Superzellen in Deutschland und ihre Folgen
Zwei Fallstudien aus dem Jahr 2009

Oliver Schlenczek [1,2,3]

10. März 2010

© 2010 Skywarn Deutschland e.V. und Autor(en)

Der Text steht unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitung 3.0 Lizenz. Nähere Informationen zu dieser Lizenz gibt es unter `http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode`. Die Nutzungsrechte an den übrigen Inhalten bleiben davon unberührt. Für die Verwendung von textfremden Inhalten bedarf es einer ausdrücklichen Zustimmung der jeweiligen Rechteinhaber.

[1] Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Physik der Atmosphäre
[2] European Severe Storms Laboratory (ESSL)
[3] Adresse des Autors: Max-Hufschmidt-Straße 13, 55130 Mainz; E-Mail: oliver.schlenczek@gmx.de

Inhaltsverzeichnis

1 Definition **1**

2 Grundlagen **2**

3 Erste Fallstudie: 11.04. 2009 **7**
3.1 Synoptik 8
3.2 Entwicklung und Besonderheiten 10
3.3 Beobachtungen und Unwetterschäden 11
3.4 Schlussfolgerungen 12

4 Zweite Fallstudie: 21.07. 2009 **13**
4.1 Synoptik 13
4.2 Entwicklung in Belgien 15
4.3 Entwicklung in Deutschland 17
4.4 Unwetterschäden 23
4.5 Zusammenfassung 24

5 Fazit **24**

Literatur **25**

Superzellen machen mit hoher Wahrscheinlichkeit nur einen geringen Prozentsatz aller konvektiven Zellen in Mitteleuropa aus, aber sie sind für die besonders schweren Unwetterereignisse zu einem sehr großen Anteil verantwortlich. Dies betrifft vor allem Unwetterschäden durch großen Hagel und starke Tornados, weniger solche durch Fallböen und Überflutungen. In dieser Arbeit werden zwei verdächtige Gewitterzellen näher untersucht, wobei die Entwicklung der Zellen, die aufgetretenen Unwetterschäden und die zur Verifikation verwendeten Methoden vorgestellt werden. Einer der beiden untersuchten Fälle ist in der Verifikation strittig, da nicht alle Indizien eine vollkommen sichere Verifikation zulassen. Dieser verdeutlicht auch die Schwierigkeiten bei der Untersuchung unklarer Fälle, insbesondere die Einschränkungen bei der Erkennung der Mesozyklone mit Hilfe eines Doppler-Radars.

Abbildung 1: Superzelle bei Watonga, OK am 13.05. 2009 (Foto: Oliver Schlenczek)

Abbildung 2: Typische Unwetterschäden nach einem Superzellengewitter (Fotos: Oliver Schlenczek)

1 Definition

Der Begriff der Superzelle wurde erstmals von K. A. Browning verwendet und bezeichnet eine besondere Erscheinungsform von starken konvektiven Stürmen, die relativ zum mittleren Wind nach rechts ziehen. Das wesentliche Element einer Superzelle ist die *Mesozyklone*; dabei handelt es sich um einen Luftwirbel innerhalb der konvektiven Zelle, der einen Durchmesser von etwa 2 km bis 10 km besitzt. Diese Mesozyklone lässt sich als Dipol-Signatur auf einem Doppler-Radar in der Polardarstellung der Radialgeschwindigkeit identifizieren. Ein Beispiel dazu ist in Abb. 3 dargestellt.

D. W. Burgess und C. A. Doswell III definieren 1993 eine Superzelle als eine konvektive Zelle, welche eine *hochreichende* und *beständige* Mesozyklone besitzt. Diese Begriffe sind relativ zu verstehen, wobei *hochreichend* eine vertikale Ausdehnung von mindestens einem Drittel der Mächtigkeit der Zelle bedeutet (bei Kaltluftgewittern sind dies etwa 2 km, bei sommerlichen Gewittern 4 - 5 km). *Langlebig* entspricht etwa der Dauer, die ein Luftpaket aus den bodennahen Schichten der Troposphäre benötigt um durch den konvektiven Aufwind bis in die Ambossregion zu gelangen (dies entspricht etwa 15 - 20 Minuten).

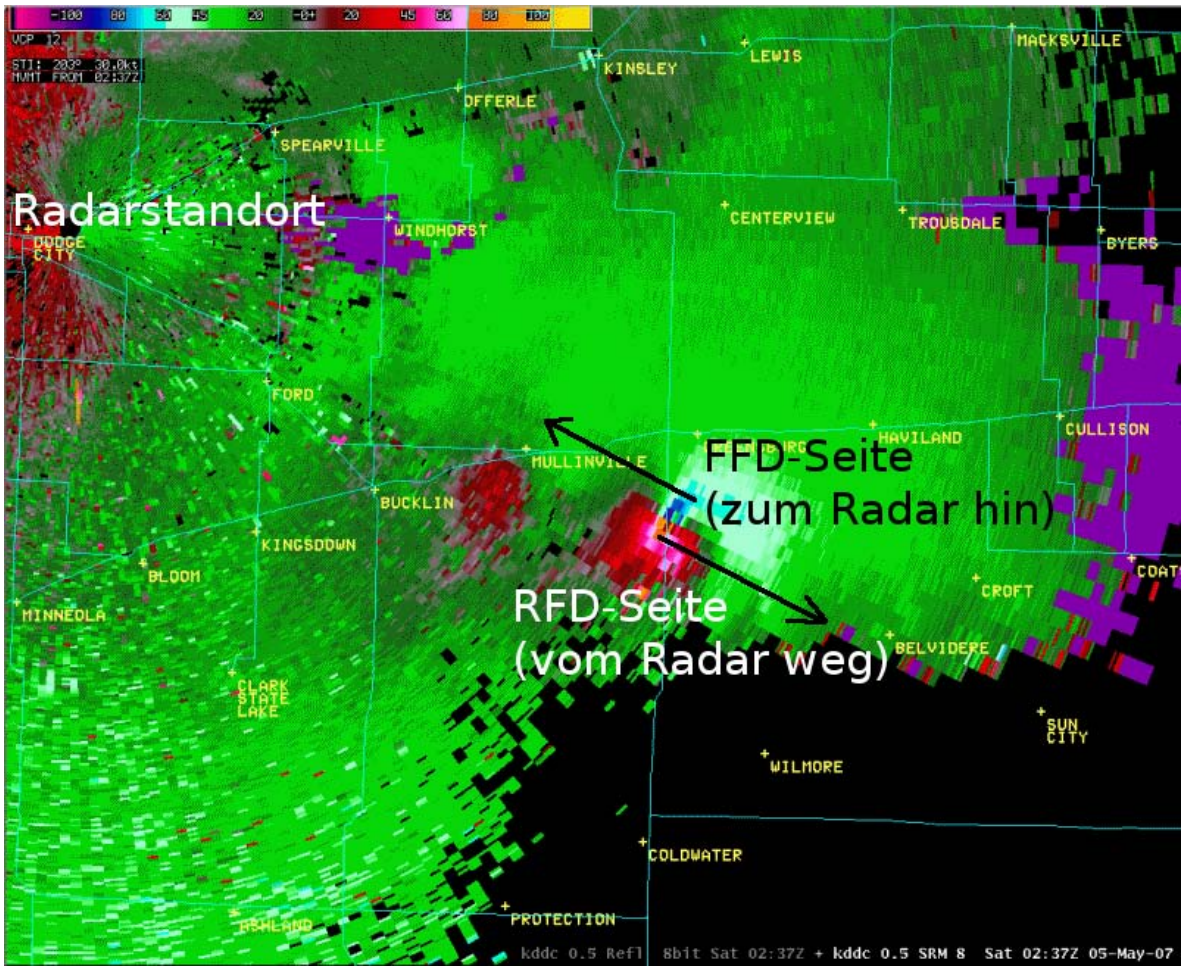

Abbildung 3: Mesozyklone der Superzelle, welche den EF5-Tornado bei Greensburg, KS am 05.05. 2007 hervorbrachte. Aus [14]

2 Grundlagen

Damit sich Superzellen entwickeln können, sind bestimmte thermodynamische und kinematische Bedingungen notwendig. Jedes Gewitter - egal ob Superzelle oder nicht - benötigt folgende „Zutaten“ als notwendige Bedingungen:

- eine große Menge an Wasserdampf in den tiefen Schichten der Troposphäre
- ein bedingt instabil geschichtetes vertikales Temperaturprofil
- einen Mechanismus, der die Instabilität freisetzt (Hebung)

Die Bedeutung der Luftfeuchtigkeit für eine bedingt instabile Schichtung lässt sich am besten mit einem thermodynamischen Diagrammpapier erklären. Der in Abb. 4 gezeigte fiktive Radiosondenaufstieg soll als Beispiel dienen um den Effekt der Freisetzung von latenter Wärme zu veranschaulichen. Lässt man ein Luftpaket vom 1000 hPa - Niveau trockenadiabatisch auf 700 hPa abkühlen, so erreicht es eine Temperatur von etwa 0°C . Ist das Luftpaket aber mit Wasserdampf gesättigt, so steigt es feuchtadiabatisch auf und erreicht auf 700 hPa eine Temperatur von 17°C . Der resultierende Temperaturunteschied ist alleine durch die Freisetzung der Kondensationswärme bedingt.

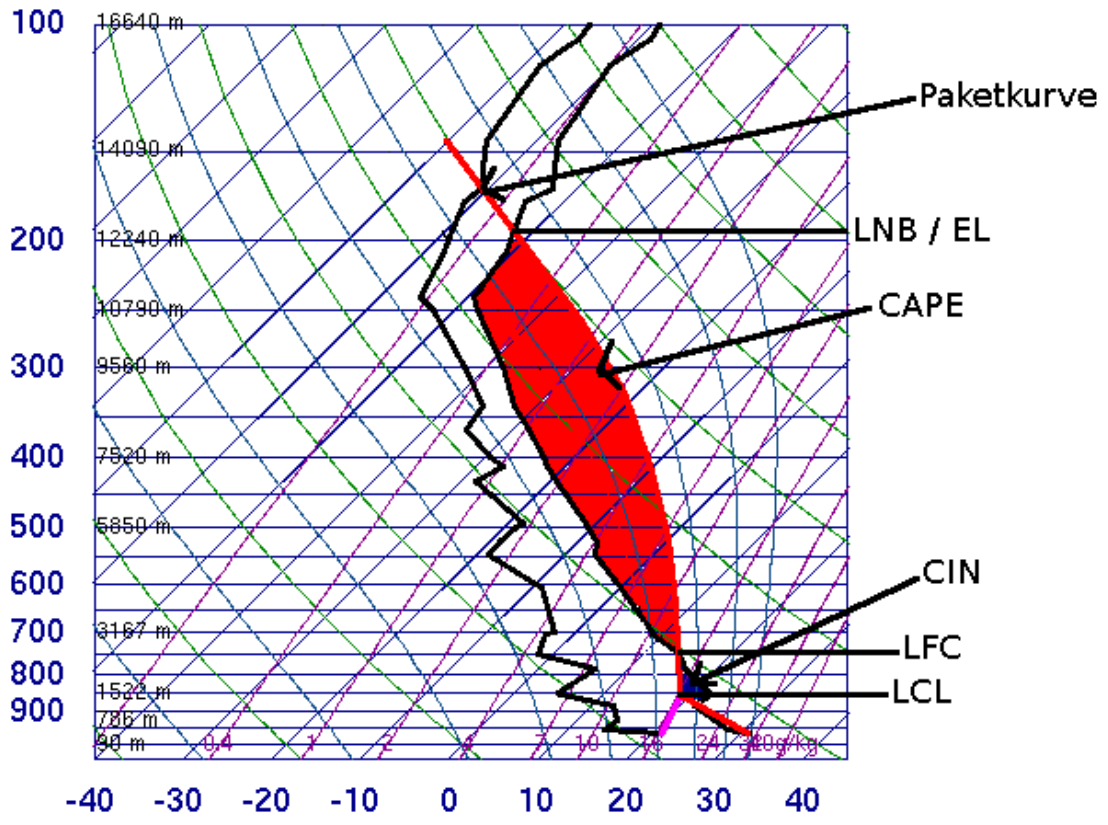

Abbildung 4: Typischer Radiosondenaufstieg bei einer bedingt instabilen Schichtung

