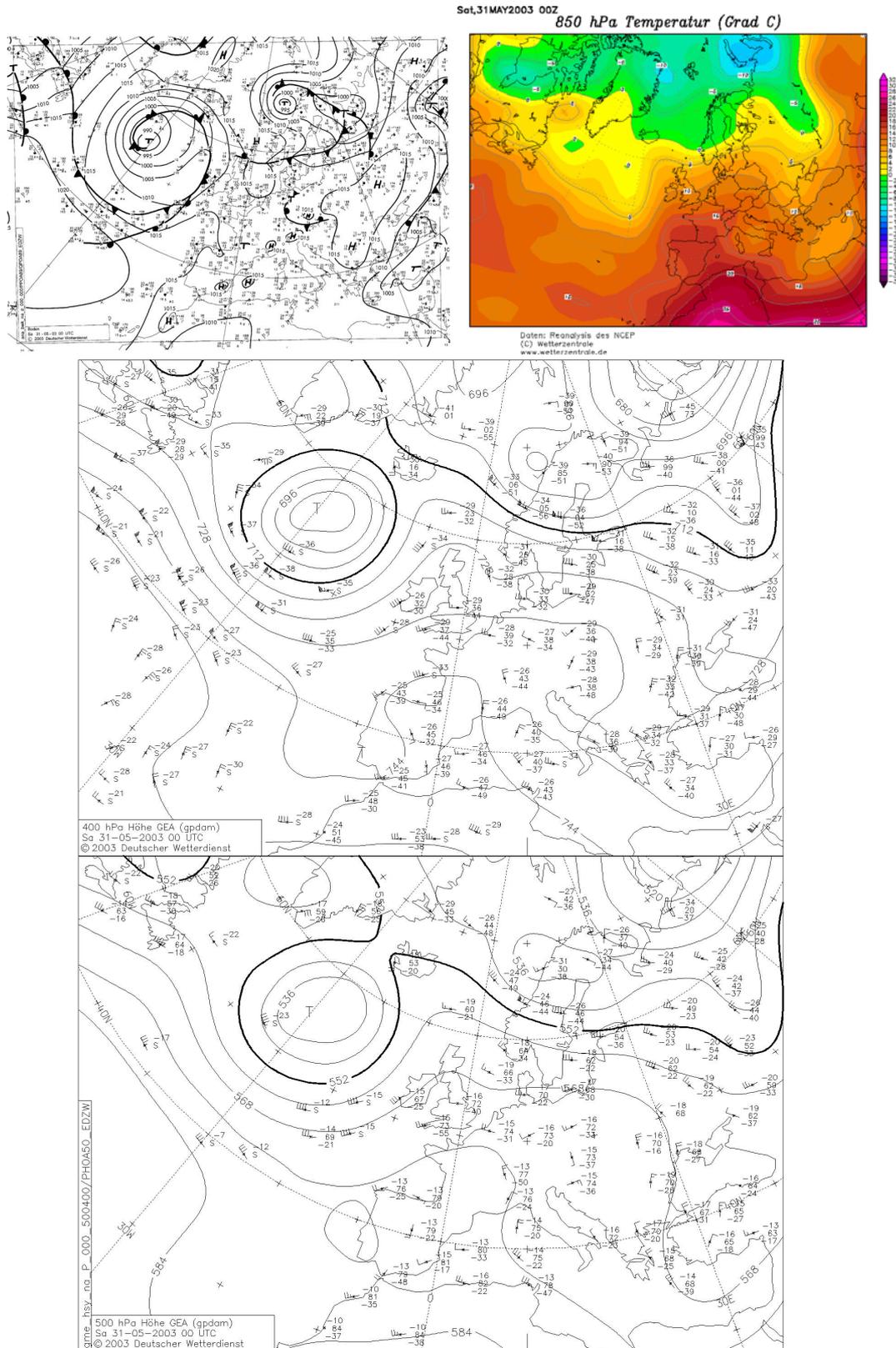


Abbildung 6.7: Wetterlage am 31.05.2003 um 00:00 UTC: oben links ist eine Bodenwetterkarte dargestellt (deutscher Wetterdienst), oben rechts die Temperatur auf 850 hPa (deutsche Wetterzentrale), in der Mitte sieht man die Höhe der 400 hPa Fläche und ganz unten die Höhe der 500 hPa Fläche (deutscher Wetterdienst).

