

Beginn der eigentlichen Simulationsperiode gibt man dann die aus der Inversion gewonnen Hydrometeor-Verteilungen vor. Diese wirken über den Auftriebsterm und das Wolkenmodell auch auf das Strömungs- und Temperaturfeld zurück. Selbst wenn sich diese Initialwolken zunächst auflösen, bringen sie dennoch die Konvektion an den Orten in Gang, wo sie vom Radar beobachtet wurde und helfen dem KAMM-Modell, sich effektiver dem realen atmosphärischen Zustand zu nähern.

5.3 Schwere Unwetter in der Oberrheinregion

In der vorliegenden Arbeit wurde das allgemeine Verhalten konvektiver hochreichender Wolken analysiert. Die verschiedenen Typen solcher Niederschlagssysteme wurden schon von Hannesen (1998) beleuchtet. Von besonderem Interesse sind aufgrund ihres Schadenpotentials sehr schwere, langlebige Einzelgewitter, die mit Hagelschlag und im Extremfall auch Tornados verknüpft sein können. Bei diesen schweren lokalen Stürmen handelt es sich zumeist um Superzellengewitter, deren Entstehungsprozesse zusätzlich zu den von Hannesen (1998) gegebenen Ausführungen an dieser Stelle genauer besprochen werden sollen.

Auf diesen Gewittertyp und sein Vorkommen in der Oberrheinregion machen z. B. Haase–Straub et al. (1994) sowie Linder und Schmid (1996) aufmerksam. Eine Meldung der britischen Organisation TORRO³ von zwei möglichen Tornados in dieser Region im Jahre 1995 weist ebenfalls darauf hin. Für eines der erwähnten Daten konnte tatsächlich ein Tornado nachgewiesen werden: am 9. September 1995 in Oberkirch–Nußbach. Die Analyse der zugehörigen Radardaten (Hannesen et al., 1998; Hannesen, 1998) bestätigte, daß ein Superzellen–Cb für den kurzlebigen Tornado verantwortlich war.

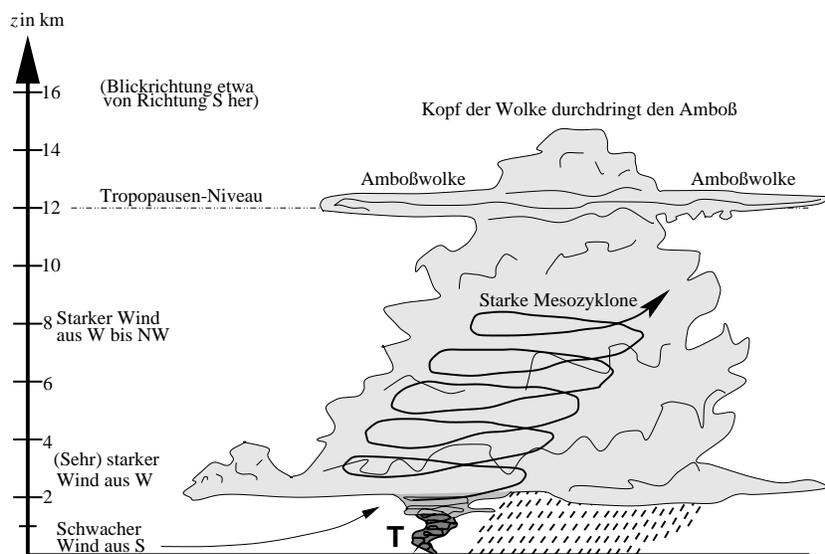


Abbildung 5.31: Schematische Seitenansicht eines voll entwickelten Superzellengewitters mit Tornado **T** bei Blickrichtung etwa aus Süden.

Rahmen dieser Arbeit mit KAMM nur cursorisch behandelt werden konnte. Infolgedessen liefert dieser Abschnitt neben der Beantwortung der oben aufgeworfenen Fragen auch ein Resümee der hier wichtigen Modellresultate, die mit KAMM für den Oberrheingraben erzielt wurden.