Unter Verwendung des Paketmodells wird von einer bedingt instabilen Schichtung gesprochen, wenn die Temperatur eines gehobenen Luftpakets über eine bestimmte vertikale Distanz höher ist als die Umgebungstemperatur. In Abb. 4 startet ein Luftpaket aus dem 950 hPa - Niveau mit einer Temperatur von etwa 30°C und einem Taupunkt von 19°C und würde sich trockenadiabatisch abkühlen, bis es Sättigung erreicht. Das Hebungskondensationsniveau (LCL) liegt in einer Höhe von etwa 1500m, entsprechend dem Druckniveau von 850 hPa. Auf der Strecke zwischen 850 hPa und 750 hPa ist das Paket kälter als die Umgebung. Die zwischen der Paketkurve und der Umgebungstemperatur eingeschlossene Fläche entspricht derjenigen Energie, die aufgewendet werden muss um das Paket zum Niveau der freien Konvektion anzuheben, welches sich etwa bei 750 hPa befindet. Diese Energie heißt *konvektive Hemmung* (engl. Abkürzung CIN). Ab diesem Punkt führt die Freisetzung von latenter Wärme dazu, dass das aufsteigende Paket zu jeder Zeit wärmer ist als die Umgebung, bis es etwa einen Druck von 195 hPa erreicht. Die zwischen dem Gleichgewichtsniveau (LNB / EL) und dem Niveau der freien Konvektion (LFC) eingeschlossene rot markierte Fläche entspricht der Energie, die das aufsteigende Luftpaket beschleunigt. Sie trägt den Namen *konvektiv verfügbare potentielle Energie* (engl. Abkürzung CAPE). In erster Näherung erreicht der Aufwind etwa eine Maximalgeschwindigkeit nahe des Gleichgewichtsniveaus, die der Wurzel aus $2 \cdot \mathrm{CAPE}$ entspricht (siehe dazu z.B. Houze). Die tatsächliche Höhe des überschießenden Zentrums des Aufwindturms (overshooting top) liegt höher, da das Luftpaket mit einer hohen Geschwindigkeit (ca. 30 - 100 m/s) das LNB passiert und erst bei weiterem Aufstieg durch die stabile Schichtung oberhalb der Tropopause verzögert wird. Ein Auto benötigt aus voller Fahrt einen bestimmten Bremsweg, bis es steht und genau dasselbe gilt auch für den konvektiven Aufwind.

Damit es überhaupt zur Entwicklung von einem Cumulus oder Cumulonimbus kommt, ist im Allgemeinen ein äußerer Antrieb notwendig, der die Energie zur Überwindung der CIN-Schwelle liefert. Gemäß der Kontinuitätsgleichung genügt dafür ein konvergentes Windfeld in den unteren Schichten der Troposphäre, das aufgrund der Massenerhaltung für einen erzwungenen Aufwind sorgt. Es gibt eine Reihe von Mechanismen, die eine solche Konvergenz am Boden erzeugen können, dazu gehören unter anderem Gebiete mit starken horizontalen Temperaturgegensätzen in der Nähe eines Tiefdruckzentrums (Fronten). Insbesondere bei windschwachen Großwetterlagen und wenig CIN kann aber auch eine lokale positive Temperaturanomalie genügen. Weitere Hebungsmechanismen sind die Vorderseiten von Höhentrögen oder auch Gebiete mit starker Warmluftadvektion in den tieferen Schichten der Troposphäre, da sie gemäß der Omega-Gleichung einen Aufwind durch differentielle Advektion zyklonaler Vorticity oder differentielle Warmluftadvektion erzwingen, welcher sich wiederum als konvergentes Windfeld am Boden bemerkbar macht. Die Anströmung von Gebirgszügen führt ebenfalls zu lokalen Aufwinden auf der Luvseite und Abwinden auf der Leeseite. Sobald das erste konvektive System Niederschlag produziert, kann es auch selbst neue konvektive Zellen in seiner Umgebung auslösen. Dafür ist zum einen die ausfließende Kaltluft nahe des Niederschlagskerns (engl. outflow), zum anderen die Erzeugung von Schwerewellen durch die zeitliche Änderung der Maximalgeschwindigkeiten im Aufwindturm verantwortlich.

Alle bisher diskutierten Prozesse sind Voraussetzung für die Entwicklung von hochreichender Feuchtkonvektion, d.h. sie sind noch keine hinreichenden Bedingungen für die Entstehung von Superzellen. Besonders wichtig ist die Intensität und vertikale Änderung der Höhenwinde (vertikale Windscherung), die dazu führen kann, dass sich in der Horizontalen so genannte „Wirbelstraßen“ oder Rotore bilden können. Die Erzeugung eines solchen Rotors durch eine lineare Zunahme des Höhenwinds ohne Änderung der Windrichtung ist in Abb. 5 dargestellt. Auf der linken Seite der Skizze ist die Länge des Windvektors als Funktion der Höhe dargestellt, zur Vereinfachung wird von einem linear mit der

Höhe zunehmenden Westwind ausgegangen. Etwa in der Mitte der Troposphäre ist die Geschwindigkeit zu finden, mit der sich eine konvektive Zelle im Mittel vorwärts bewegt, dies ist der rot markierte Vektor u^* . Um die Entstehung eines Rotors verstehen zu können, muss man sich in das Relativsystem der Gewitterzelle versetzen, z.B. indem man sich mit einem Heißluftballon auf der mittleren Höhe mit der Geschwindigkeit u^* nach Osten treiben lässt. Schaut man nach unten, so beobachtet man aus dieser Perspektive ein mit zunehmendem Abstand immer stärker werdenden Ostwind, während oberhalb des Ballons der Westwind mit steigender Entfernung vom Ballon immer weiter zunimmt. Ein solches Windprofil führt unweigerlich dazu, dass sich von Süden nach Norden orientierte Luftwirbel bilden, die sogenannten Rotore.

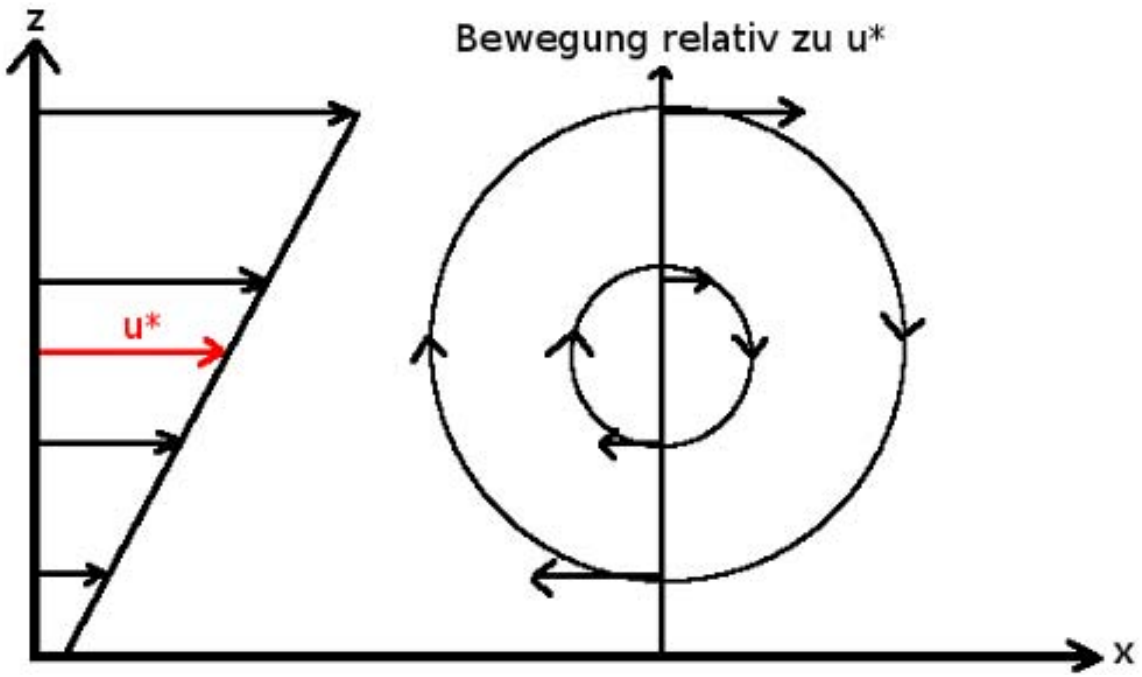

Abbildung 5: Entstehung horizontaler Wirbel durch vertikale Geschwindigkeitsscherung

Gelangt ein solcher Rotor in die Umgebung eines konvektiven Auf- oder Abwinds, so ändert die Wirbelachse ihre Orientierung. Sie wird bei einem Aufwind nach oben bzw. bei einem Abwind nach unten gekippt. Im Beispiel von Abb. 5 führt eine Aufrichtung der Wirbelachse auf der Nordseite des Gewitteraufwinds zu einem Wirbel mit vertikaler Achse, dessen Rotationsrichtung antizyklonal ist. Analog entsteht auf der Südseite ein zyklonaler Wirbel mit vertikaler Achse. Sobald die Zelle Niederschlag produziert, wird sich das Zentrum des Aufwindturms abschwächen und dort ein Abwind entstehen, der die Wirbelachse nach unten kippt. Dieser Mechanismus setzt die Teilung der Zellen (engl. storm split) in Gang und es entstehen zwei spiegelsymmetrische Superzellen: eine relativ zum mittleren Wind nach links ausscherende nördliche Zelle mit Meso-Antizyklone und eine relativ zum mittleren Wind nach rechts ausscherende südliche Zelle mit Mesozyklone. Dieser Mechanismus ist in Abb. 6 dargestellt. Im Falle einer Winddrehung mit der Höhe ändert sich das Bild und anstelle der Teilung von Zellen wird die Aufnahme zyklonaler Vorticity des südlichen Teils die Entstehung einer Mesozyklone bewirken. Der interessierte Leser findet eine mögliche Erklärung hierfür in [6] .

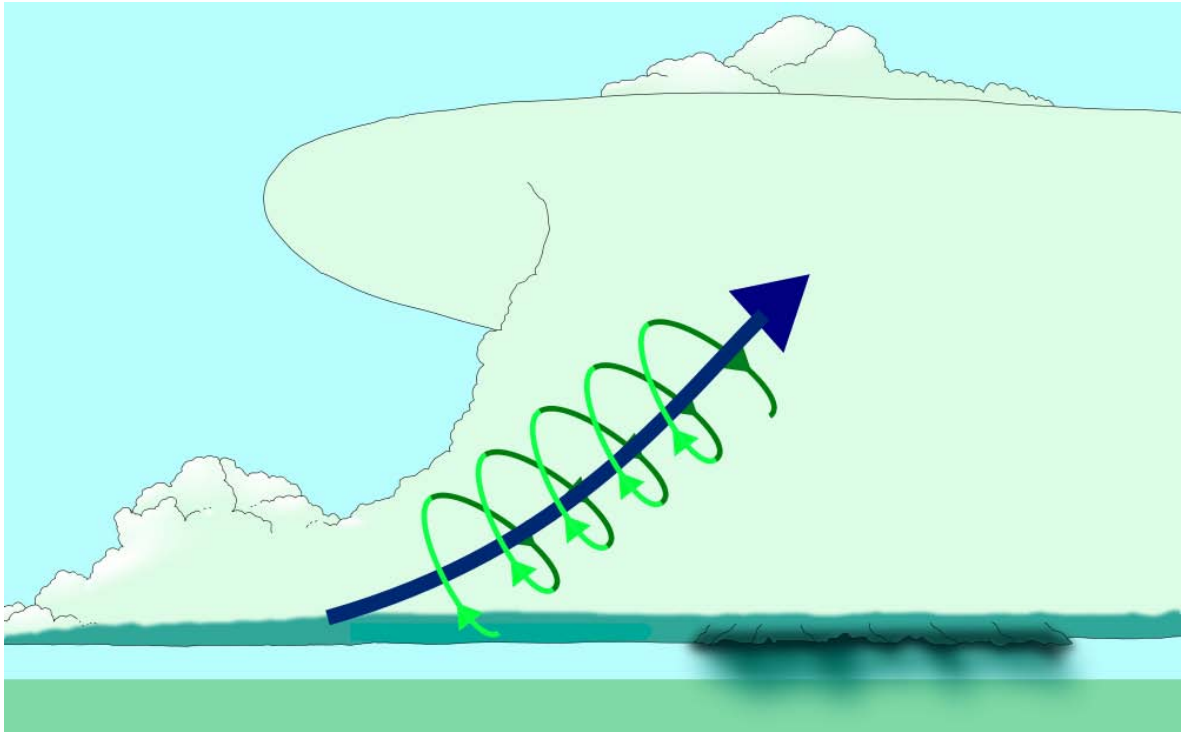

Abbildung 6: Kippen von horizontaler Vorticity in die Vertikale. Aus [15]