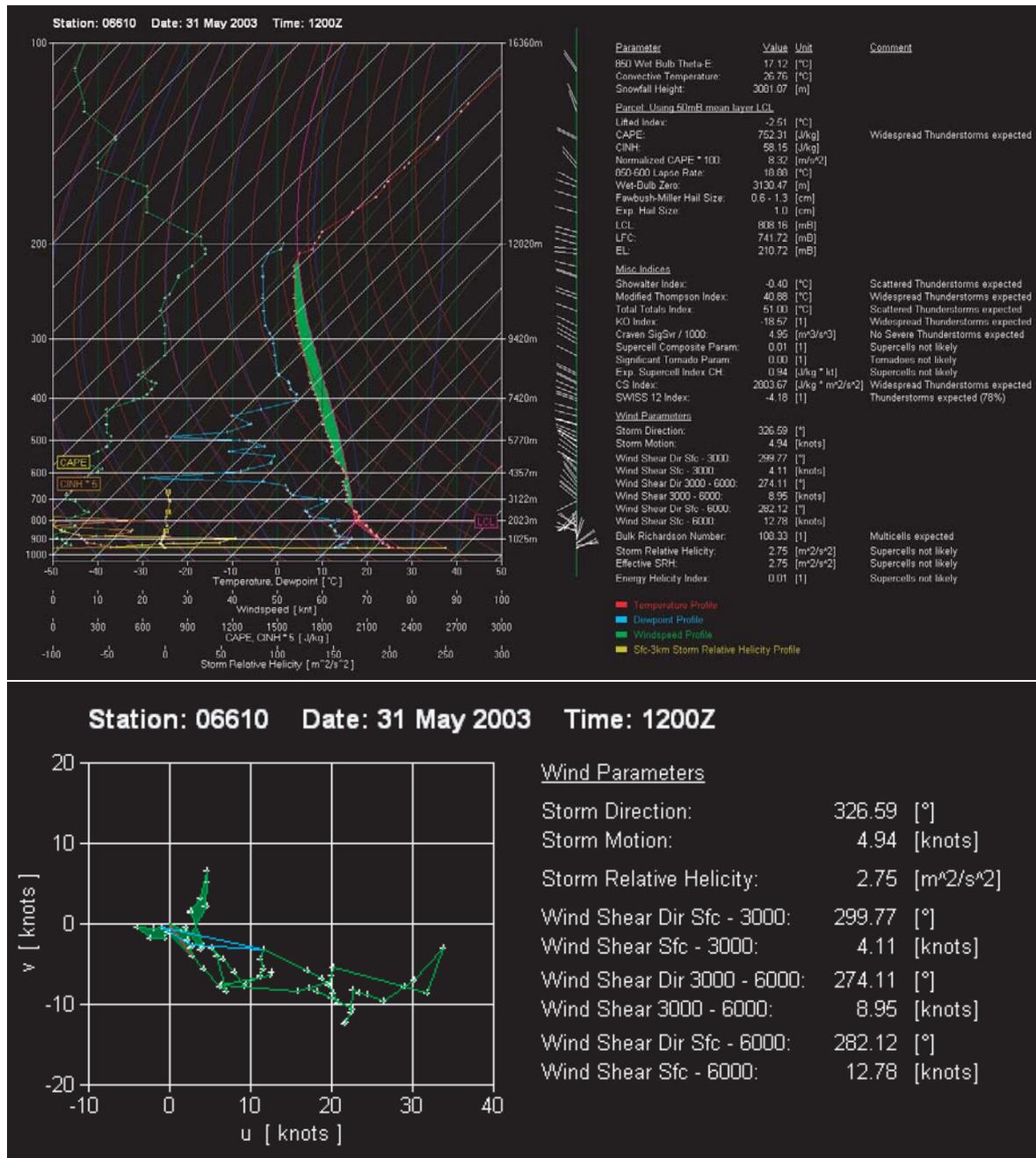


Abbildung 6.8: Auswertung der Payerne-Sondierung vom 31.05.2003 um 12:00 UTC: unten ist der Windhodograph und oben ein Skew-t-Plot abgebildet (Oker, 2004b).

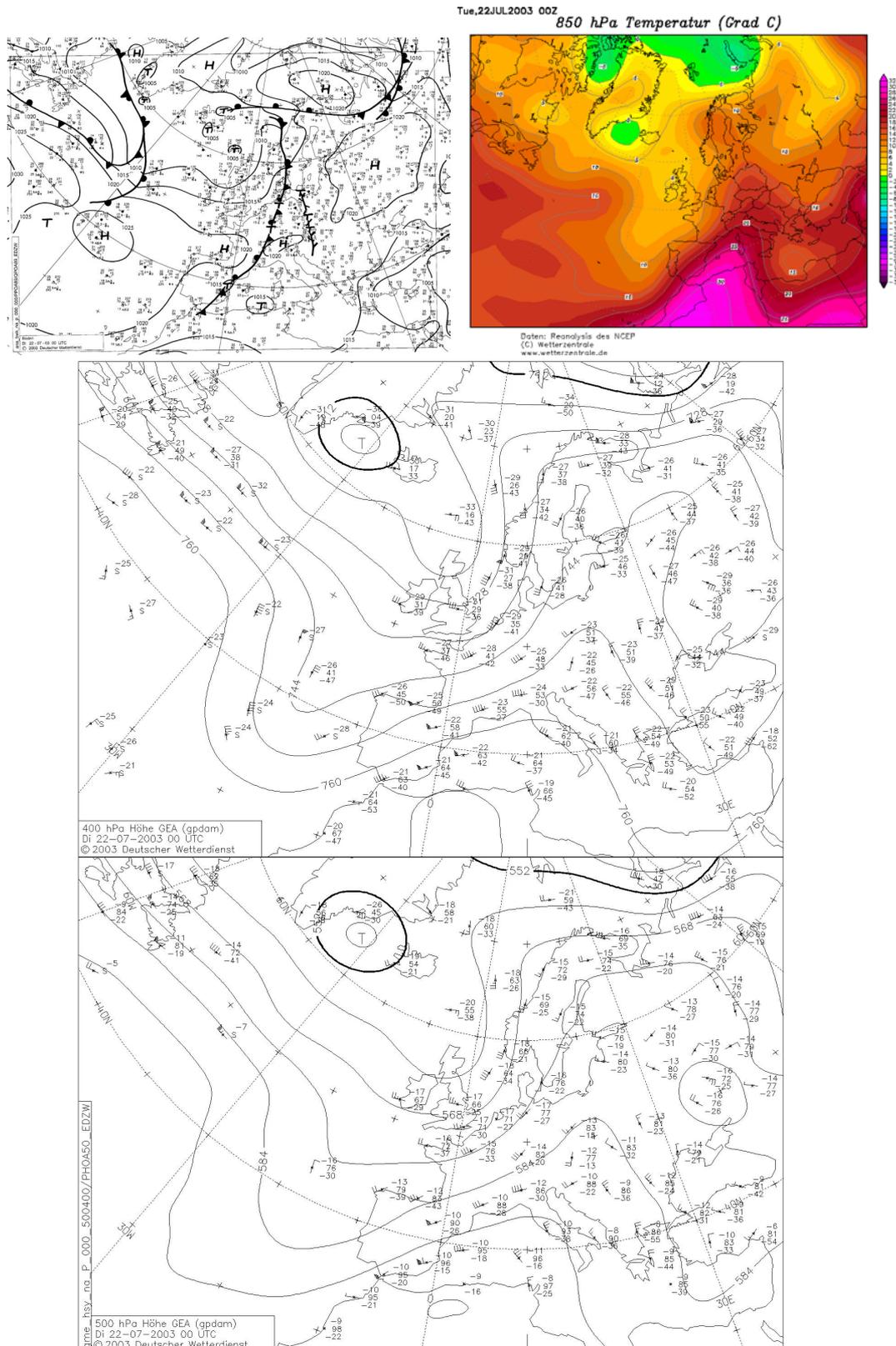


Abbildung 6.9: Wetterlage am 22.07.2003 um 00:00 UTC: oben links ist eine Bodenwetterkarte dargestellt (deutscher Wetterdienst), oben rechts die Temperatur auf 850 hPa (deutsche Wetterzentrale), in der Mitte sieht man die Höhe der 400 hPa Fläche und ganz unten die Höhe der 500 hPa Fläche (deutscher Wetterdienst).