Als Folge dieser Untersuchung wurden eingehende Forschungen betrieben, die klären sollten, ob es in der Oberrheinregion häufiger zu Tornados kommt, ob dabei ein orographischer Einfluß erkennbar und wie groß die Wahrscheinlichkeit für Tornados im deutschsprachigen Raum ist. Diese Fragen können als geklärt angesehen werden; die Arbeit hierzu erwies sich als sehr fruchtbar. Die Modellierung mit KAMM spielte bei der Identifikation der wesentlichen Prozesse der Superzellenentstehung im mittleren Oberrheingebiet eine wichtige Rolle, auch wenn das Thema im

³TORnado and Storm Research Organisation; <http://www.torro.org.uk>

Der Tornado von Oberkirch–Nußbach entstand wie der viel verheerendere Fall vom 10. Juli 1968 in Pforzheim (Nestle, 1969) aus einem Superzellengewitter. Dieser schwerste Einzel–Gewittertyp kann entstehen, wenn neben großer Labilität der Luftmassen auch eine starke zyklonale Windscherung in den untersten ca. 3 km über dem Erdboden vorliegt. Es kann dann zur Bildung einer mesozyklonalen Rotationszone oder kurz Mesozyklone innerhalb der sich entwickelnden Wolke kommen. Charakteristisch ist weiterhin, daß es nur einen dominanten und persistenten Aufwindbereich in der Wolke gibt und keine kurzlebigen Teilzellen wie in Multizellengewittern. Mesozyklonen wie in der schematischen Abb. 5.31 eines Superzellen–Cb wurden am 9. September 1995 mehrfach vom C–Band Doppler Radar des Instituts anhand der Dopplergeschwindigkeit gemessen, ohne daß es bei diesen aber zur Ausbildung eines Tornados kam (Hannesen et al., 1998).

Erst wenn weitere günstige Bedingungen zur Intensivierung der Zelle vorliegen, kann die Reifephase der Superzelle mit Hagel und/oder Tornado(s) erreicht werden, wie in den Abbn. 5.31 und 5.32 anhand von Seiten- und Draufsicht gezeigt. Die Wolke stößt bis in die Tropopausenregion vor, und dieses Überschießen der Konvektion, verursacht durch eine plötzliche Verstärkung des Aufwinds in der Mesozyklone, führt u. a. durch Wirbeldehnung zu einer Zunahme der Wirbelstärke und begünstigt die Bildung des mit **T** bezeichneten Tornados. In dem beschriebenen Reifezustand kann die Superzelle bis zu 1 h oder länger mit einer Verlagerungsgeschwindigkeit von $c \approx 60 \text{ km h}^{-1}$ weiterziehen, bevor sie sich schließlich auflöst. Um einen solchen Wolkentyp hat es sich bei dem starken Tornado von Pforzheim 1968 gehandelt, und mit etwa um einen Faktor 2 geringeren Dimensionen auch bei einer der am 9. September 1995 vom Radar erfaßten Zellen mit Mesozyklone, dem von Hannesen et al. (1998) analysierten Sturm von Oberkirch–Nußbach.

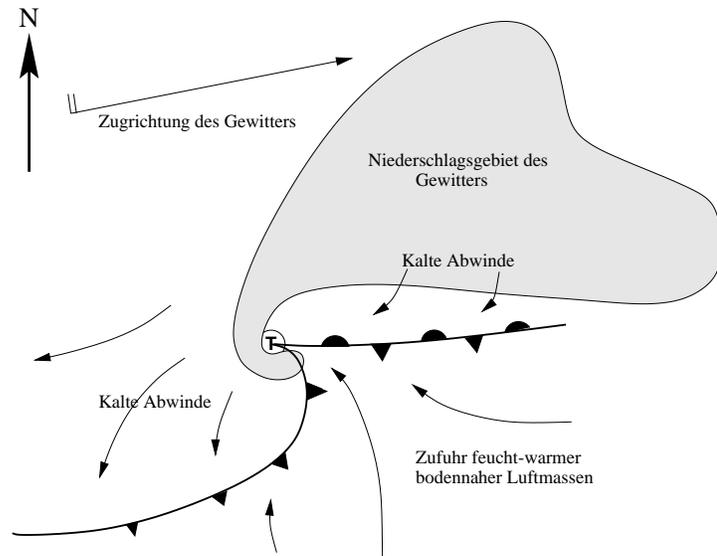


Abbildung 5.32: Draufsicht des zur Abb. 5.31 gehörenden Cb–Konvektionssystems. Nach Lemon und Doswell (1979).