Die zuvor diskutierten notwendigen Bedingungen führen dazu, dass Superzellen bevorzugt bei ganz bestimmten synoptischen Konstellationen anzutreffen sind. Sowohl in Nordamerika als auch in Europa dominieren die zyklonal rotierenden Superzellen, da die Wahrscheinlichkeit für das Zusammentreffen von einer feuchten instabilen Schichtung, starken Höhenwinden und einem starken Hebungsantrieb im Warmsektor und nahe der Kaltfront von starken Tiefdruckgebieten am wahrscheinlichsten ist. Abb. 7 zeigt die geopotentielle Höhe der 500 hPa - Druckfläche zu einer Zeit, als in Sachsen und Brandenburg Superzellen entstanden. Das Gebiet mit den günstigsten Bedingungen ist eingekreist. Das zugehörige Temperaturfeld in 850 hPa lässt sich Abb. 8 entnehmen. Dies soll keine abschließende Klassifikation der Superzellenereignisse in Deutschland darstellen, sondern lediglich ein Beispiel für die synoptische Ausgangslage liefern.

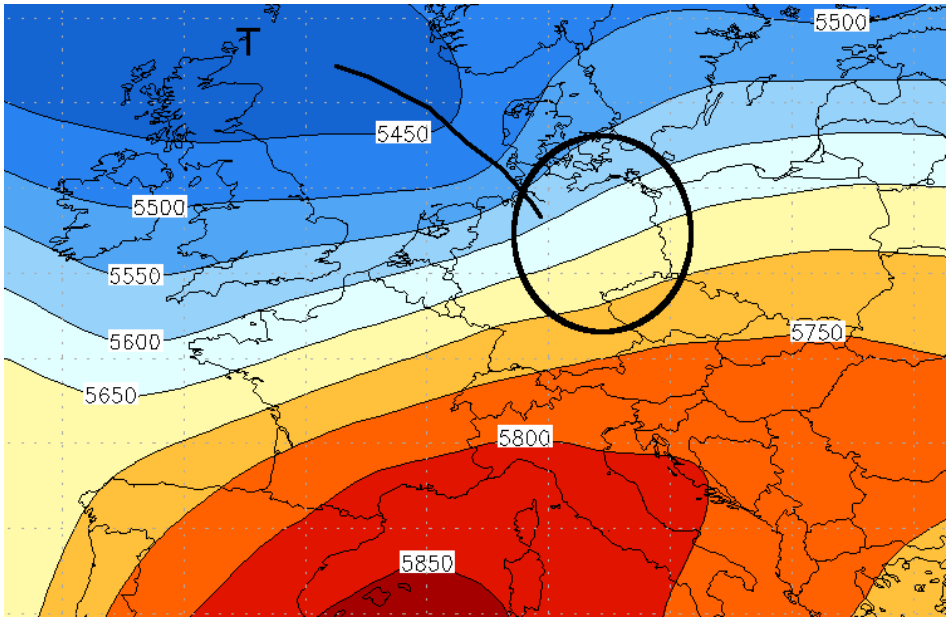

Abbildung 7: Geopotentielle Höhe auf 500 hPa am 21.05. 2009 (NOAA NCEP Analyse)

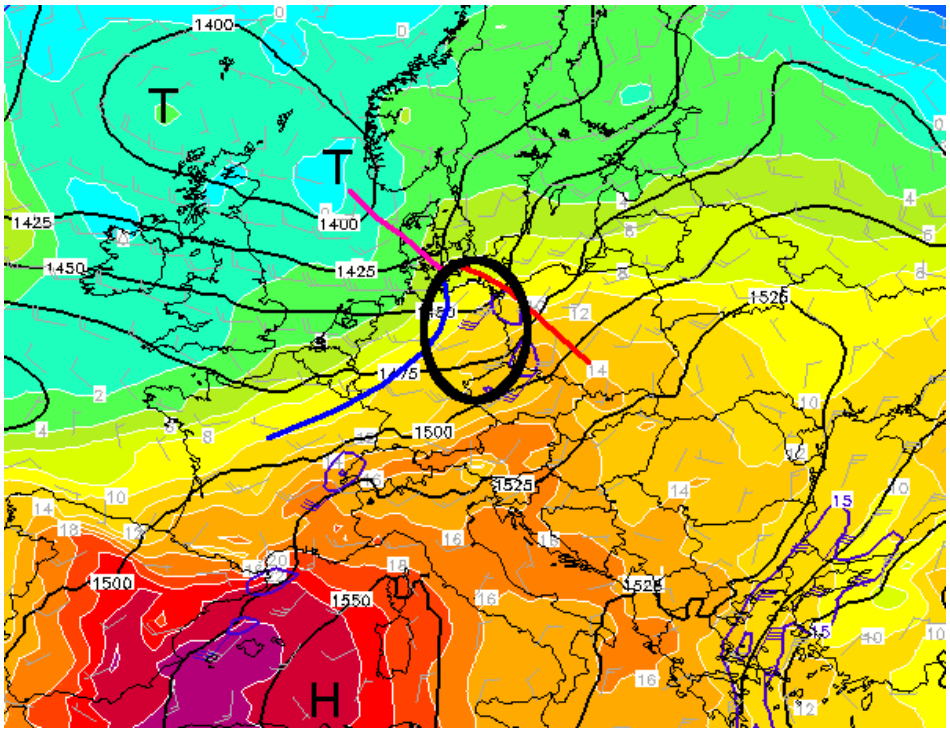

Abbildung 8: Temperatur auf 850 hPa am 21.05. 2009 (NCEP GFS Vorhersage, Pieter Groenemeijer)

Ein weiteres Beispiel für eine Wetterlage, bei der Superzellen aufgetreten sind, ist die Rückseite der Kaltfront eines sommerlichen Sturmtiefs; die Superzellen entstanden bevorzugt in der Nähe der Achse des Höhentrogs. Die zugehörigen Geopotential- und Temperaturfelder sind in Abb. 9 und 10 dargestellt.

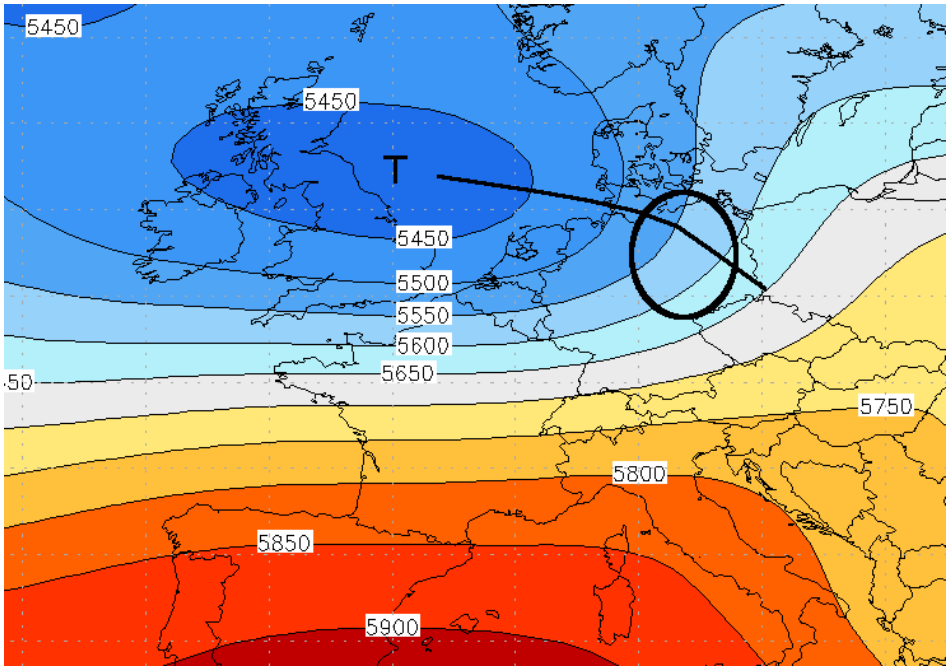

Abbildung 9: Geopotentielle Höhe auf 500 hPa am 23.06. 2004 (NOAA NCEP Analyse)

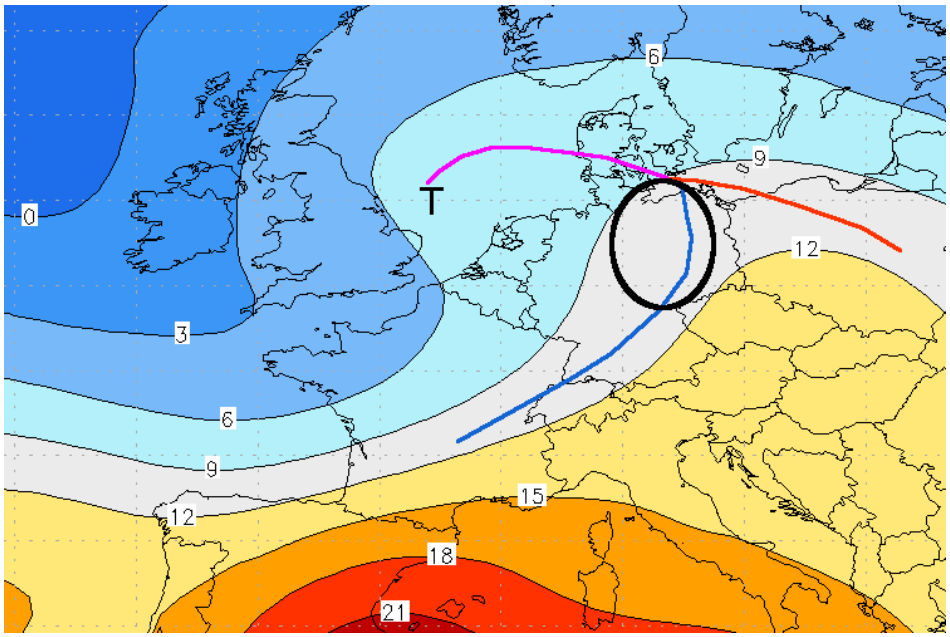

Abbildung 10: Temperatur auf 850 hPa am 23.06. 2004 (NOAA NCEP Analyse)

3 Erste Fallstudie: 11.04. 2009

Am 11. April 2009 entwickeln sich verbreitet konvektive Zellen über der Westhälfte Deutschlands, darunter auch ein Superzellenverdacht in der Nähe von Recklinghausen am späten Abend. Dieser Abschnitt wird den Fall näher beleuchten.

3.1 Synoptik

Charakteristisch für den 11. April 2009 ist ein großer Warmsektor über weiten Teilen Mitteleuropas. Atlantische Frontensysteme liegen zum Zeitraum der Gewitterentstehung fernab vom Ort des Geschehens. Der Bodenwind hat vorwiegend östliche Richtung, während der Höhenwind eine südliche Komponente besitzt. Insgesamt ist die vertikale Windscherung schwach ausgeprägt, sie erreicht von 0 - 6 km Höhe maximal 10 m/s .