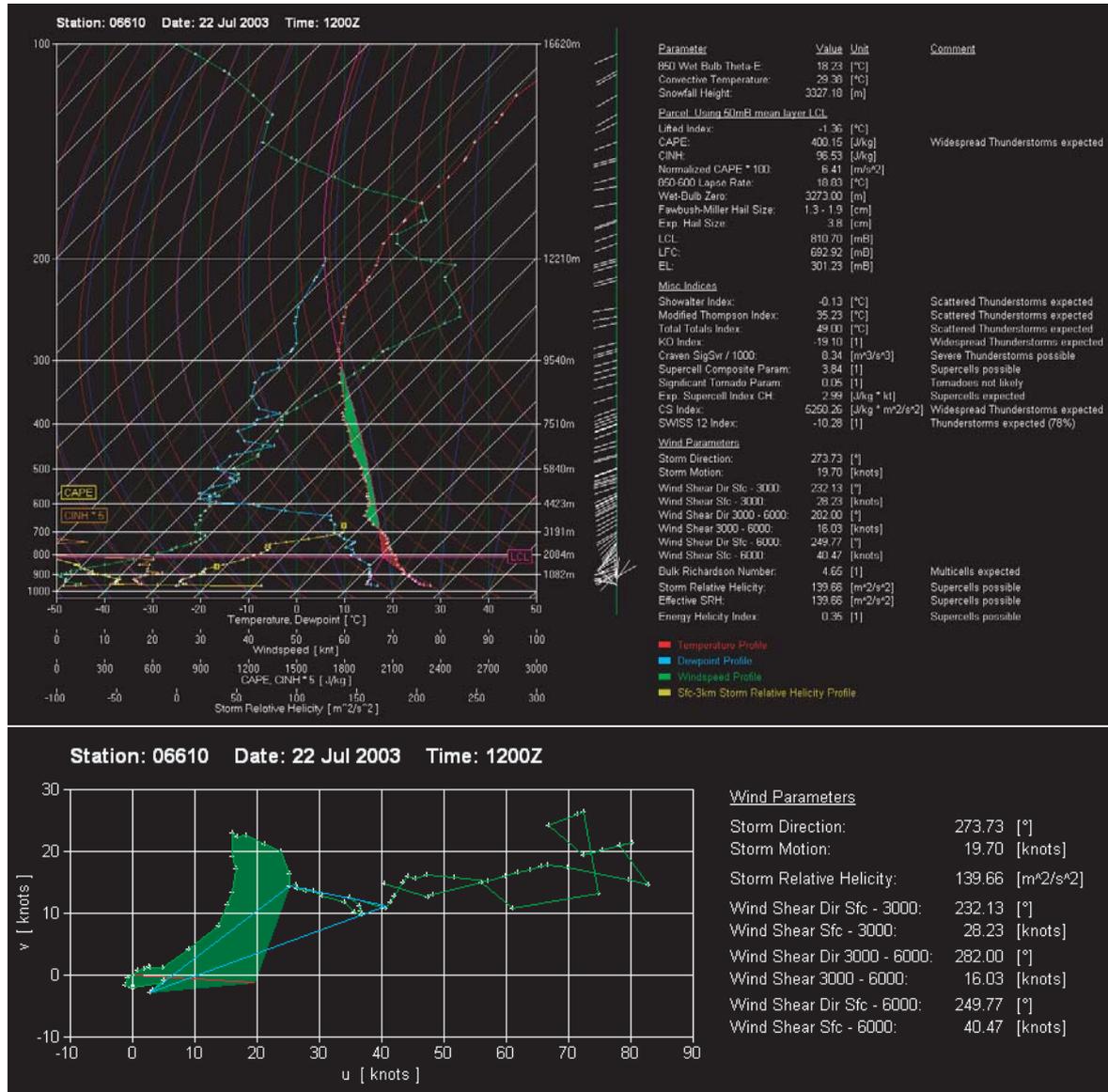


Abbildung 6.10: Auswertung der Payerne-Sondierung vom 22.07.2003 um 12:00 UTC: unten ist der Windhodograph und oben ein Skew-t-Plot abgebildet (Oker, 2004b).