Die Nachforschungen nach weiteren historischen Ereignissen im Bereich des mittleren Oberrheins förderten eine größere Zahl sicher belegter Fälle in der Oberrheinregion zutage, was in Abb. 5.33 anhand der Tornadozugbahnen gezeigt ist. Es ist eine Häufung dieser Ereignisse entlang einer gut definierten „Tornado–Allee“ erkennbar, in die sich auch der starke Pforzheimer Tornado vom 10. Juli 1968 genau einfügt⁴. Für ganz Deutschland wurden inklusive der bei Wegener (1917) angeführten Ereignisse mittlerweile mehr als 340 historische und aktuelle Fälle auf dem Gebiet des heutigen Deutschland gesammelt und ausgewertet (Dotzek et al., 1998; Dotzek und Hannesen, 1998). Daraus ergibt sich, daß im langjährigen Mittel mit bundesweit etwa 2–5 Tornadofällen pro Jahr gerechnet werden muß.

Auch in den Vereinigten Staaten treten Tornados manchmal über bergigen Regionen auf (Nuss, 1986; Fujita, 1989). Es ist deshalb auch von übergeordnetem Interesse, mithilfe der Modellierung zu klären, ob ein orographischer Einfluß für die beobachtete Häufung von Tornados im mittleren Oberrheingraben identifiziert werden kann. Hier liefert das KAMM tatsächlich zwei wichtige Hinweise:

⁴Auffällig ist in diesem Zusammenhang, daß Gysi (1998, Abb. 7) in den Niederschlagssummen für Anströmungen aus Süd-südwest erhöhte Niederschläge in genau dieser Allee nachweist. Auch die ganz normale Konvektion ist hier offenbar begünstigt.