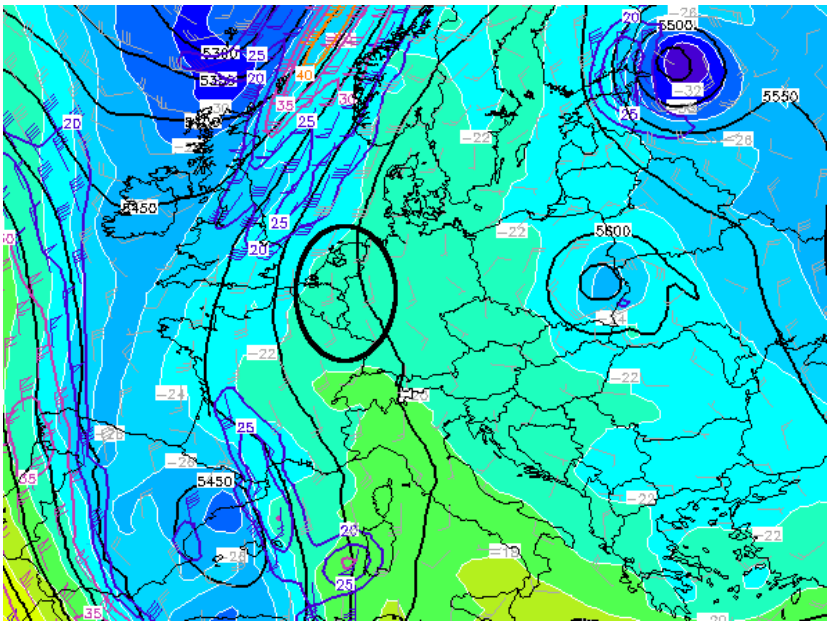

Abbildung 11: Geopotential auf 500 hPa am 11.04. 2009 (NCEP GFS, Pieter Groenemeijer)

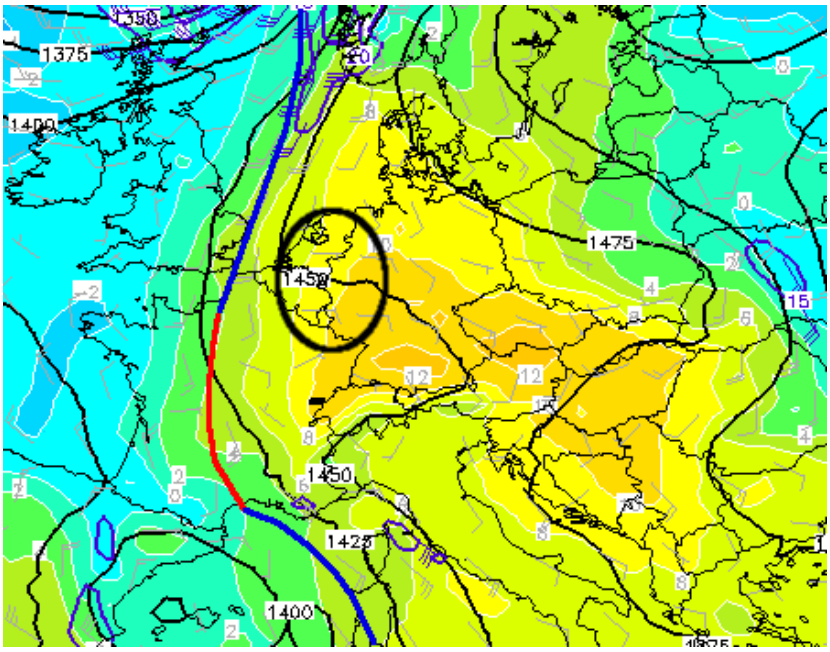

Abbildung 12: Temperatur auf 850 hPa am 11.04. 2009 (NCEP GFS, Pieter Groenemeijer)

Über Teilen Westdeutschlands und Beneluxstaaten ist die Schichtung instabil. In einer Umgebung mit etwa 10 m/s vertikaler Scherung von 0 - 6 km sind etwa 400 - 800 J/kg mixed layer CAPE verfügbar. Zum Zeitpunkt der konvektiven Auslöse gibt es keinen Radiosondenaufstieg aus der Umgebung der Zellen, daher wurde hier der etwa drei Stunden spätere Aufstieg bei Essen verwendet. Auffällig sind in diesem Radiosondenaufstieg (Abb. 14) die starke Richtungsscherung in den unteren 3 km sowie die daraus resultierende recht markante storm relative helicity von 188 m^2/s^2 . Da der Aufstieg nach den Gewittern erfolgte, ist die anfangs instabile Schichtung schon erheblich stabilisiert worden, es sind aber noch Reste der durchmischten Schicht oberhalb der Grenzschicht mit nahezu trockenadiabatischer Temperaturabnahme zu erkennen.

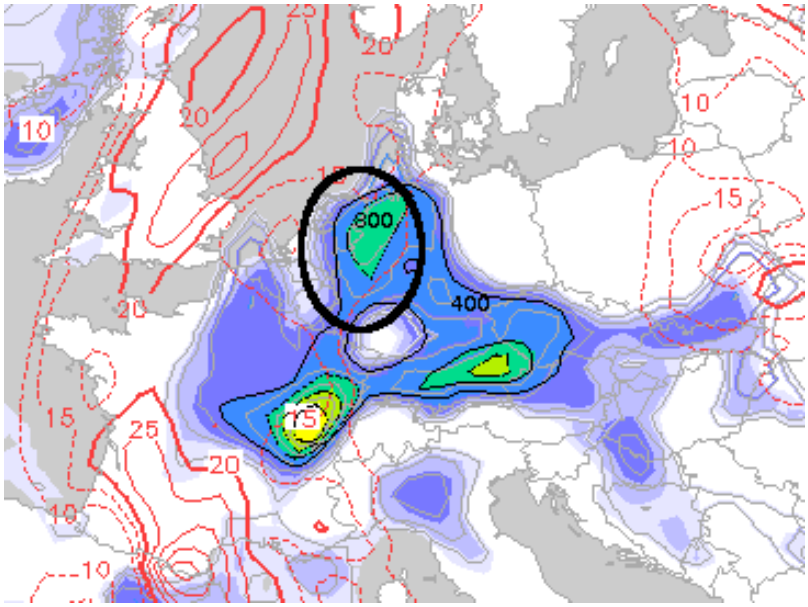

Abbildung 13: MLCAPE und Scherung am 11.04. 2009 (NCEP GFS, Pieter Groenemeijer)

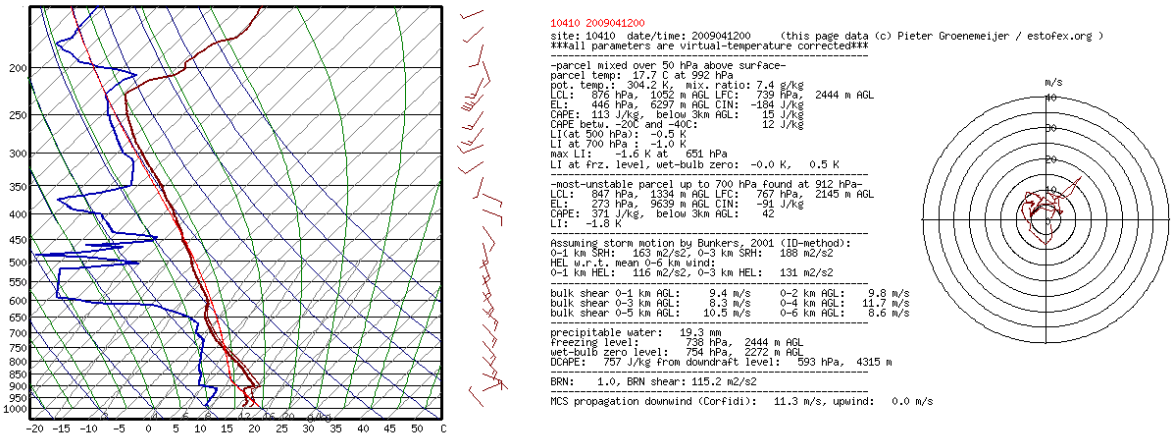

Abbildung 14: Radiosondenaufstieg Essen 12.04. 2009 00 UTC (Daten: Deutscher Wetterdienst, Aufbereitung: Pieter Groenemeijer)

Die synoptischen Bedingungen deuten nicht unbedingt auf eine hohe Superzellenwahrscheinlichkeit hin, aber aufgrund der starken vertikalen Richtungsscherung lässt sich dies nicht ausschließen. Dieser Fall gehört zu den Grenzfällen, bei denen eine Verifikation sehr schwierig ist.

3.2 Entwicklung und Besonderheiten

Bereits am späten Nachmittag entwickeln sich einige Gewitterzellen über Teilen von Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen. Die verdächtige Zelle entstand erst am späten Abend auf der Nordwestflanke einer eher schwach entwickelten Multizelle nahe Recklinghausen gegen 18:40 UTC. Etwa 20 Minuten später stieg die Radarreflektivität in den tieferen Schichten auf Werte bis 60 dBz an. Gleichzeitig ist eine Änderung der Verlagerungsrichtung zu beobachten; die Zelle zieht nun nicht mehr nach Nordosten, sondern in Richtung Nordnordost.

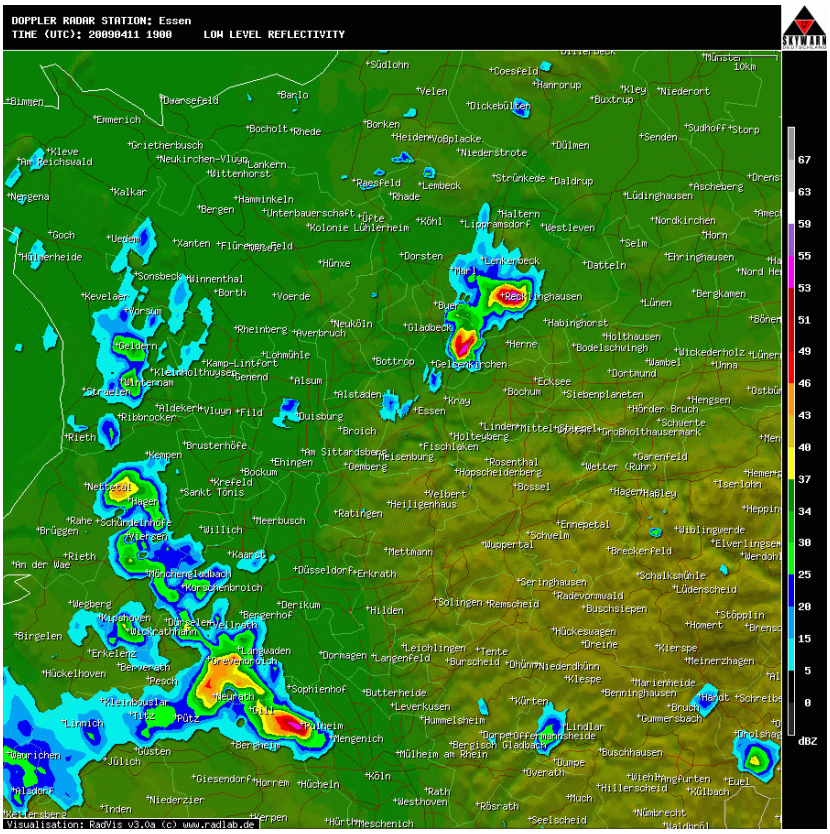

Abbildung 15: Low level reflectivity gegen 19:00 UTC (Daten: Deutscher Wetterdienst , Visualisierung: RadVis)

Etwa eine Stunde später gibt es ein Foto des offensichtlich im Uhrzeigersinn rotierenden Aufwindturms (Abb. 17); zu dieser Zeit ist allerdings die Signatur in der Radialgeschwindigkeit schwierig zu interpretieren. Es könnte sich um eine Meso-Antizyklone an der südlichen Spitze handeln; dies würde aber zur Konsequenz haben, dass der zweite Dipol weiter nördlich einer Mesozyklone entspricht. Vor und nach dieser Radarbeobachtung ist wegen Abschattung keine eindeutige Signatur erkennbar. Im Seitenaufriss der Radarreflektivität fehlt der superzellentypische Überhang (engl. *bounded weak echo region*), aber die höchsten Reflektivitäten über 55 dBz reichen bis in eine Höhe von etwa 8 km hinauf (Abb. 16)