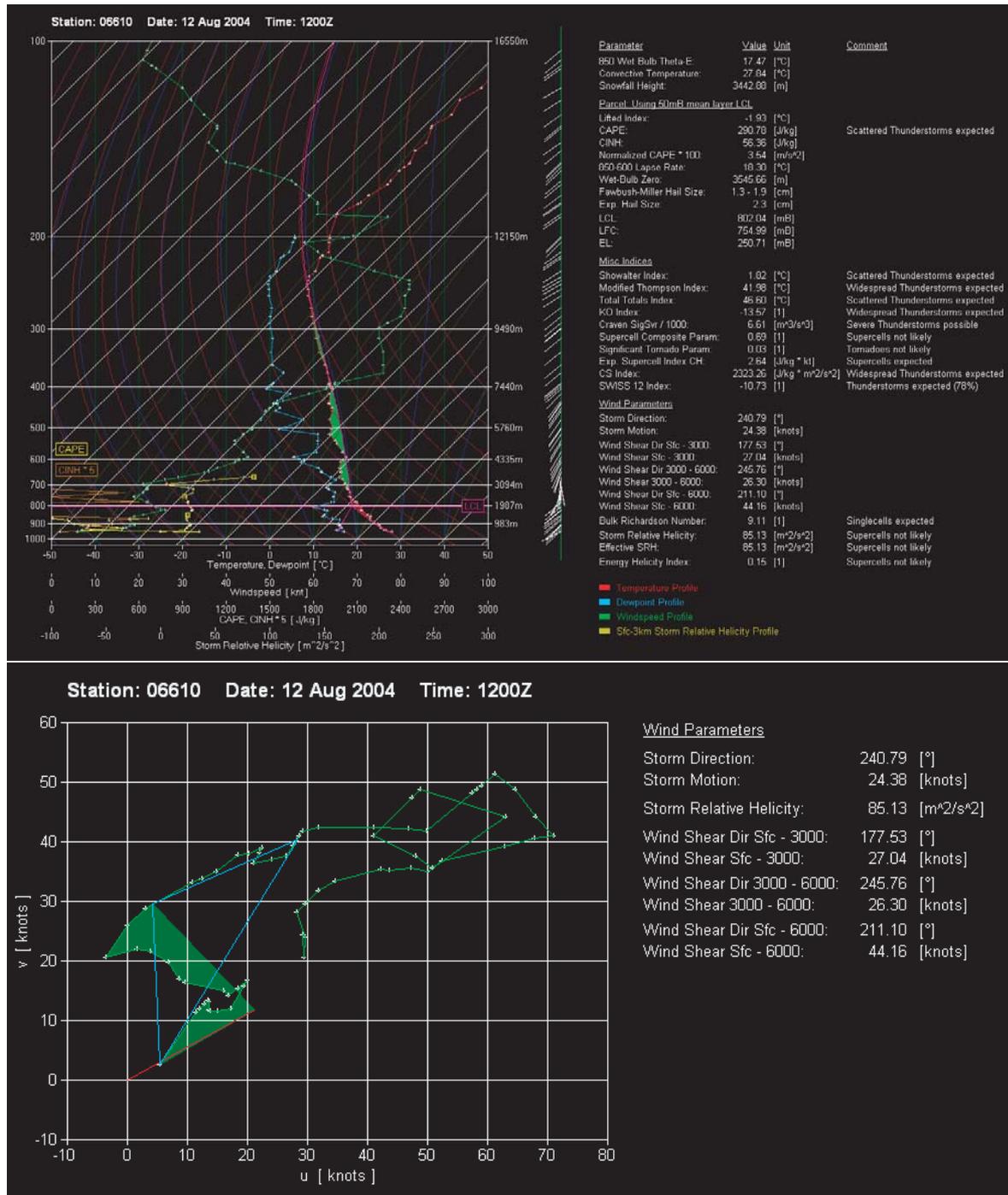


Abbildung 6.12: Auswertung der Payerne-Sondierung vom 12.08.2004 um 12:00 UTC: unten ist der Windhodograph und oben ein Skew-t-Plot abgebildet (Oker, 2004b).