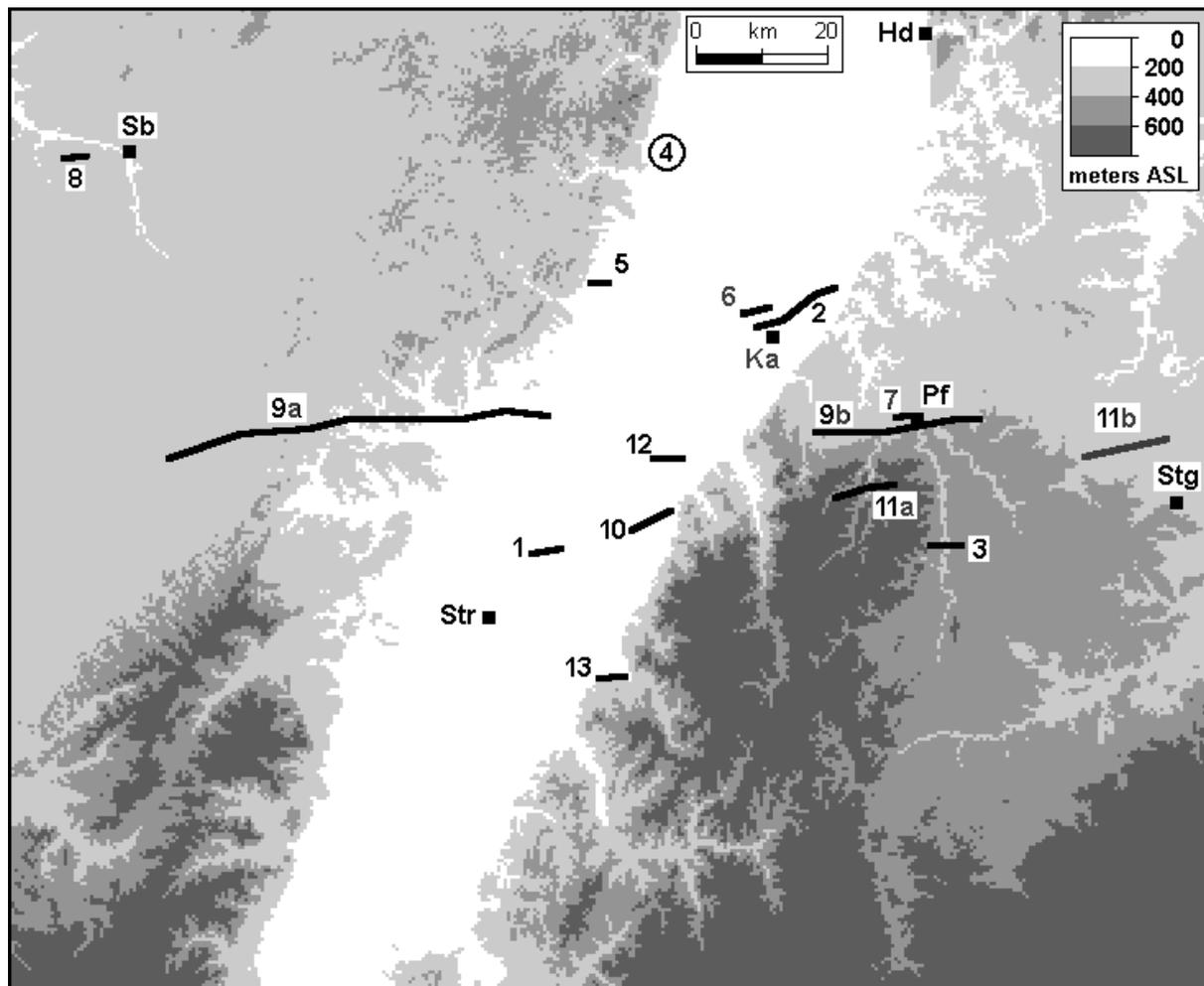


Abbildung 5.33: Tornado-Zugbahnen der letzten Jahrzehnte im mittleren Oberrheinischen Graben: 1) 24. Mai 1878, 2) 4. Jul 1885, 3) 1. Jul 1895, 4) 11. Mai 1910, 5) Ende Sep 1913, 6) 7. Jun 1952, 7) 13. Aug 1952, 8) 27. Apr 1960, 9 a,b) 10. Jul 1968, 10) 8. Mai 1985, 11 a,b) 23. Jul 1986, 12) 21. Jul 1992, 13) 9. Sep 1995. Ka = Karlsruhe, Hd = Heidelberg, Sb = Saarbrücken, Str = Straßburg, Stg = Stuttgart, Pf = Pforzheim. Modifiziert nach Hannesen et al. (1998).

1. Bevorzugtes Auftreten der Ereignisse am Ostrand des Rheintals.

Wie beim Vergleich der Rechnungen über flachem Gelände und dem idealisierten Einzelberg schon deutlich gezeigt wurde, führt die orogene Hebung auf der Luvseite eines Berges zu einer

- Erhöhung der Wolkenobergrenzen,
- Intensivierung des Aufwinds,
- Verstärkung der Niederschlagsprozesse.

Diese Effekte können bei den schwächer ausgeprägten Tornados am Ostrand des Rheintals den letzten Impuls zur Wirbeldehnung in der Cb-Wolke und damit zur Erhöhung der Wirbelstärke und zur Ausbildung des Wolkentrichters zum Boden hin gegeben haben. Dazu paßt auch, daß diese Tornados nicht nennenswert in die Bergregionen des Nordschwarzwalds hineingelaufen sind, sondern daß nur die kurzlebige Hebung am sanft ansteigenden Talgrund den Ausschlag gab.

2. Superposition von Scherung und feucht-warmer Luft.

Die Abb. 5.33 mit den Tornadozugbahnen zeigt u. a. mehrere Fälle, die sich nördlich von Vogesen und Schwarzwald erstrecken. In der Dissertation von Hannesen (1998) deutet sich auch in den mittleren Niederschlagssummen eine von der Zaberner Senke ostnordöstlich verlaufende Zone intensivierter Konvektion an, in der es neben Regen außerdem bevorzugt zu Hagelunwettern kommt.

Die Modellierungen für die in Mitteleuropa für sommerliche Unwetter besonders relevanten Südwest-Lagen (Ludlam, 1980; Morris, 1986) liefern eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen, die in der Abb. 5.34 schematisch erläutert ist. Die ausgefüllten, dicken Pfeile demonstrieren den schon besprochenen prinzipiellen Strömungsverlauf in der atmosphärischen Grenzschicht der Oberrheinregion. Man erkennt, daß es am mittleren Oberrhein zu einem Zusammenprall der kanalisierten Südströmung im Rheintal und der Westströmung im Bereich der Zaberner Senke kommt. Die gestrichelte fette Linie deutet diese bodennahe Konvergenz an.