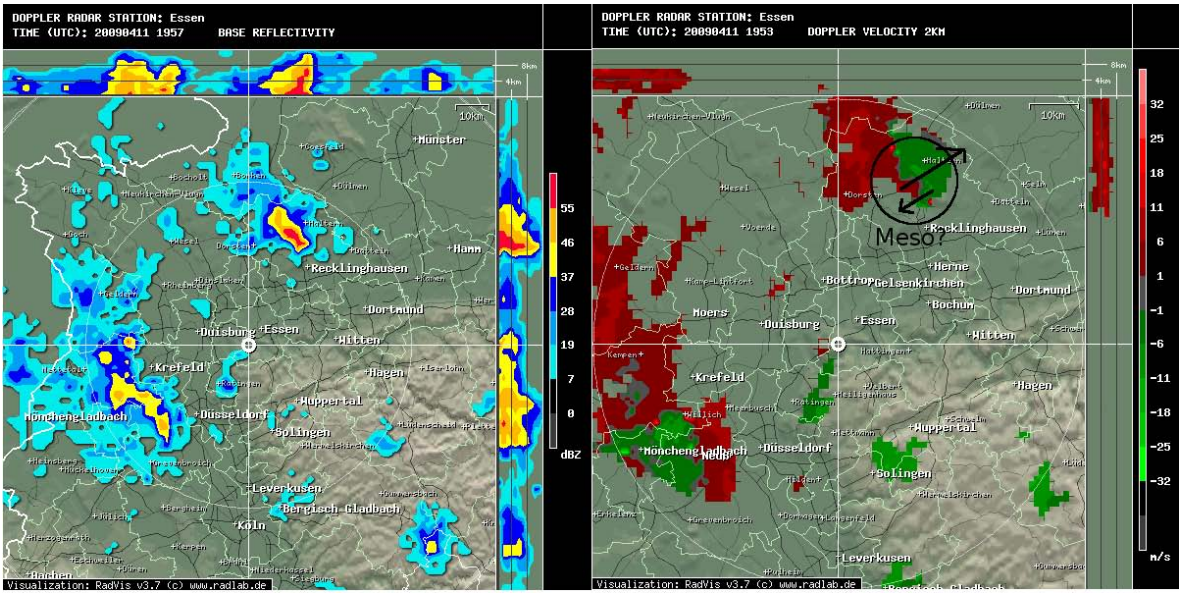

Abbildung 16: Radialgeschwindigkeit gegen 20:00 UTC (Daten: Deutscher Wetterdienst , Visualisierung: RadVis)

3.3 Beobachtungen und Unwetterschäden

Kurze Zeit vor der Aufnahme von Abb. 17 gibt es eine Unwettermeldung von Hagel mit Korngrößen bis 3 cm in der Nähe von Marl-Sinsen an der Autobahn 43 (AS 10). Es ist zu beachten, dass der Hagel zum Zeitpunkt der Meldung bereits länger als eine halbe Stunde liegt. Weitere Unwettermeldungen liegen bisher nicht vor.

Abbildung 17: Aufwindturm gegen 20:00 UTC (Foto: Daniel Plätz)

Abbildung 18: Hagel gegen 19:30 UTC (Foto: Patrick Wagner)

3.4 Schlussfolgerungen

Diese Zelle zieht in den nächsten zwei Stunden weiter in nordöstliche Richtung und löst sich schließlich bei Borken auf. Die ungefähre Zugbahn der Zellkerne ist in Abb. 19 dargestellt. Der letzte dargestellte Zeitschritt entspricht etwa 22:00 UTC. Trotz aller Unsicherheiten ist dieser Superzellenverdacht sehr plausibel, da die untersuchte Zelle eine verglichen mit den sonstigen Zellen sehr lange Lebensdauer von knapp 3 Stunden besitzt. Allerdings ist das Ausscheren aus der Hauptströmungsrichtung nach rechts für eine Zelle mit Rotation im Uhrzeigersinn sehr ungewöhnlich. Solche Zellen neigen im Allgemeinen dazu nach links auszuscheren und damit eine eher westliche als nördliche Zugbahn einzuschlagen.

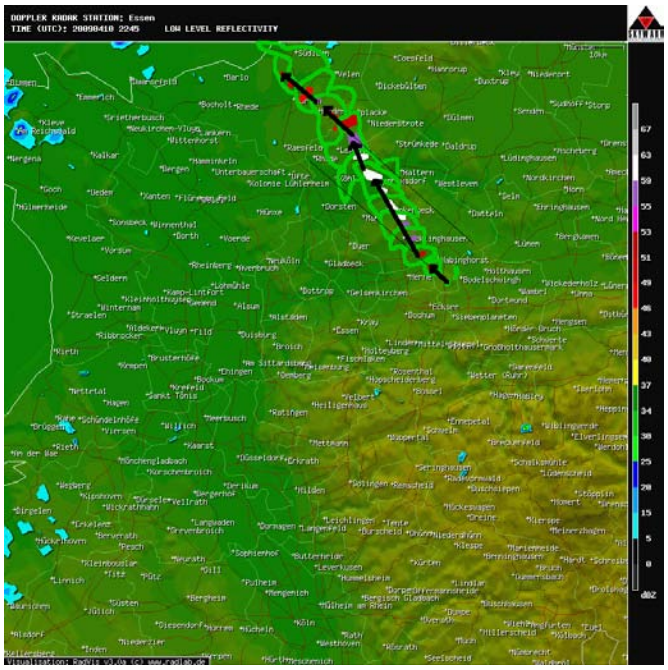

Abbildung 19: Zugbahn der Zelle (Daten: Deutscher Wetterdienst , Visualisierung: RadVis)

4 Zweite Fallstudie: 21.07. 2009

Am 21. Juli 2009 beginnt die Entwicklung erster starker Gewitter am späten Nachmittag in den Niederlanden. Die Gewitter breiten sich bis in die späten Nachtstunden ostwärts über Belgien und Westdeutschland aus. Eine besonders markante Zelle entsteht am südlichen Ende einer großen Multizelle, die sich im Laufe ihres Lebens zweimal teilt.

4.1 Synoptik

Im Gegensatz zur ersten Fallstudie befindet sich ein kurzwelliger Höhentrog in der Nähe der instabilen Luftmassen und es weht ein starker Westwind in der Höhe (etwa 20 m/s auf 500 hPa, siehe Abb. 20). Die Kaltfront des zugehörigen Tiefs liegt noch relativ weit westlich vom interessanten Gebiet, allerdings hat sich vorlaufend eine Konvergenzlinie über den Niederlanden und Belgien bilden können. Die Entwicklungen finden in einer heißen und feuchten Luftmasse statt.

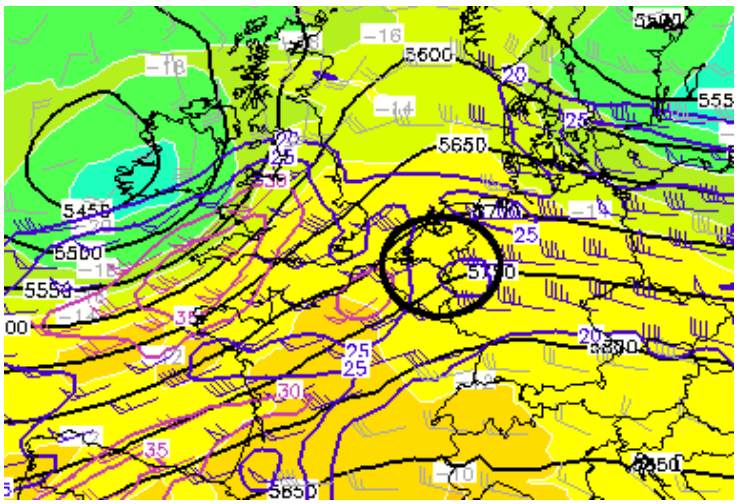

Abbildung 20: Geopotential auf 500 hPa am 21.07. 2009 15 UTC (NCEP GFS, Pieter Groenemeijer)

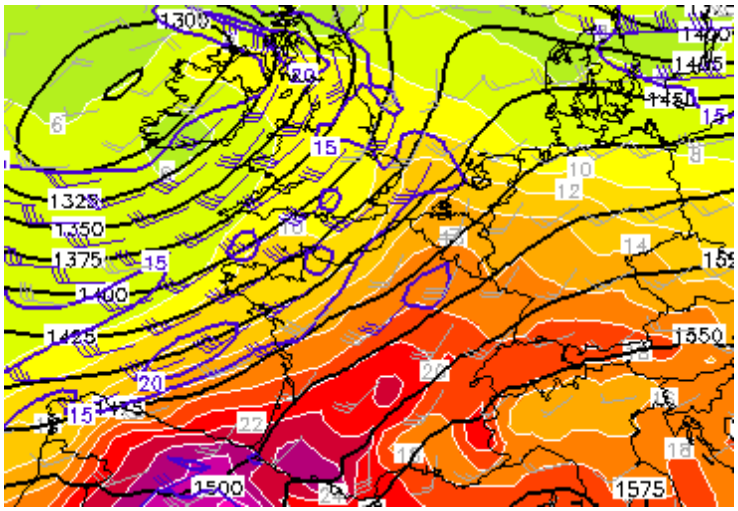

Abbildung 21: Temperatur auf 850 hPa am 21.07. 2009 15 UTC (NCEP GFS, Pieter Groenemeijer)

Im westlichen und nordwestlichen Sektor innerhalb der Warmluftmasse ist hohe Instabilität vorhanden. Die GFS-Vorhersage in Abb. 22 zeigt maximale Werte von etwa 1500 - 2000 J/kg MLCAPE (gelbe Kontur). Nahe der Spitze des Warmsektors über den westlichen Niederlanden - direkt an der Trogachse - ist die vertikale Windscherung besonders stark ausgeprägt. Von 0 - 6 km Höhe sind verbreitet Werte von 20 bis 30 m/s zu finden. Die Konvektionsauslösung wird ungefähr zu dieser Zeit im eingekreisten Gebiet beobachtet.

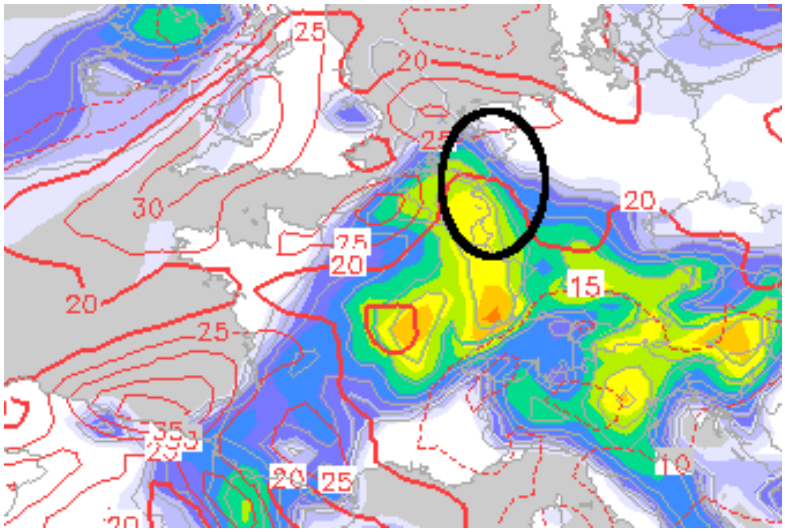

Abbildung 22: MLCAPE und Scherung am 21.07. 2009 15 UTC (NCEP GFS, Pieter Groenemeijer)

Der für die untersuchte Zelle nächst gelegene Radiosondenaufstieg ist derjenige von Idar-Oberstein gegen 18:00 UTC in Abb. 23. Er zeigt eine sehr instabile Schichtung mit etwa 2200 J/kg MUCAPE und starker rechtszirkularer Windscherung. Dieses Windprofil resultiert in etwa 300 m^2/s^2 storm relative helicity und begünstigt insbesondere die Entwicklung von Superzellen, die sich nach rechts bewegen (Rightmover). Viel CAPE zwischen der -20°C und -40°C - Isotherme erhöht auch bei Gewitterzellen ohne Mesozyklone die Wahrscheinlichkeit von großem Hagel deutlich, da im Gebiet mit reichlich unterkühltem Wasser starke Aufwinde zu erwarten sind.