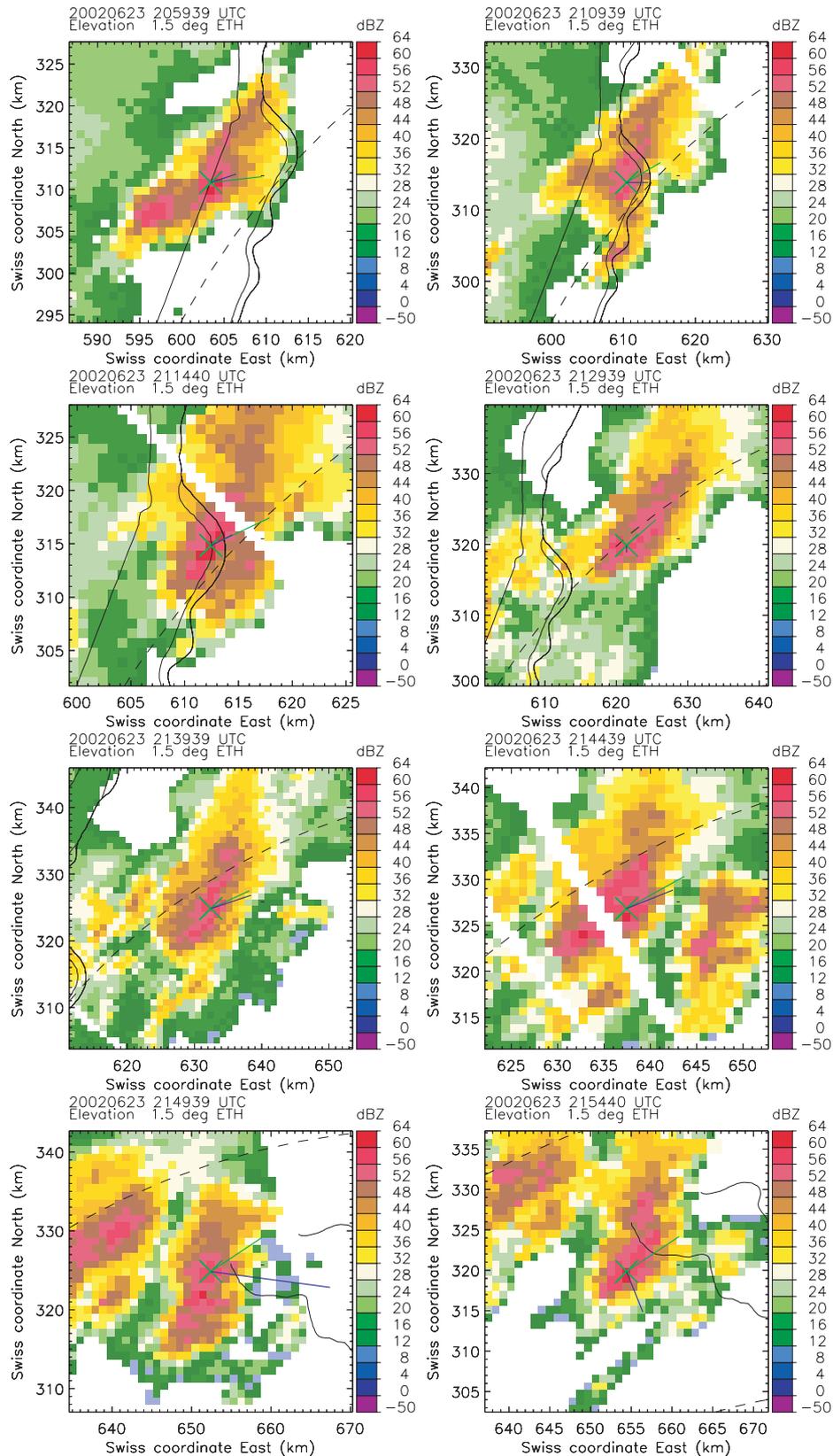


Abbildung 6.13: Ausgewählte Bilder einer Gewitterzelle vom 23.06.2003 mit eingezeichneten Bewegungsvektoren: Der nächstgelegene COTREC-Wind ist in grün, die berechnete Sturmbewegung in blau eingezeichnet. Diese Zelle wurde um 20:59:39 UTC identifiziert und konnte bis um 22:14:39 UTC verfolgt werden.

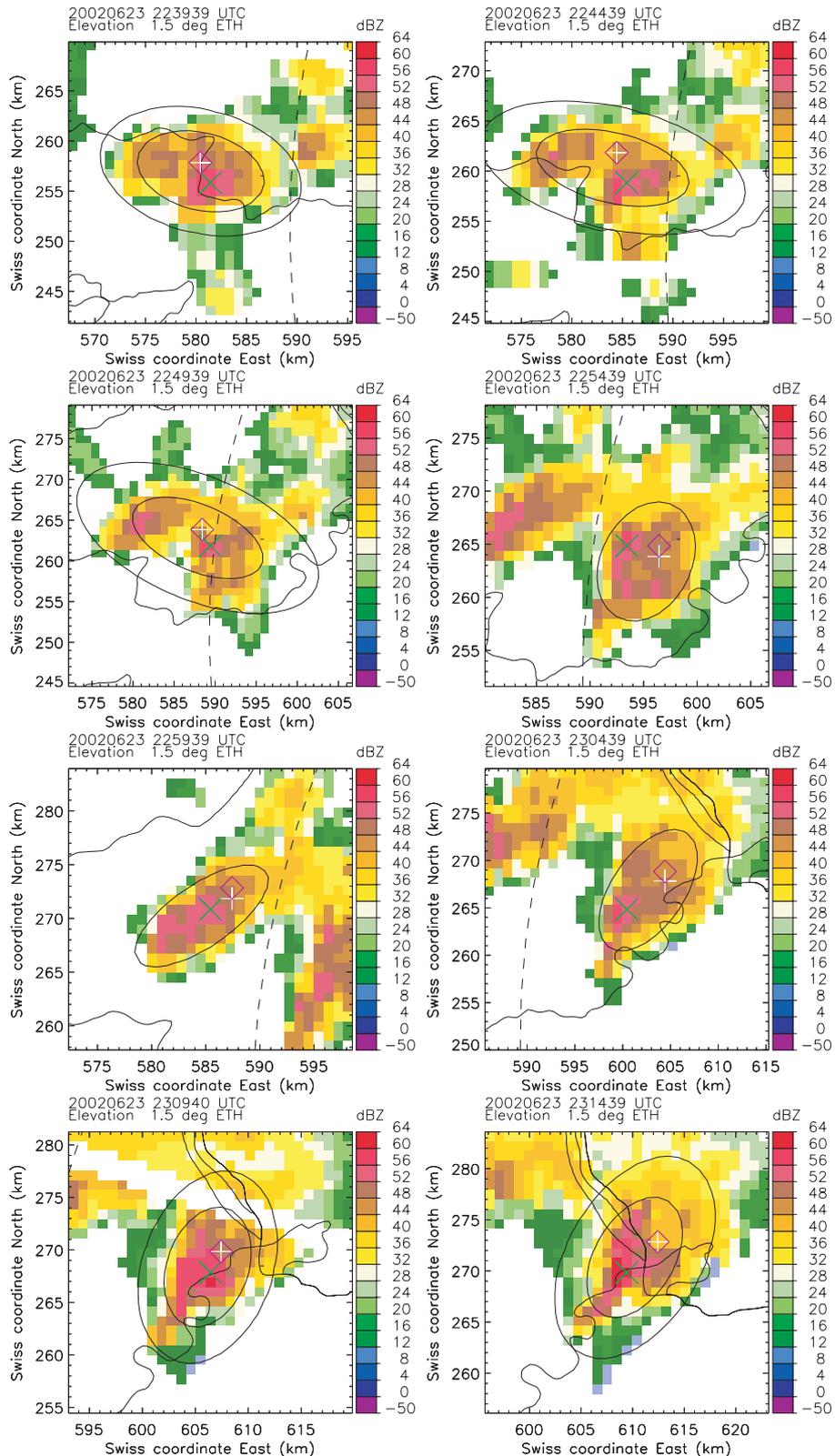


Abbildung 6.14: Ausgewählte Bilder einer Gewitterzelle vom 23/24.06.2002 mit eingezeichneten Ellipsenkonturen: Die innere und äussere schwarze Ellipse bezeichnen den 41 dBZ- beziehungsweise 36 dBZ-Schnitt durch die an die 35 dBZ-Kontur angepasste Gaussellipse. Das Maximum der Reflektivität ist mit einem grünen Kreuz markiert, der Schwerpunkt der 40 dBZ-Fläche ist als weisses Plussymbol dargestellt und das Zeichen in violett bezeichnet den arithmetischen Mittelwert. Diese Zelle wurde um 22:39:39 UTC identifiziert und konnte bis um 01:24:39 UTC des 24.06.2002 verfolgt werden.