Die dünnen, nicht ausgefüllten Pfeile zeigen den ebenfalls vom KAMM-Modell simulierten Transport feucht-warmer Luft mit hoher Θ_e an. Er entsteht bereits kurz nach Sonnenaufgang, wenn der Osthang der Vogesen schon kräftig von der Sonne beschienen wird und die bodennah nach Norden strömende Luft erwärmt, die rechtsrheinischen Hänge aber noch im Schatten liegen. Diese Asymmetrie setzt sich bis in die Mittagsstunden fort, so daß es innerhalb der allgemeinen Strömung zu fortgesetztem Transport der erwärmten Grenzschichtluft nordwärts kommt.

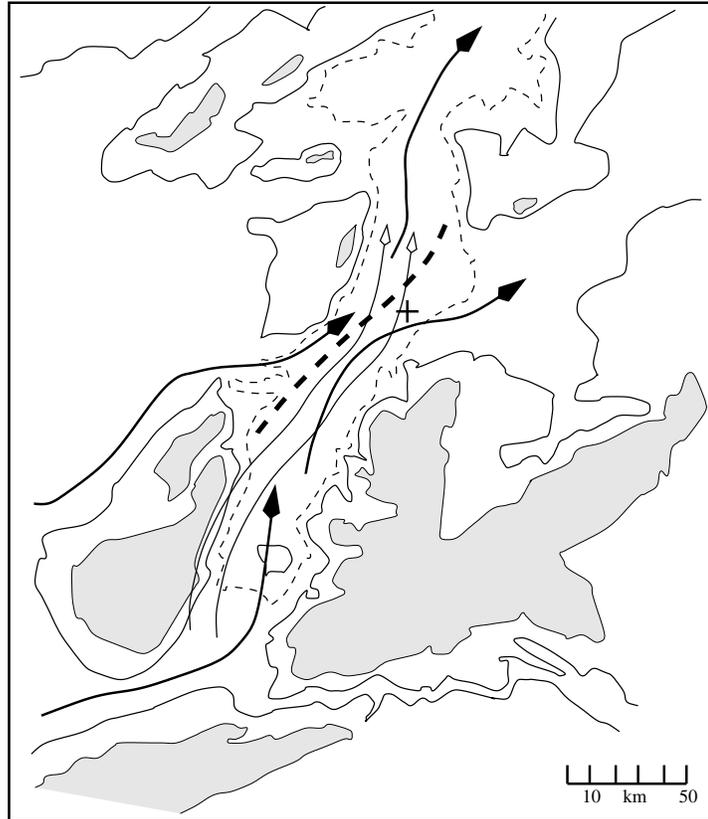


Abbildung 5.34: Schema der Mechanismen zur Erklärung der Unwetterzone der mittleren Oberrheinregion. Vgl. Abb. 5.23.

Im Bereich der Konvergenzlinie überlagern sich beide Effekte und erhöhen die Auslösewahrscheinlichkeit hochreichender Feuchtkonvektion. Werden derartige Südwest-Lagen, die vor allem im Sommer mit schwül-heißer Luft am Boden gekoppelt sind (Morris, 1986) von einer aus Nordwesten herannahenden Kaltluft abgelöst, liegen insgesamt vier begünstigende Effekte für stark konvektive Wolken am mittleren Oberrhein vor: *i*) bodennahe Konvergenz, *ii*) bodennah feucht-warme Luft, *iii*) eine zyklonale Windscherung von Süd über West auf Nordwest in der Höhe und *iv*) in der Höhe trocken-kalte Luft. Diese extremen Verhältnisse lagen z. B. am 10. Juli 1968 vor und führten zu dem in Abb. 5.33 gezeigten Tornado Nr. 9, der im Elsaß und in der Innenstadt Pforzheims Schäden in dreistelliger Millionenhöhe verursachte. Aber auch am 21. Juli 1992 oder dem 22. Juli 1995 lagen ähnliche Bedingungen vor (Haase-Straub et al., 1994; Hannesen, 1998) und führten am mittleren Oberrhein zu starken Hagelunwettern und Wolkenbrüchen. Dabei entstand 1992 bei Rastatt der Tornado Nr. 12 aus Abb. 5.33 und 1995 weiter südlich der von Linder und Schmid (1996) analysierte Tornadofall in der Schweiz. Die KAMM-Modelldaten liefern hierzu also eine Erklärung für die beobachtete Häufung schwerer Unwetter in der mittleren Oberrheinregion.