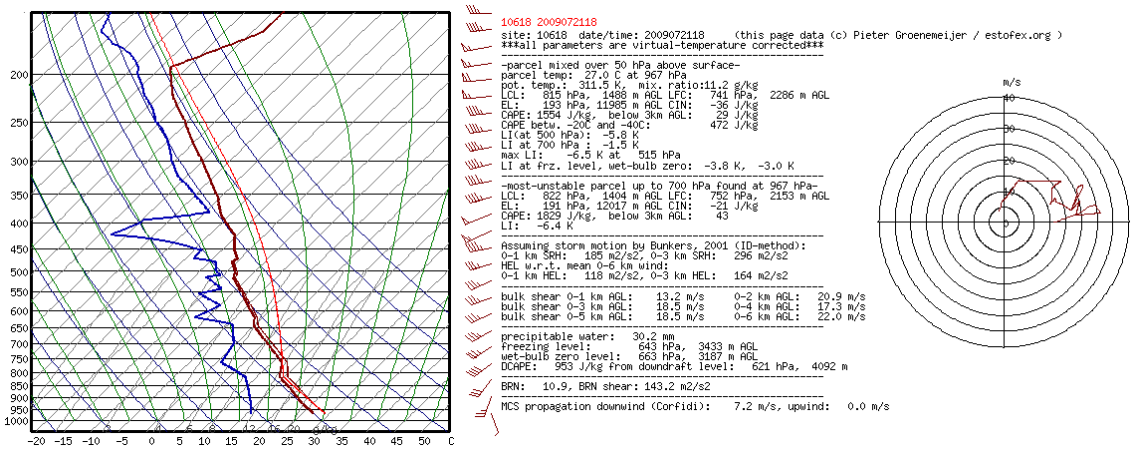

Abbildung 23: Aufstieg Idar-Oberstein am 21.07. 2009 18 UTC (Daten: Deutscher Wetterdienst, Aufbereitung: Pieter Groenemeijer)

Insgesamt sind die synoptischen Bedingungen als sehr günstig für die Entstehung von gut organisierten Gewitterzellen, vornehmlich Superzellen, zu bewerten.

4.2 Entwicklung in Belgien

Schon sehr kurze Zeit nach Beginn der Auslöse entsteht über dem Südwesten von Belgien eine kräftige Multizelle. Diese Zelle teilt sich auf ihrem Weg nach Osten zweimal, wobei der rechte Teil der Zelle die Oberhand gewinnt. Die Abbildungen 24 und 25 zeigen einige Schritte der Entwicklung der Zelle in Belgien.

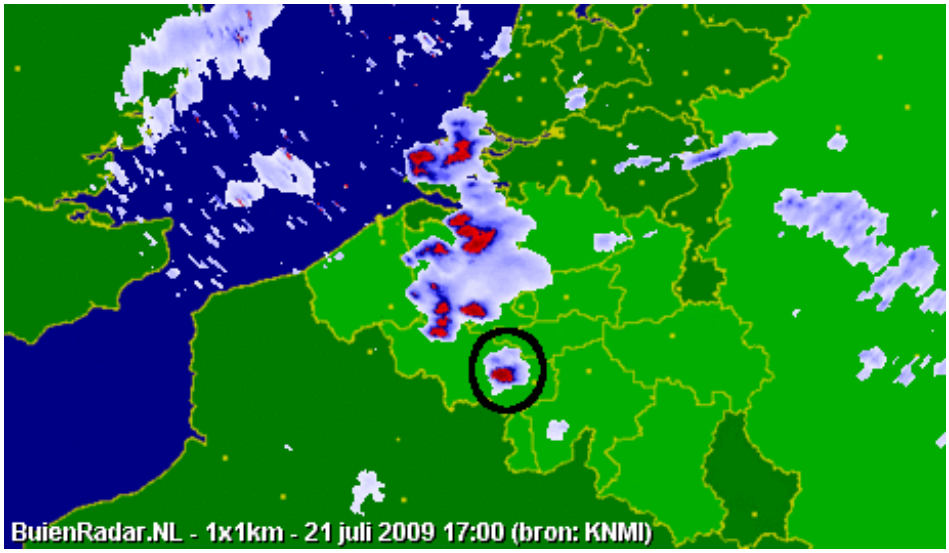

Abbildung 24: Radarreflektivität 15:00 UTC (`http://www.buienradar.nl`)

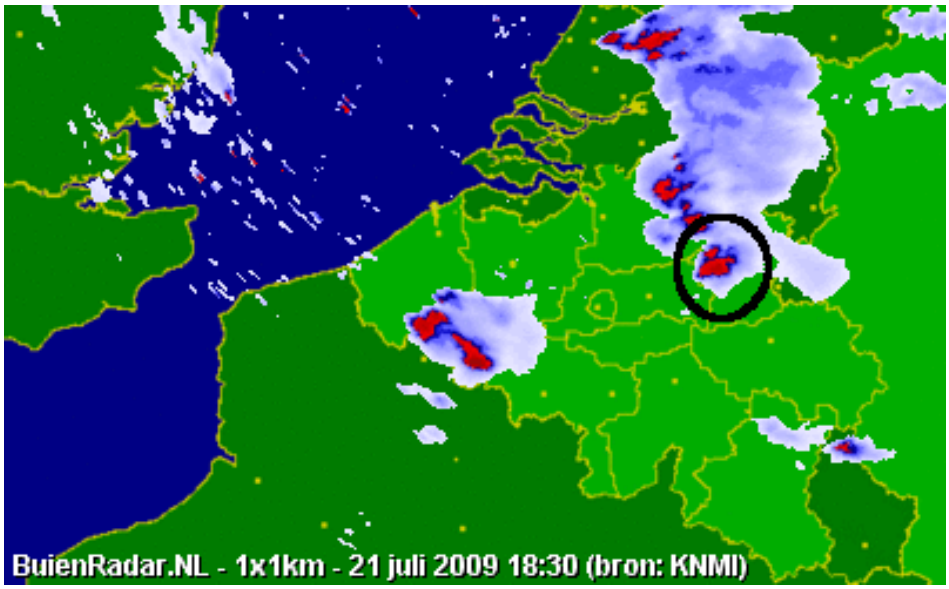

Abbildung 25: Radarreflektivität 16:30 UTC (`http://www.buienradar.nl`)

In Belgien produziert diese Zelle vor allem großen Hagel mit einem Durchmesser bis zu 6 cm als Begleiterscheinung. Vermutlich erreicht sie schon dort das Superzellenstadium. Kurz vor der Passage der deutsch-niederländischen Grenze nahe Sittard ist auf dem Radar andeutungsweise ein Hakenecho zu erkennen (siehe Abb. 26). Am äußersten Rand des vom Essener Radar abgedeckten Bereichs kann in der Radialgeschwindigkeit ansatzweise ein Dipol in der Nähe des Hakenechos erkannt werden. Auffällig ist, dass der typische Überhang (BWER) auch in diesem Fall nicht zu sehen ist, allerdings erreicht die Radarreflektivität im Volumenscan bis in über 8 km Höhe ein Maximum mit über 55 dBz.

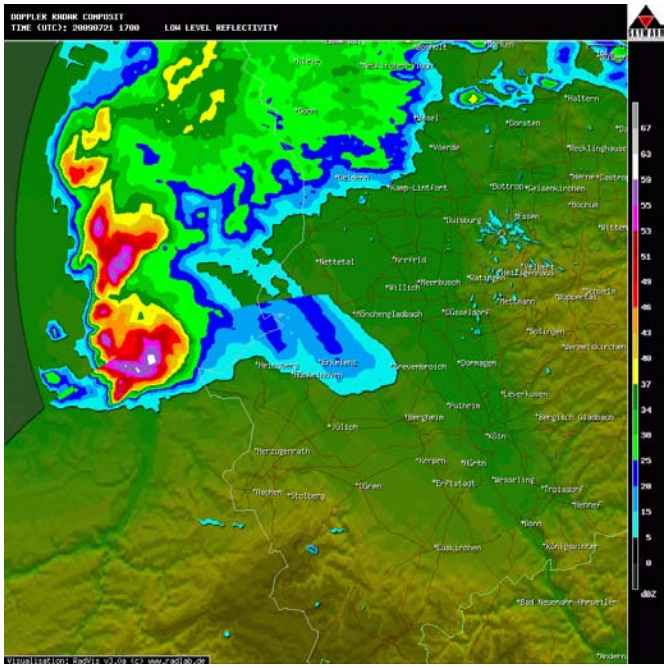

Abbildung 26: Reflektivität um 17:00 UTC (Daten: Deutscher Wetterdienst , Visualisierung: RadVis)

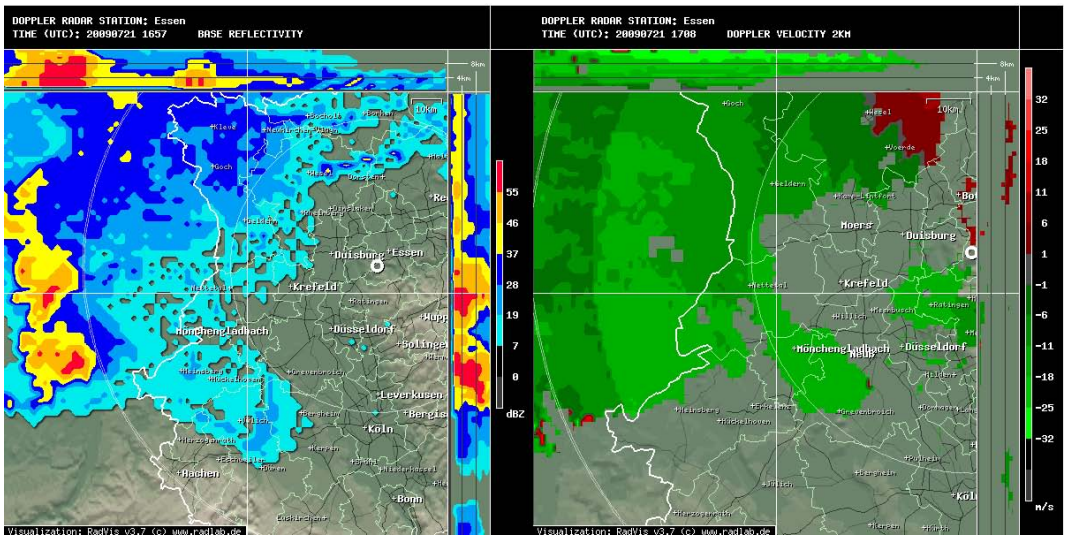

Abbildung 27: Radialgeschwindigkeit und Seitenaufriss um 17:00 UTC (Daten: Deutscher Wetterdienst , Visualisierung: RadVis)

4.3 Entwicklung in Deutschland

Eine halbe Stunde später befindet sich die Zelle etwa bei Heinsberg in Nordrhein-Westfalen. Sie wird zu dieser Zeit von mindestens drei Personen beobachtet und fotografiert, die Fotos sind in Abb. 29 dargestellt. Die Position der Beobachter ist auf Abb. 28 erkennbar. Auffällig ist die gut ausgeprägte Wallcloud etwa in der Mitte unten auf dem Foto von René Pelzer bzw. im rechten unteren Drittel auf dem Foto von Dennis Oswald. Alle Fotos wurden etwa zur gleichen Zeit aufgenommen und unterscheiden sich um maximal 7 Minuten.