Kapitel 7

Schlussfolgerungen und Ausblick

Im ersten Teil dieses Kapitels sollen die wichtigsten Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zur Verfolgung und Identifizierung von Superzellen dargestellt werden. Danach wird kurz auf die Vorhersage von Superzellen allgemein und in Bezug auf diese Arbeit eingegangen. Schliesslich wird im Ausblick diskutiert, welche Möglichkeiten zur operationellen Erkennung von Superzellen die Ergebnisse dieser Arbeit bieten.

7.1 Schlussfolgerungen

Die automatische Verfolgung mehrerer Gewitterzellen hat für die sechs ausgewählten Tage im Allgemeinen gut funktioniert. 76,9% der von einem unabhängigen Experten als Superzellen klassierten Gewitter und 88.2% der potentiellen Superzellen konnten mit dem verwendeten Verfahren erfolgreich identifiziert und verfolgt werden. Probleme traten nur bei pulsierenden Zellen oder bei Verschmelzungs- und Teilungsereignissen auf. Für jeden Tag konnten während der Laufzeit des Algorithmus die Entwicklung und Verlagerung mehrerer Gewitterzellen anhand von Übersichts- und Ausschnittsbildern beobachtet werden (siehe Flussdiagramm in Abbildung 4.1).

Der Versuch einer Umklassierung der potentiellen Superzellen in die Gruppe der Superzellen oder in die Kontrollgruppe zeigt kein eindeutiges Ergebnis, wenn man alle Kriterien gleich gewichtet. Die separate Betrachtung der drei Kriteriengruppen zeigt aber, dass die Eigenschaften der potentiellen Superzellen in Bezug auf die einfachen Kriterien näher bei den gewöhnlichen Gewittern liegen und die Werte der Windkriterien eher für Superzellen charakteristisch sind. Anhand der Ellipsenkriterien kann keine eindeutige Zuordnung vorgenommen werden. Aus im Diskussionsteil erläuterten Gründen kann angenommen werden, dass die einfachen Kriterien zuverlässigere Resultate liefern als die beiden anderen Gruppen und die potentiellen Superzellen deshalb als gewöhnliche Gewitter zu betrachten sind.

Bei der Frage der Zuverlässigkeit der drei Gruppen von Kriterien hat sich ergeben, dass die einfachen Kriterien am besten zur Erkennung von Superzellen geeignet sind. Bei den Windkriterien bestehen vor allem wegen der Berechnung der Sturmbewegung noch viele Probleme, obwohl diese Kriterien theoretisch gut begründet sind (siehe Abbildung 6.13). Bei der Anpassung der Ellipse bestehen noch gewisse Schwierigkeiten, wenn einzelne Gewitterzellen zu nahe beisammen liegen. Für isolierte Gewitterzellen ist die Orientierung der Ellipse aber stabil. Ob die an einem Beispiel beobachtete Drehung der Ellipse während einer Zellteilung immer stattfindet, wäre noch zu untersuchen (siehe Abbildung 6.14).

Beim Vergleich verschiedener Regressionsmodelle hat sich gezeigt, dass ein Modell mit den

Kriterien 40 dBZ-Fläche, Sturmbewegung in Nord-Süd Richtung (SM_y) und Lebensdauer als erklärende Variablen die grösste aufgeklärte Varianz liefert (adjusted $R^2 = 0.523$). Auch bei den Skill Scores zeigt diese Regression die besten Resultate. Bei der Anwendung dieses Regressionsmodells ist jedoch Vorsicht geboten, da bis jetzt nur die Variable Lebensdauer auch physikalisch eindeutig interpretiert werden kann.

Möglichkeiten der operationellen Anwendung der Resultate dieser Arbeit, unter anderem die Verwendung eines Regressionsmodells ohne Lebensdauer, werden im Teil Ausblick dieses Kapitels weiter diskutiert.

7.2 Vorhersage von Superzellen

Hier sollen die Möglichkeiten, wie man die Bewegung von einmal identifizierten Superzellen vorhersagen könnte, kurz erläutert werden. Diese Diskussion folgt im wesentlichen dem von Klemp gegebenen Überblick (Klemp, 1987).

Um die in vielen Studien beobachtete Abweichung der Superzellen vom mittleren Wind zu erklären und vorherzusagen, gibt es verschiedene Ansätze welche hier kurz erklärt werden sollen.

Eine Möglichkeit zur Erklärung der abweichenden Bewegung von Superzellen ist der sogenannte Magnuseffekt. Die Superzelle wird darin als rotierender Zylinder betrachtet, der als Hindernis vom Umgebungswind umströmt wird. Rotiert der Zylinder zyklonal, entsteht auf der rechten Seite und hinten ein Unterdruck. Damit kann eine Verlagerung des Aufwindes nach rechts erkärt werden. Bei antizyklonaler Rotation des Zylinders entsteht der Unterdruck auf der linken Seite.

Mit numerischen Simulationen konnte gezeigt werden, dass dieselben Effekte, welche für die Zellteilung verantwortlich sind, auch zu einer Bewegung der Superzelle senkrecht zum mittleren Wind (Windscherung) führen. Das heisst, wie im Kapitel zu den dynamischen Grundlagen von Superzellen gezeigt, entstehen durch den schnell rotierenden Aufwind seitlich neue Tiefdruckzentren (siehe Gleichung 3.19). Dieser Effekt ist, wie in verschiedenen theoretischen Arbeiten untersucht, wichtiger als die Entstehung neuer Aufwindimpulse an der Böenfront. Raymond schlägt 1975 ein Wellenmodell zur Berechnung der Bewegung von Superzellen vor (Raymond, 1975). Der Grundgedanke dabei ist, dass durch die Konvektion in der Wolke Graviationswellen ausgelöst werden. Diese Graviationswellen führen zu einer Hebung von Luftmassen, in denen dann wieder Kondensation stattfindet. Zur Vorhersage der Sturmbewegung wird die instabilste Lösung der entsprechenden Wellengleichung verwendet.