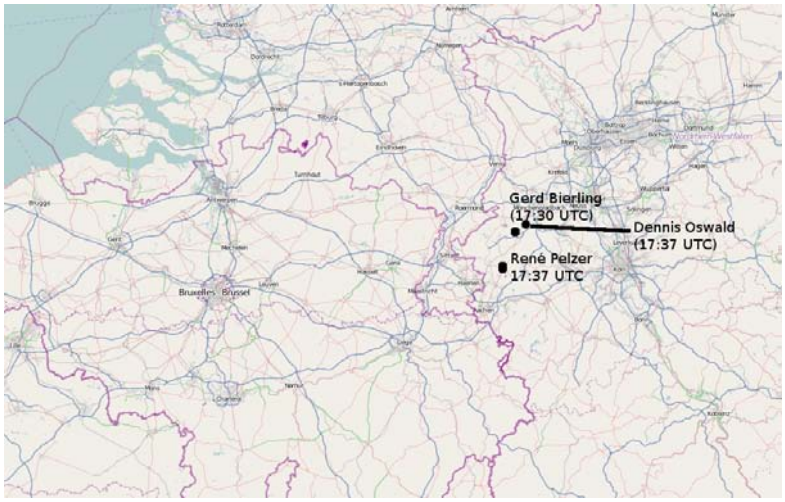

Abbildung 28: Position der Beobachter um 17:30 UTC (© http://openstreetmap.org)

Abbildung 29: Fotos der Beobachter um 17:30 UTC

Das Radar zeigt nun die höchsten Reflektivitäten in den bodennahen Schichten nahe Heinsberg. Der nach vorne gewölbte Niederschlagsbereich mit Reflektivitäten über 55 dBz ist der vorderseitige Abwindbereich (FFD), der einzelne violette Punkt südwestlich davon entspricht dem Niederschlag im rückseitigen Abwindbereich (RFD). Genau zu dieser Zeit gibt es einen möglichen Tornado bei Heinsberg (weiterführende Informationen hierzu finden sich unter [12] und [13]).

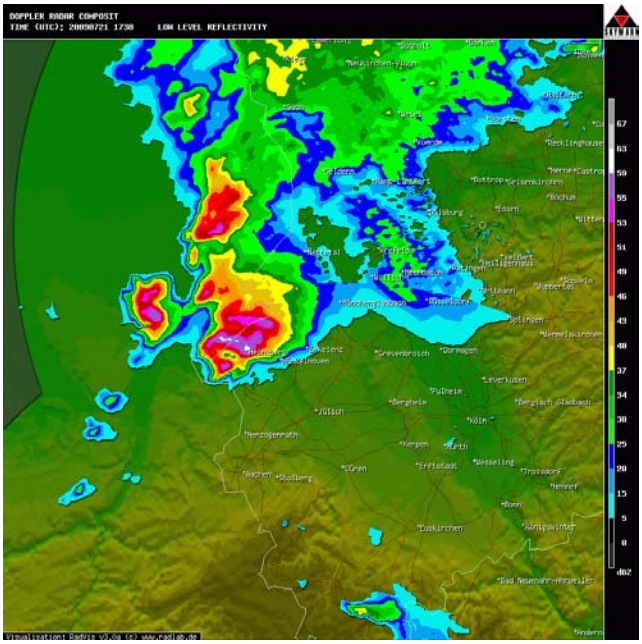

Abbildung 30: Radarreflektivität um 17:30 UTC (Daten: Deutscher Wetterdienst , Visualisierung: RadVis)

Zehn Minuten später ist die Signatur der Radarreflektivität ähnlich wie in Abb. 30 , doch nun ist in der Radialgeschwindigkeit ein Dipol deutlich erkennbar. Die Mesozyklone ist in Abb. 31 eingekreist.

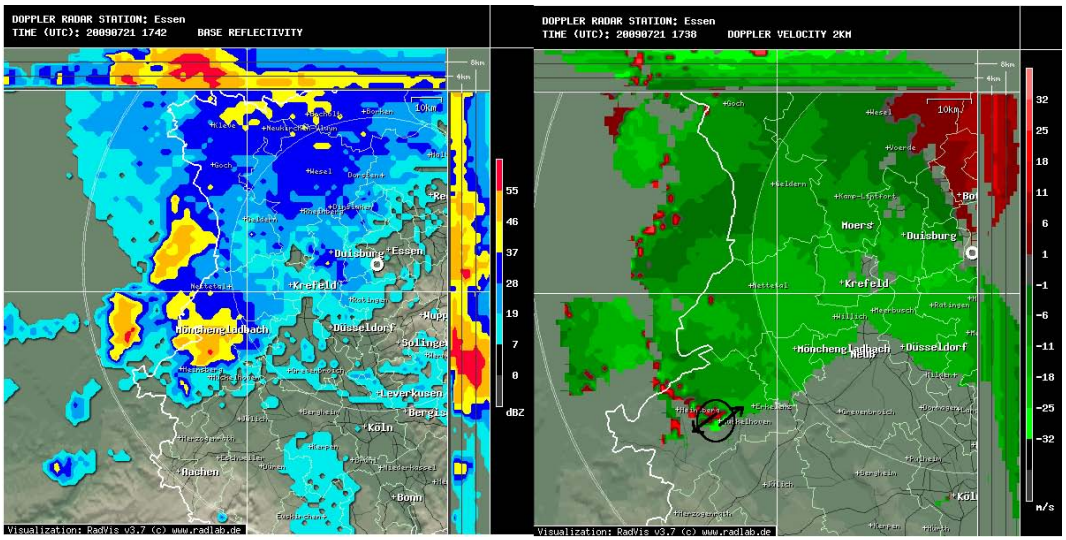

Abbildung 31: Radialgeschwindigkeit und Seitenaufriss um 17:40 UTC (Daten: Deutscher Wetterdienst , Visualisierung: RadVis)

Rein visuell hat sich die Zelle deutlich verändert: Die Wallcloud hat sich verbreitert und es reicht eine langgezogene Tailcloud von der Wallcloud in den Niederschlagsbereich hinein. Abb. 32 und 33 zeigen die Beobachtungspositionen und den Blick auf den Aufwindturm der Zelle. Etwa zu dieser Zeit wurde in Erkelenz einsetzender Hagelschlag mit Korngrößen zwischen 3 cm und 4 cm beobachtet.

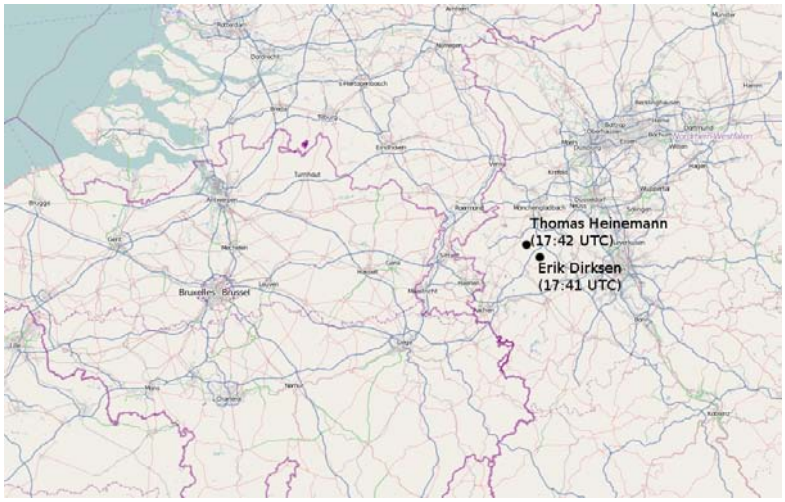

Abbildung 32: Position der Beobachter um 17:40 UTC (© http://openstreetmap.org)

Abbildung 33: Fotos der Beobachter um 17:40 UTC

Nachdem der Hagelkern die Gegend um Erkelenz überquert hat, ist aus der Gegend um Titz die Wallcloud besonders gut erkennbar. Weiter südlich verdeckt der Niederschlagskern den Blick auf die Aufwindregion. Auf dem Radar (Abb. 36) ist ebenfalls eine Veränderung zu beobachten: Der rückseitige Abwindbereich hat sich verstärkt und hebt sich kaum noch vom vorderseitigen Abwind ab. Diese Superzelle wechselt ihr Erscheinungsbild nun vom klassischen Stadium zum Stadium mit heftigen Niederschlägen (engl. *high precipitation supercell*).

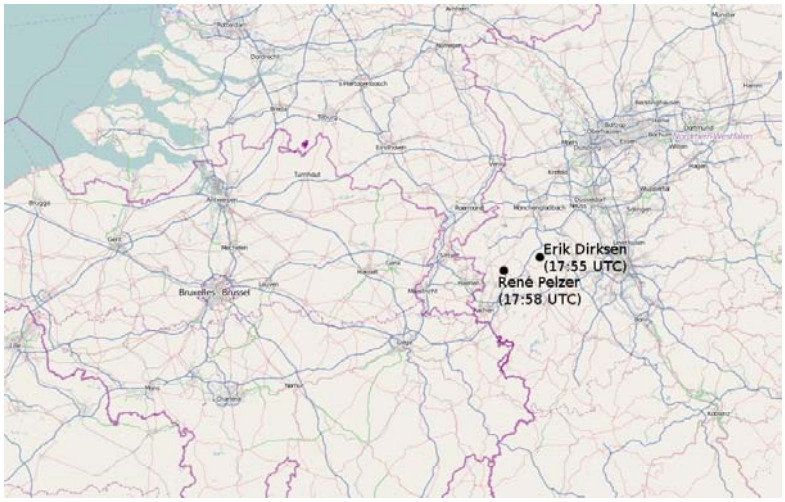

Abbildung 34: Position der Beobachter um 17:40 UTC (© http://openstreetmap.org)

Abbildung 35: Fotos der Beobachter um 17:40 UTC

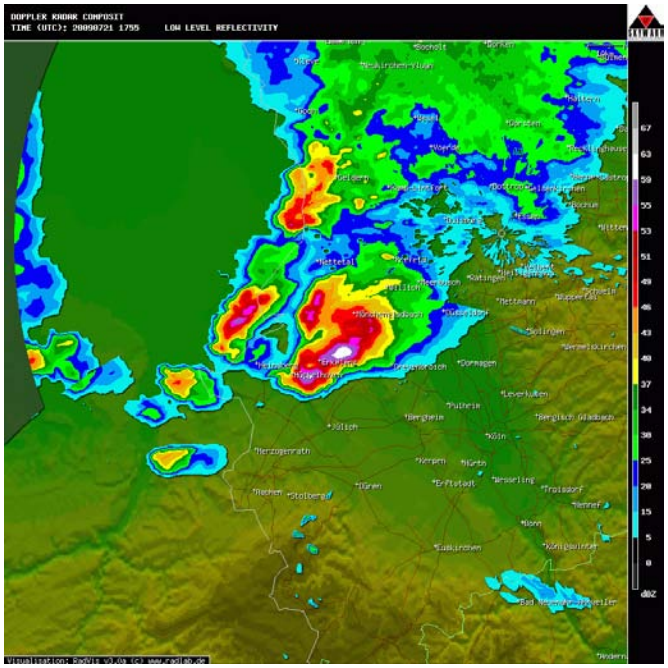

Abbildung 36: Radarreflektivität um 17:55 UTC (Daten: Deutscher Wetterdienst , Visualisierung: RadVis)

Das nachfolgende Radarbild der Radialgeschwindigkeit bestätigt die Dipol-Signatur des Zeitraums vor 20 Minuten, was den Superzellenstatus gemäß der in Abschnitt 1 genannten Kriterien (langlebige und hochreichende Mesozyklone) bestätigt. Die große vertikale Erstreckung der Mesozyklone geht nicht direkt aus den Radarbildern hervor, hierfür liefern aber die Fotos der Zelle stichhaltige Indizien.