Ein weiterer Ansatz zur Berechnung der Sturmbewegung resultiert aus der Idee, dass Superzellen, um eine grosse Lebensdauer zu erreichen, ihre Helicity optimieren müssen. Daraus resultiert für den Fall einer linearen Windscherung, Westwind nimmt mit der Höhe zu, eine einfache Formel, die auch die Windscherung des Umgebungswindes berücksichtigt, zur Berechnung der Bewegungskomponente senkrecht zum mittleren Wind c_y .

$$c_y = \pm \gamma \frac{dU}{dz} \quad (7.1)$$

$$\gamma = (1 + 2h^2/W^2)^{-1/2} \pi^{-1} \quad (7.2)$$

$\frac{dU}{dz}$ bezeichnet die vertikale Windscherung, h ist die Höhe des Aufwindes und W der Durchmesser des Aufwindes.

Mit dieser Formel könnte bei der in dieser Arbeit verwendeten Methode zur Verfolgung von

Superzellen dort wo die Windparameter berechnet werden auch eine Vorhersage der neuen Position einer Gewitterzelle für einen späteren Zeitpunkt gemacht werden. Die benötigte Windscherung kann beispielsweise aus einem VAD-Windprofil des ETH-Radars berechnet werden. Eine solche Prognose könnte dann mit den tatsächlich beobachteten Positionen verglichen werden.

7.3 Ausblick

Die in dieser Arbeit verwendete Methode kann dazu benutzt werden, bei Gewitterlagen Radarbilder in Echtzeit einzulesen und zu betrachten. Im aktuellen Radarbild werden automatisch neu entstandene Gewitter gesucht und bereits vorhandene Zellen verfolgt. Am Bildschirm lassen sich Übersichtsbilder mit den Positionen der zur Zeit vorhandenen Gewitter sowie Ausschnittsbilder der einzelnen Zellen darstellen. In dieser Arbeit wurde nur die Reflektivität dargestellt, die Dopplergeschwindigkeit wird aber vom ETH-Radar ebenfalls gemessen und die entsprechenden Bilder können am Bildschirm dargestellt werden. Dies ist interessant, um in den oben erwähnten Ausschnittsbildern je nach Höhe, in welcher der Radarstrahl das Gewitter durchquert, nach Mesozyklonen, Divergenz- oder Konvergenzstrukturen zu suchen.

Nach einer Optimierung des bis jetzt nur auf einzelne ausgewählte Tage angewendeten Algorithmus könnten nicht nur die Radarbilder in Echtzeit dargestellt sondern auch die verschiedenen Kriterien laufend berechnet werden. Die extern ausgeführten Berechnungen von Mittelwerten und Standardabweichungen müssten allerdings noch eingebaut werden. Wie gezeigt werden konnte, eignen sich viele Parameter aus der Gruppe der einfachen Kriterien wie das Hagelkriterium, das Stationaritätskriterium, die Lebensdauer sowie die mittlere und maximale Reflektivität recht gut zur Erkennung von Superzellen. Vor der Anwendung der Windkriterien muss sicher die Berechnung der Sturmbewegung zuerst verbessert werden. Um die Ellipsenkriterien zu optimieren müsste die Berechnung der angepassten Ellipse insbesondere während Teilungs- und Verschmelzungsereignissen überarbeitet werden. Möglicherweise ist eine andere Berechnungsmethode, wie sie beispielsweise von Schmid verwendet wurde, besser geeignet (Schmid, 1998). Eine andere Frage ist, ob nicht die an einem Beispiel beobachtete Drehung der Ellipse bei einer Zellteilung allgemein zur Identifikation von solchen Ereignissen verwendet werden kann. Zur Abklärung sind allerdings weitere Tests und Betrachtungen der vorhandenen Daten nötig.

Ein gutes Regressionsmodell zur Klassierung von Gewitterzellen anhand weniger Kriterien konnte in dieser Arbeit noch nicht abschliessend festgelegt werden. Die Regressionsgleichung 5.1 muss vor einer Anwendung noch mit unabhängigen Daten getestet werden. Ausserdem ist die in diesem Modell enthaltene Lebensdauer zur Echtzeitklassierung von Gewitterzellen nicht verwendbar. Es wäre aber interessant ein solches Modell zu haben, da die Anzahl der zu berechnenden Parameter damit stark reduziert und eine fortlaufende Klassierung von vorhandenen Gewitterzellen möglich wird. Zur operationellen Erkennung von Superzellen eignet sich deshalb das zweite Regressionsmodell mit den vier unabhängigen Variablen 40 dBZ -Fläche, Standardabweichung der 40 dBZ -Fläche, mittlere Reflektivität und Schwankung in der Orientierung der Ellipse besser, auch wenn die aufgeklärte Varianz (adjusted $R^2 = 0.321$) kleiner ist (siehe Gleichung 6.1). Sind die Superzellen einmal identifiziert, kann parallel zur Berechnung der Windkriterien mit der Helicity-Formel 7.1 für die Bewegung senkrecht zum COTREC-Wind eine Vorhersage der Position zu einem späteren Zeitpunkt gemacht werden. Vor einer operationellen Anwendung dieser Vorhersagemethode müssen aber verschiedene Tests ausgeführt und die grösstmögliche Vorhersagezeit bestimmt werden.