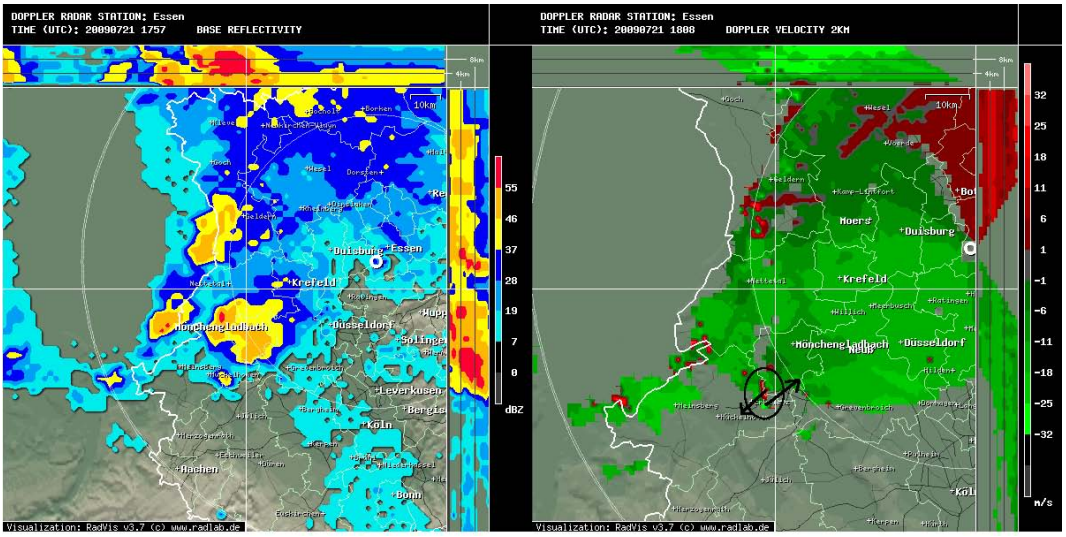

Abbildung 37: Radialgeschwindigkeit und Seitenaufriss um 18:00 UTC (Daten: Deutscher Wetterdienst , Visualisierung: RadVis)

Die letzte Fotoreihe dieser Zelle ist in den folgenden Abbildungen 38 und 39 (Anm.: Marcus Rohloff und Thomas Heinemann waren gemeinsam unterwegs) zu sehen. Hier verdeckt bereits der Nieder-

schlag die direkte Sicht auf den Aufwindbereich. Die Wallcloud lässt sich allerdings noch erahnen.

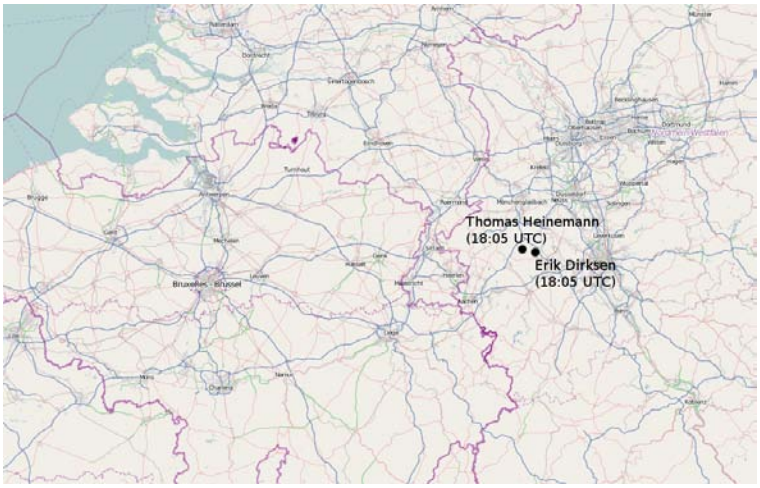

Abbildung 38: Position der Beobachter um 18:05 UTC (© http://openstreetmap.org)

Abbildung 39: Fotos der Beobachter um 18:05 UTC

4.4 Unwetterschäden

In Deutschland sind im Zusammenhang mit der Passage der Superzelle vor allem mittelgroßer Hagel und schwere Fallböen (downbursts) aufgetreten, dies betrifft insbesondere die Gegend zwischen Erkelenz und Neuss. Zu Beginn der Entwicklung dieser Zelle brachte sie in Belgien vor allem großen Hagel mit Körnern bis Tennisballgröße. Ein Beispiel der Sturmschäden ist in Abb. 40 zu sehen, der Überblick über alle Ereignisse des Tages findet sich auf Abb. 41 .

Abbildung 40: Sturmschaden an der Autobahn 44 (Foto: Marcus Rohloff)

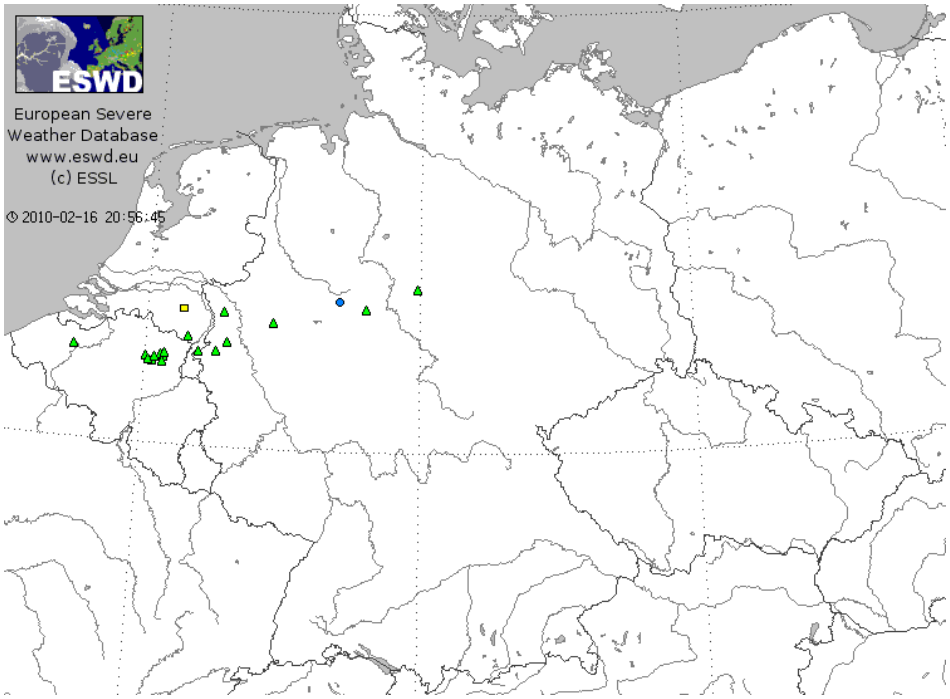

Abbildung 41: Unwettermeldungen 21.07. 2009 (European Severe Weather Database)

4.5 Zusammenfassung

Bei der Zelle vom 21. Juli 2009, welche unter anderem über die Region Heinsberg / Erkelenz zog, handelt es sich um eine langlebige Superzelle. Sie entstand gegen 15:00 UTC in Belgien und löste sich am späten Abend etwa gegen 19:30 UTC über dem Bergischen Land auf, was einer Lebensdauer von etwa 4 Stunden und 30 Minuten entspricht. Diese Zelle ist allerdings nur eine von mehreren starken langlebigen Zellen, die großen Hagel produzierten. Zwei weitere Verdachtsfälle gibt es in Nordbelgien und in den Niederlanden sowie nördlich der untersuchten Zelle in Nordrhein-Westfalen.

5 Fazit

Diese zwei Fallstudien zeigen ansatzweise die möglichen Auswirkungen von Superzellen in Deutschland, wenn sie besiedeltes Gebiet treffen. Insbesondere der erste Fall verdeutlicht die Schwierigkeiten bei der Auswertung der Radardaten und den z.T. recht großen Interpretationsspielraum. Die Signatur im Radialwindfeld könnte sowohl eine Mesozyklone als auch eine Meso-Antizyklone zeigen, wobei letztere eher mit dem Foto vereinbar wäre, erstere eher mit der Veränderung der Zugrichtung. Das Beobachternetz ist in einigen Teilen Deutschlands noch nicht dicht genug um alle notwendigen Informationen zu einem solchen Fall erfassen zu können (am 11. April 2009 war einzig das Chasingteam Dortmund in der unmittelbaren Umgebung der untersuchten Zellen unterwegs). Eine andere Lehre kann aus der zweiten Fallstudie gezogen werden: Auch wenn sehr viele Beobachter eine solche Zelle beobachten können, ist es trotzdem möglich einen kurzlebigen Tornado zu übersehen. Es gibt bis jetzt kaum verifizierte Superzellen in Deutschland, da ein kleiner Aufwindturm und Abschattungseffekte die Radialwinddaten für die Verifikation unbrauchbar machen und es kaum weitere Kriterien gibt, die eindeutige Indizien für Superzellen sind. Das bestmögliche Indiz für die Verifikation ist eine Videoaufnahme des gesamten Aufwindturms, die im günstigsten Fall starke Rotation zeigt. Eine Änderung der Zugrichtung und -geschwindigkeit wird derzeit noch als mögliches Testkriterium untersucht, es birgt aber auch einige Risiken und kann insbesondere bei retrograden oder seitwärts wachsenden Multizellen häufig zu falschem Alarm führen. Die Untersuchung einer großen Anzahl an Gewittertagen in ganz Deutschland mit einer detailierten Betrachtung aller markanten Zellen wird vermutlich in den nächsten Jahren abgeschlossen sein. Sie könnte erste Hinweise für die kinematische Erfassung verdächtiger Gewitterzellen liefern, muss sich aber im Anschluss einer langwierigen Anpassung unterziehen, um die Wahrscheinlichkeit eines falschen Alarms zu minimieren.

Der Autor möchte an dieser Stelle einigen Personen danken, die bei dieser Arbeit mitgewirkt haben. Die Diskussionen mit Johannes Dahl (DLR Oberpfaffenhofen, LMU München) über die Dynamik von Superzellen waren bei der Erläuterung der Grundlagen sehr hilfreich. Ohne die Bereitstellung der Radardaten vom Deutschen Wetterdienst in Offenbach, bei der Ansgar Berling (Skywarn Deutschland e.V.) und Andreas Friedrich (Deutscher Wetterdienst) sich in kurzer Zeit für die Datenbeschaffung einsetzen konnten, wäre eine Verifikation nach den Kriterien von Burgess und Doswell nicht möglich gewesen. Besonderer Dank gilt Dr. Jan Hoffmann (Meteo Group, Radlab), der kurze Zeit vor der Präsentation dieser Fallstudien die Visualisierung der Radardaten kurzfristig durchführen konnte. Weiterhin ist dem European Severe Storms Laboratory, dort insbesondere Thilo Kühne (QC-Administrator der ESWD), für die Bereitstellung der Unwettermeldungen zu danken. Abschließend ist allen Beobachtern für die Bereitstellung der Fotos zu danken.

Literatur

[1] BROWNING, K.A. : *Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds.* In *J. Atmos. Sci.* **21,** (1964) pp. 634-639

[2] BUNKERS, M.J. et al. : *Predicting Supercell Motion Using a New Hodograph Technique.* In *Wea. Forecasting*, **15,** (2000) pp. 61-79

[3] CHURCH, C. ; BURGESS, D. ; DOSWELL III, C.A. ; DAVIES-JONES, R. : *The tornado: its structure, dynamics, prediction, and hazards.* Geophys. Monogr., **79** , American Geophysical Union, 637 pp.

[4] DAHL, J.M.L. : *Supercells - Their Dynamics and Prediction.* Berlin, Freie Universität, Institut für Meteorologie, Diplomarbeit, 2006

[5] DAVIES-JONES, R. : *Linear and Nonlinear Propagation of Supercell Storms.* In *J. Atmos. Sci.*, **59,** (2002) pp. 3178-3205

[6] DROEGEMEIER, K.K. ; LAZARUS, S.M. ; DAVIES-JONES, R. *The Influence of Helicity on Numerically Simulated Convective Storms.* In *Mon. Wea. Rev.*, **121,** (1993) pp. 2005-2029

[7] EVANS, J.S. ; DOSWELL III, C.A. : *Examination of Derecho Environments Using Proximity Soundings.* In *Wea. Forecasting*, **16,** (2001) pp. 329-342

[8] HOUZE, R.A., Jr. : *Cloud Dynamics.* San Diego : Academic Press, 1993

[9] LIN, Y.-L. : *Mesoscale Dynamics.* Cambridge : Cambridge University Press, 2007

[10] WALLACE, J.M. ; HOBBS, P.V. : *Atmospheric Science: An Introductory Survey.* Second Edition. Amsterdam : Elsevier, Academic Press, 2006

[11] Deutscher Wetterdienst (Bereitstellung von Radardaten und Radiosondendaten)

[12] `http://www.skywarn.de/forum/viewtopic.php?f=34&t=7228`

[13] `http://www.tornadoliste.de/090721heinsberg.htm`

[14] `http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/87/Greensburg3_small.gif`

[15] `http://en.wikipedia.org/wiki/File:Meso-2.svg`