Literaturverzeichnis

- Bentley, M., Buban, M., and Cooper, S. (2002). A Multiscale Observational Case Study of the Development of an Isolated High Plains Tornadic Supercell. *Weather and Forecasting*, 17:1268–1276.
- Bunkers, M. (2002). Vertical Wind Shear Associated with Left-Moving Supercells. *Weather and Forecasting*, 17:845–855.
- Fankhauser, J. (1971). Thunderstorm-Environment Interactions Determined from Aircraft and Radar Observations. *Mon. Wea. Rev.*, 99(3):171–192.
- Grasso, L. and Hilgendorf, E. (2001). Observations of a Severe Left Moving Thunderstorm. *Weather and Forecasting*, 16:500–510.
- Hartung, J. and Elpelt, B. (1992). *Multivariate Statistik*. R. Oldenburgverlag Muenchen Wien, 4. auflage edition.
- Holton, J. (1992). *An Introduction to Dynamic Meteorology*, volume 48. Academic Press Limited.
- Houze, R., Schmid, W., Fovell, R., and Schiesser, H.-H. (1993). Hailstorms in Switzerland: Left Movers, Right Movers, and False Hooks. *Monthly Weather Review*, 121:3345–3369.
- Hunrieser, H. (1995). *Zur Bildung, Verteilung und Vorhersage von Gewittern in der Schweiz*. PhD thesis, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH).
- Kaltenböck, R. (2003). The Outbreak of Severe Storms along Convergence Lines Northeast of the Alps. Case Study of the 3 August 2001 Mesoscale Convective System with a Pronounced Bow Echo. *Atmospheric Research*, 70:55–75.
- Klemp, J. (1987). Dynamics of Tornadic Thunderstorms. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 19:369–402.
- Klemp, J. and Wilhelmson, R. (1978). The Simulation of Three-Dimensional Convective Storm Dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 35:1070–1097.
- Mecklenburg, S., Joss, J., and Schmid, W. (2000). Improving the Nowcasting of Precipitation in an Alpine Region With an Enhanced Radar Echo Tracking Algorithm. *Journal of Hydrology*, 239:46–68.
- Moller, A., Doswell, C., Foster, M., and Woodall, G. (1994). The Operational Recognition of Supercell Thunderstorm Environments and Storm Structures. *Weather and Forecasting*, 9:327–346.

- Nielson-Gammon, J. and Read, W. (1994). Detection and Interpretation of Left-Moving Severe Thunderstorms Using the WSR-88D: A Case Study. *Weather and Forecasting*, 10:127–139.
- Oker, B. (stand 2004a). Auswertung der Radarbilder des ETH Doppler Radars. http://62.202.7.134/hpbo/ethdr_auswertung.aspx.
- Oker, B. (stand 2004b). Sounding Referenz. http://62.202.7.134/skywarn/edu_sounding.aspx.
- Raymond, D. (1975). A Model for Predicting the Movement of Continuously Propagating Convective Storms. *J. Atmos. Sci.*, 32:1308–1317.
- Rinehart, R. (1992). *Radar for Meteorologists*. Department of Atmospheric Sciences, Center for Aerospace Sciences, University of North Dakota , second edition.
- SAS Institute (1999). StatView Reference. www.statview.com.
- Schmid, H. (1998). *Hagelvorhersage mit Radar: Wolkenphysikalische Untersuchungen und ein statistisches Vorhersagemodell*. PhD thesis, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH).
- Schmid, W. and Lehre, M. (1998). Drainage Flow: A Key Factor for Prediction of Severe Storms Near Mountain Chains? pages 22–25. 19th Conf. on Severe Local Storms.
- Schmid, W. and Schiesser, H.-H. (1990). Severe Left-Moving Hailstorms in Central Switzerland. volume Preprints Volume, pages 467–472. 16th Conf. on Severe Local Storms and the Conf. on Atmospheric Electricity.
- Schmid, W., Schiesser, H.-H., and Bauer-Messmer, B. (1997). Supercell Storms in Switzerland: Case Studies and Implications for Nowcasting Severe Winds with Doppler Radar. *Meteorol. App.*, 4:49–67.
- Schmid, W., Schiesser, H.-H., Furger, M., and Jenni, M. (1999). The Origin of Severe Winds in a Tornadic Bow-Echo Storm over Northern Switzerland. *Mon. Wea. Rev.*, 128:192–207.
- Schweizer Sturmforum (stand 2004). Hagelunwetter in Kriens vom 08.07.2004. <http://www.meteoradar.ch/forum/showthread.php?id1708&eintrag220>.
- TorDach (stand 2004). Karte der Superzellen in der Schweiz von 1600-2003. http://www.tordach.org/ch/karte_Superzellen_1600_2003.html.
- University of Illinois (stand 2004). Radar Meteorology, Online Remote Sensing Guide. [http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/rs/rad/home.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/rs/rad/home.rxml).
- Wüest, M. (2001). *Dealiasing Wind Information from Doppler Radar for Operational Use*. PhD thesis, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH).
- Wüest, M. (2003). Atmosphaeremphysik III, Radarmeteorologie - Mesometeorologie.

Dank

Als erstes möchte ich ganz herzlich Dr. Willi Schmid und Dr. Marc Wüest für die sehr gute Betreuung und schöne Zeit während meiner Diplomarbeit danken. Sie haben mich auch in etwas schwierigeren Zeiten immer unterstützt und sind mir mit fachlichen und anderen Ratschlägen zur Seite gestanden.

Dem ganzen Institut für Atmosphäre und Klima, insbesondere Prof. Hans Richner, möchte ich dafür danken, dass ich eine so interessante Diplomarbeit schreiben durfte. Die Arbeitsumgebung hier hat mir sehr gut gefallen. Alle Leute waren sehr geduldig und hilfsbereit und haben mir bei verschiedenen kleinen Problemen und Fragen immer weitergeholfen.

Bernhard Oker hat als unabhängiger Experte mit seiner sehr schnellen und guten Klassierung der Gewitterzellen die verschiedenen statistischen Tests meiner Kriterien erst möglich gemacht. Ich möchte ihm dafür und für die vielen tollen Datenauswertungen, Anleitungen und überhaupt all die tollen und sehr nützlichen Internetseiten zum Thema Gewitter danken.

Mischa Croci-Maspoli stellte mir die Vorlage zu dieser Arbeit zur Verfügung, so dass ich mich beim Schreiben des Berichtes im wesentlichen auf den Inhalt konzentrieren konnte. Das war für mich wirklich eine grosse Hilfe und ich möchte ihm dafür danken.

Timur Aka war während dem ersten Teil dieser Arbeit ein sehr netter Bürokollege und hat mir mit vielen Wertvollen Tips bei der Lösung von Programmierproblemen geholfen.

Ganz herzlich möchte ich schliesslich meinen Eltern für alles danken, für das was sie in dieser Zeit für mich getan haben. Ohne ihre Unterstützung während kritischen Zeiten wäre es mir nicht möglich gewesen, diese Arbeit zu vollenden.